

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ РАН ПО ТЕПЛОМАСООБМЕНУ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
ИНСТИТУТ ТЕПЛОВОЙ И АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НИУ «МЭИ»



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

МАТЕРИАЛЫ

III международной конференции

19 – 23 октября 2020

Москва
Издательство МЭИ
2020

УДК 536.2+621
ББК 31.3
С 56

С 56 Современные проблемы теплофизики и энергетики (19–23 октября 2020): материалы III международной конференции. – М.: Издательство МЭИ, 2020. – 708 с.

ISBN 978-5-7046-2372-4

Представлены материалы конференции по вопросам кипения, испарения и конденсации двухфазных жидкостей; гидродинамики и теплообмена; методам и средствам измерений; массообмену химически реагирующих сред; интенсификации теплообмена; системам теплоснабжения; свойствам рабочих тел в энергетике; цифровизации энергетики и пр.

УДК 536.2+621
ББК 31.3

*Материалы печатаются в авторской редакции
методом прямого репродуцирования с авторских оригиналов*

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕПЛОФИЗИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Материалы
III международной конференции
19 – 23 октября 2020

Подписано в печать	13.11.20.	Печать цифровая.	Формат 60×84 1/16
Печ. л. 44,25	Тираж 22 экз.	Изд. № 20н-066	Заказ №

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.

ISBN 978-5-7046-2372-4

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2020

НАУЧНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель научного комитета

Леонтьев А.И., академик

Члены научного комитета

Алифанов О.М., академик	Митрофанова О.В., профессор
Алексеев С.В., академик	Ольховский Г.Г., чл.-корр. РАН
Андрюшин А.В., профессор	Павленко А.Н., член-корр. РАН
Батенин В.М., член-корр. РАН	Петров О.Ф., академик
Байдаков В.Г., профессор	Петрунин В.В., профессор
Вараксин А.Ю., член-корр. РАН	Пиралишвили Ш.А., профессор
Гаряев А.Б., профессор	Покусаев Б.Г., чл.-корр. РАН
Дектерев А.А., профессор	Попель О.С., профессор
Деревич И.В., профессор	Попов И.А., профессор
Дмитриев А.С., профессор	Рогалев Н.Д., профессор
Дмитриев С.М., профессор	Рыжков С.В., профессор
Зейгарник Ю.А., профессор	Сапожников С.З., профессор
Исаев С.А., профессор	Синкевич О.А., профессор
Ильгисонис В.И., профессор	Сергеев В.В., член-корр. РАН
Кабов А.О., профессор	Смирнов Е.М., профессор
Клименко А.В., академик	Сон Э.Е., академик
Клименко В.В., член-корр. РАН	Терехов В.И., профессор
Комов А.Т., профессор	Фрик П.Г., профессор
Корнев Н.В., профессор	Филиппов С.П., академик
Коротеев А.А., академик	Халатов А.А., академик НАН Украины
Крюков А.П., профессор	Хвесюк В.И., профессор
Кузма-Кичта Ю.А., профессор	Чирков А.Ю., профессор
Кузнецов Г.В., профессор	Шеремет М.А., профессор
Кузнецов В.В., профессор	Ягов В.В., профессор
Куйбин П.А., профессор	Яньков Г.Г., профессор
Маркович Д.М., академик	Jiang P.X., профессор, Китай
Мильман О.О., профессор	Garimella S., профессор, USA
Мирнов С.В., профессор	Hanjalic K., профессор, Нидерланды

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель

Дедов А.В., член-корр. РАН

Члены организационного комитета

Аникеев А.В.	Захаренков А.В.	Прохоров В.Б.
Будаев В.П.	Листратов Я.И.	Пузина Ю.Ю.
Герасимов Д.Н.	Мезин С.В.	Черняев А.Н.
Дудолин А.А.	Орлов К.А.	

Ученый секретарь

Сморчкова Ю.В

КРУГЛЫЕ СТОЛЫ И СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

Круглый стол №1 «Кризис кипения в большом объеме: экспериментальные результаты и моделирование»

Председатель: Дедов А.В.

Ученый секретарь: Демидов А.С.

Круглый стол №2 «Атомно-водородная энергетика: перспективы реализации в РФ»

Председатель: Дедов А.В.

Ученый секретарь: Штелинг В.С.

Круглый стол №3 «Энергетическая утилизация ТКО: российские реалии и перспективы»

Председатель: Дедов А.В.

Ученый секретарь: Лобанова Л.Г.

Круглый стол №4 «Атомная энергетика РФ: перспективы развития»

Председатель: Дедов А.В.

Ученый секретарь: Журавлев К.В.

Круглый стол №5 «Актуальные вопросы теплоэнергетики и теплотехники»

Председатель: Сиденков Д.В.

Секция 1. Гидродинамика и теплообмен

1.1. Гидродинамика и теплообмен в однофазных средах

Сопредседатели: Яньков Г.Г., Минко К.Б.

Ученый секретарь: Пятницкая Н.Ю.

1.2. Теплообмен при фазовых превращениях

Сопредседатели: Ягов В.В., Комов А.Т.

Ученый секретарь: Забиров А.Р.

1.3. Процессы в гетерогенных средах

Сопредседатели: Синкевич О.А., Кузма-Кичта Ю.А.

Ученый секретарь: Иванов Н.С.

1.4. Радиационный теплообмен и теплопроводность

Сопредседатели: Мирошниченко В.И., Листратов Я.И.

Ученый секретарь: Молотова И.А.

Секция 2. Физика плазмы и плазменные технологии

Сопредседатели: Будаев В.П., Федорович С.Д.

Ученые секретари: Амелин А.И., Рогозин К.А.

Секция 3. Свойства рабочих тел в энергетике

Сопредседатели: Орлов К.А., Сиденков Д.В.

Ученый секретарь: Деев Р.

Секция 4. Актуальные вопросы теплоэнергетики и теплотехник

4.1. Оборудование и режимы ТЭС и АЭС

Сопредседатели: Дудолин А.А., Тупов В.Б.

Ученый секретарь: Скворцов В.С.

4.2. Цифровизация энергетики и вопросы управления

Сопредседатели: Черняев А.Н., Мезин С.В.

Ученый секретарь: Щербатов И.А.

4.3. Актуальные вопросы теплотехники

Сопредседатели: Орлов К.А., Сиденков Д.В.

Ученый секретарь: Сиденков Д.В.

4.4. Топливо и водные технологии в теплоэнергетике

Сопредседатели: Орлов К.А., Селиванов Е.А.

Ученый секретарь: Селиванов Е.А.

Секция 1
ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССООБМЕН

Аббасов Ё.С., Умурзакова М.А.
Ферганский политехнический институт
Фергана ул. Ферганская 86
erkinabbasov@yandex.ru

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

При вынужденной конвекции главным недостатком плоских воздухонагревателей является их низкая теплопередача от стенок абсорбера к воздушному потоку. Так как коллектор работает при определенном расходе теплоносителя, то увеличение скорости, а соответственно расхода воздуха в канале коллектора не всегда приводит к увеличению теплосъема с единицы поверхности абсорбера, по той причине, что температура стенки абсорбера снижается пропорционально скорости воздушного потока при данном потоке солнечного излучения. Этим воздушный коллектор отличается от промышленных теплообменных аппаратов, в которых температура стенки теплообменника постоянна (граничное условие 1 рода) [1]. По мере снижения температуры стенки абсорбера уменьшается полезная разность температур между стенкой и воздушным теплоносителем и как следствие снижается коэффициент теплоотдачи. Следовательно, может резко снижаться эффективность коллектора и практически коллектор не может обеспечить требуемую температуру воздуха на выходе из нагревателя. Очевидно, только оптимальное соотношение между расходом воздуха поверхностью коллектора и теплоотдачей приводит к полноценной работе и эксплуатации нагревателя.

Учитывая, что в последние годы для увеличения конвективной теплоотдачи плоские солнечные воздухонагреватели содержат в себе абсорберы, на которых размещаются интенсификаторы теплоотдачи, то естественно также, как и в гладко пластинчатых нагревателях в нагревателях с интенсификацией теплоотдачи должно поддерживаться оптимальное соотношение между теплотехническими характеристиками устройства. В этой связи, для анализа эффективности плоского коллектора наряду с традиционным понятием К.П.Д. коллектора для плоских воздушных нагревателей целесообразным считается использование тепловой эффективности нагревателя, которая может характеризовать работу коллектора с точки зрения выбора оптимальных соотношений его теплотехнических показателей [2].

Авторами сообщения предлагается формула расчета тепловой эффективности солнечного воздухонагревателя, которая имеет следующий вид:

$\varepsilon = 2(1 - \frac{G C_p}{\alpha F})$, (1) $\varepsilon_{\text{пот}} = 1 - \varepsilon$ где $\frac{G C_p}{\alpha F}$ – является параметром теплоотдачи нагревателя.

ε - характеризует эффективность теплообмена на солнечном абсорбере, $\varepsilon_{\text{пот}}$ – характеризует потери тепла из –за несовершенства теплоотдачи от потока воздуха к поверхности абсорбера.

Исследованиями авторов показано, что предлагаемая формула (1) может быть использована для оценки эффективности теплообмена практически любой конструкции плоских солнечных воздухонагревателей. На рис. 1 показаны расчеты тепловой эффективности ε_1 и ε_2 для нагревателей (имеющих одинаковые габариты и эксплуатирующихся в равных гидродинамических условиях) соответственно с гладким абсорбером на поверхности которого были установлены интенсификаторы теплоотдачи в виде поперечных металлических стружек. Анализ кривых показывает, что нагреватель с гладким абсорбером значительно уступает по тепловой эффективности нагревателю с интенсификаторами теплообмена.

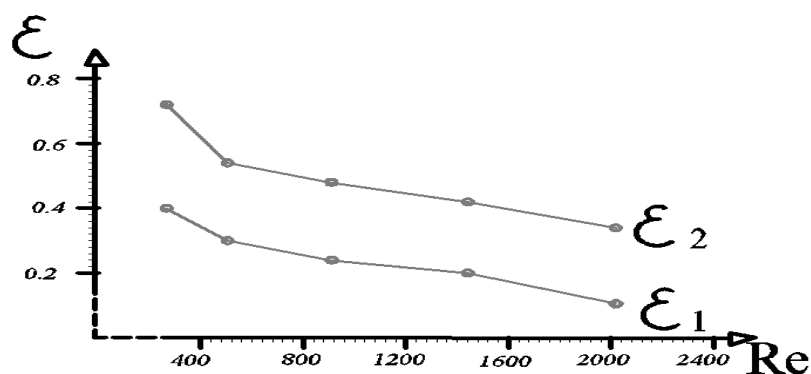


Рис.1. Изменения эффективности в зависимости от числа Re.

Список литературы

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача –М.: Энергия. 1975.- 488 с.
2. Аббасов Ё.С., Умурзакова М.А. Тепловая эффективность плоских солнечных воздухонагревателей. Монография. Фергана, 2019. 127 стр.

Абдуллин А.М.

Нижекамский химико-технологический институт (филиал)
Казанского национального исследовательского
технологического университета,
Россия, 423578 Нижнекамск, Строителей, 47
amabdullin@mail.ru

РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Большое практическое значение имеют вопросы интенсификации теплообмена в высокотемпературных энергетических и технологических установках. Одним из возможных путей решения этого вопроса является расчетно-теоретический анализ закономерностей тепло - и массообмена в камерах сгорания топлива в таких установках.

Большинство применяемых технологических печей радиантно-конвекционные. В радиантных камерах происходит ряд сложных взаимосвязанных физико-химических процессов. Тепло к трубчатым змеевикам большей частью передается излучением от пламени, раскаленных поверхностей огнеупорной футеровки и частично конвекцией от продуктов сгорания топлива. Конвективная составляющая теплообмена при температурах, характерных радиантным камерам сгорания топлива в технологических печах, невелика. Однако в объеме топки происходит интенсивное перемешивание горячих потоков продуктов сгорания с относительно более холодными потоками. Эти процессы наряду с другими оказывают сильное влияние на распределение температуры в объеме топки, следовательно, и на общий теплообмен в целом.

Объектом исследования является вертикально расположенный плоский канал высотой L и шириной H , приближенно моделирующий радиантную камеру. Стенки канала образованы огнеупорной футеровкой и трубчатым экраном с известной температурой. Объем камеры заполнен селективно излучающей, поглощающей и слабо рассеивающей средой продуктов сгорания газообразного топлива.

Математическая модель процессов, происходящих в радиантной камере, основана на системе двумерных интегро-дифференциальных уравнений радиационной газовой динамики, замкнутой двухпараметрической моделью турбулентной конвекции [1]. Уравнение переноса энергии излучением решается в приближении метода дискретных ординат посредством аппроксимации соответствующих уравнений на неравномерной конечно-разностной сетке. Газодинамическая часть задачи решается численно на конечно-разностной сетке “шахматного” типа по известному алгоритму SIMPLER.

Рассмотрены разные режимы организации топочного процесса (рис.1). Переход от одних режимов теплообмена к другим сводится к перестройке температурного поля в объеме топки и перераспределению тепловых потоков. При этом важную роль в теплообмене играет огнеупорная футеровка. Радиационные свойства огнеупоров сильно зависят от длины волны излучения. В практически интересном диапазоне спектра $\lambda = 1 \div 5 \mu\text{м}$ происходит спад степени черноты огнеупоров, что отрицательно сказывается на суммарном тепловосприятии трубчатом экраном.

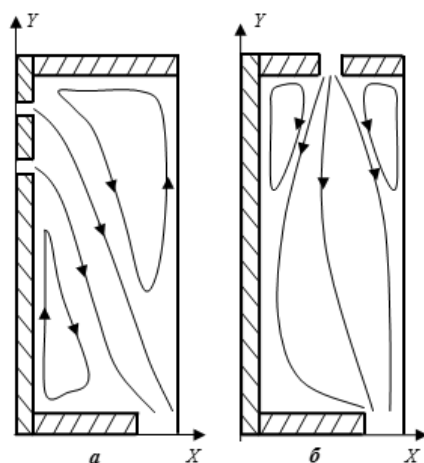


Рис. 1. Объект исследования. Косвенно направленный (а) и равномерно распределенный (б) режимы теплообмена.

Поглощенная футеровкой тепловая энергия возвращается обратно в объем топки посредством излучения. Пламя, особенно при наличии дисперсных частиц, например, сажи, экранирует поверхность нагрева от футеровки. Однако в «окнах» прозрачности спектра излученная футеровкой энергия беспрепятственно достигает трубчатого экрана. Показано, что «окна» прозрачности спектра наиболее эффективно используются при больших значениях степени черноты излучающей футеровки.

Список литературы

1. **Абдуллин А.М., Вафин Д.Б.** Численное моделирование локального теплообмена в топках трубчатых печей на основе дифференциальных приближений для лучистого переноса тепла // ИФЖ. 1991. Т. 60. №2. С. 291 – 297.

Абрамов А.Г., Зайцев Д.К., Смирнов Е.М., Смирновский А.А.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29
smirnov_em@sbpstu.ru

ОПЫТ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ КОЛЬЦЕВОЙ ПОЛОСТИ С ОДНОСТОРОННИМ НАГРЕВОМ ПРИ НАЛИЧИИ ОСЕВОГО ТРАНЗИТНОГО ПОТОКА

Представляются результаты тестовых расчетов течения и теплообмена в быстровращающейся полости с осевым транзитным потоком на основе вихреразрешающего моделирования. Геометрия расчетной области и режимные параметры соответствуют условиям экспериментов [1]. Наружный радиус полости (см. рис.1а) равен $b = 371$ мм, внутренний $a = 150$ мм, ширина полости $s = 75.2$ мм, скорость вращения – до 1500 об/мин. Одна из боковых стенок полости (Диск 2 на рис.1а) обогревается посредством лучистого теплообмена; измеренный профиль температуры внутренней поверхности диска задавался в качестве граничного условия для расчета; остальные стенки полости считались теплоизолированными. Охлаждающий воздух поступает в полость по кольцевой щели высотой $\Delta r = 4.8$ мм; радиальные перегородки на торцевой поверхности внутреннего цилиндра обеспечивают квазитвердое вращение поступающего в полость воздуха. Сама полость и вращающиеся вместе с ней подводящий и отводящий каналы заключены в неподвижный герметичный кожух, в котором поддерживается небольшое избыточное давление.

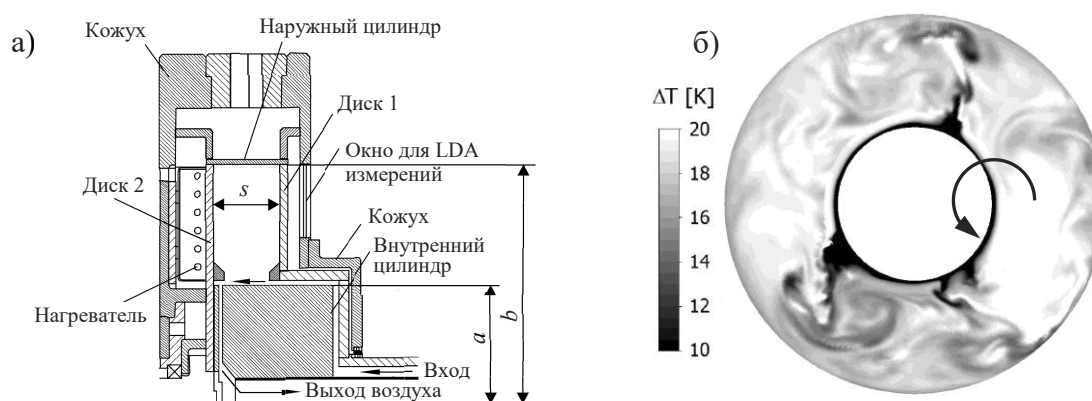


Рис. 1. Схема экспериментальной установки [1] (а) и мгновенное поле температуры в срединной плоскости (б)

Расчеты проводились в рамках зонального RANS-LES подхода: в подводящем канале и примыкающей к нему небольшой части полости использовалась модель турбулентности $k-\omega$ SST, в остальной части полости – метод LES. В качестве примера на рис. 1б показано мгновенное

поле избыточной температуры в среднем сечении полости для условий эксперимента №6 [1]; видны «факелы» движущегося на периферию холодного воздуха; на фоне хаотичного движения имеет место медленная прецессия ядра потока (отставание от вращения полости на 5-7%). Полученные данные по скорости вращения ядра и теплоотдаче на обогреваемом диске сопоставляются результатам URANS расчетов [2] и данными измерений [1].

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 20-08-01090.

Список литературы

1. Owen J.M., Powell J. Buoyancy-induced flow in a heated rotating cavity // J. Eng. Gas Turbines Power. January 2006, 128(1): 128–134. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2032451>
2. Owen J.M., Abrahamsson H., Lindblad K. Buoyancy-induced flow in open rotating cavities // J. Eng. Gas Turbines Power. October 2007, 129(4): 893–900. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2719260>

Агзамов Ж.Ш.,¹ Мухиддинов Д.Н.¹

¹ Ташкентский государственный технический университет
имени Ислама Каримова,
Узбекистан, Ташкент, 100095, Университетская, 2
a.jamshid@inbox.ru

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВОДОМАСЛЯНЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

В настоящее время в качестве маслоохладителей в турбодетандерных агрегатах применяются кожухотрубные аппараты из гладких труб для малых производительностей (до 10 кВт) и теплообменники из труб с интенсификаторами для производительности до 200 кВт [1]. С возрастанием потребностей в турбодетандерных и других технологических установках, очень остро встает вопрос о совершенствовании конструкций маслоохладителей. Эффективным путем снижения весо-габаритных характеристик теплообменников в различных отраслях промышленности является интенсификация теплообмена.

Потребность в интенсификации появляется тогда, когда увеличение скорости потока в пределах допустимых на практике гидравлических потерь давления, не обеспечивает получение необходимых габаритных размеров теплообменных аппаратов или заданной температуре стенок.

В теплообменных аппаратах используются поперечно обтекаемые пучки гладких труб с шахматным и коридорным расположением. Средняя теплоотдача для многорядных пучков гладких труб ($Z > 10$) определяется по формуле [1,2]: $Nu_f = C Re_f^n Pr_f^{0.33} (Pr_f / Pr_w)^{0.25}$, для

коридорных пучков при $Re_f=10^2-10^3$; коэффициенты $c=0,56$ и $n=0,5$; при $Re_f=10^3...2*10^5$; $c=0,2$; $n=0,65$ для $\frac{S_2}{D_H} \geq 2$ и $C=0,2$ $\left[1 + \left(2\frac{S_1}{D_H} - 3\right) \left(1 - \frac{S_2}{D_H}\right)^3\right]^{-2}$; $n=0,65$ при $S_2/D_H < 2$, причем для $S_1/D_H \leq 1,5$ принимается $C=0,2$; при $S_1/D_H > 3$ принимается $S_1/D_H=3$.

При $Re_f > 2*10^5$; коэффициенты $C=0,02$; $n=0,84$. Для шахматных пучков при $Re_f=10^2...10^3$; $C=0,64$; $n=0,5$; при $Re_f=10^3...2*10^5$; и $\varphi = \frac{\left(\frac{S_1}{D_H} - 1\right)}{\left(\frac{S_2'}{D_H} - 1\right)} = 0,1...0,6$ (где диагональный шаг $S_2' =$

$\sqrt{\frac{S_1^2}{4} + S_2^2}$ коэффициенты $C=0,23+0,06\varphi n=0,6$; при $Re_f > 2*10^5$ коэффициенты $C=0,023$; $n=0,84$.

В работе представлены результаты экспериментального исследования процесса охлаждения турбинного масла в модели холодильника со спирально-проволочным оребрением, представляющего собой теплообменник типа "труба в трубе" состоящий из внутренней медной трубы $\varnothing 18 \times 2$ мм и наружной нержавеющей трубы $\varnothing 45 \times 2$ мм. Снаружи труба $\varnothing 18 \times 2$ мм имеет спирально-проволочное оребрение из медной проволоки $d=1$ мм. Медная проволока вначале наматывалась на оправку $\varnothing 10$ мм, затем образовавшаяся спираль наматывалась на трубу $\varnothing 18 \times 2$ мм и припаивалась к ней. В межтрубном кольцевом пространстве теплообменника движется масло, внутри трубы $\varnothing 18 \times 2$ мм – противоток охлаждающая вода. На рис. 1. сопоставлены критериальные зависимости в виде: $Nu=f(Re)$

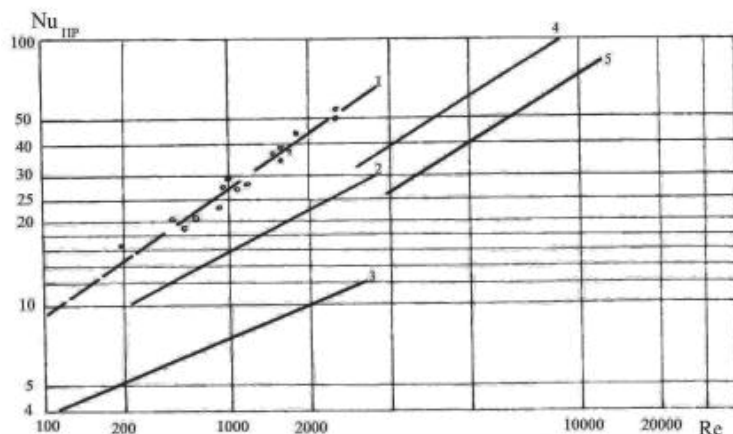


Рис.1. Зависимость $Nu=f(Re)$ для масляного холодильника со спирально – проволочным оребрением.

Кривая I соответствует опытным данным, полученным при исследовании процесса охлаждения масла в модели холодильника со спирально–проволочным оребрением, состоящего из внутренней медной

трубы $\varnothing 18 \times 2$ мм и наружной нержавеющей трубы $\varnothing 45 \times 2$ мм. В межтрубном пространстве движется масло, внутри трубы $\varnothing 18 \times 2$ мм – охлаждающая вода. Для масляных холодильников конструкции ЦКТИ соответствует кривая 2 [3], число Нуссельта при этом рассчитывалось по формуле: $Nu = 0.635 * Re^{0.4} * Pr^{0.3}$ Для судовых охладителей масла соответствует кривая 3 [2] кривые 4 и 5 рассчитывались по формуле [4]: $Nu = 0.27 * Re^{0.54} * Pr^{0.4}$. Таким образом, применение данного вида оребрения позволит в 1,2-1,4 раза интенсифицировать процесс охлаждения вязкой жидкости по сравнению с гладкотрубными маслоохладителями.

Список литературы

1. Расчет и проектирование теплообменников вязкой жидкости с поверхностью из продольно-оребранных труб, РТМ 108.030.115-77/ -М.: НПО ЦКТИ, 1977г., - 36 с.
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах.-М.: Машиностроение, 1981.–205 с.
3. Пермяков В. А., Левин Е.С., Дивова Г.И. Теплообменники вязких жидкостей, применяемые на электростанциях, Л., Энергоатомиздат, 1983г. -176 с.
4. Баев С.Ф. Судовые компактные теплообменные аппараты, - Л.;Судостроение, 1965, - 240 с.

*Аксянов Р.А., Коханова Ю.С., Куимов Е.С., Лэй Р.А., Попов И.А.
Скрыпник А.Н.*

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н.Туполева-КАИ,
420111, Россия, Казань, К. Маркса 10

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ТЕПЛООТДАЧИ НА МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИ КИПЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ,

Методы и способы интенсификации теплообмена при кипении традиционны [1] - воздействие на внутренние механизмы процесса и увеличение теплообменной поверхности. В настоящее время большинство работ по исследованию интенсификации процессов кипения лишь демонстрируют эффекты без детального описания исследуемого процесса для разных теплоносителей и условий проведения опытов. В работе, по имеющимся в литературных источниках экспериментальным данным по теплоотдаче при кипении различных жидкостей на микроструктурированных поверхностях, изготовленных методом деформированного резания, получены рекомендации по прогнозированию коэффициентов теплоотдачи.

Геометрические параметры поверхностей кипения приведены на рис.1. Материал поверхностей – нержавеющая сталь, медь, титан. Толщина поверхностей – 0,2-0,3 мм.

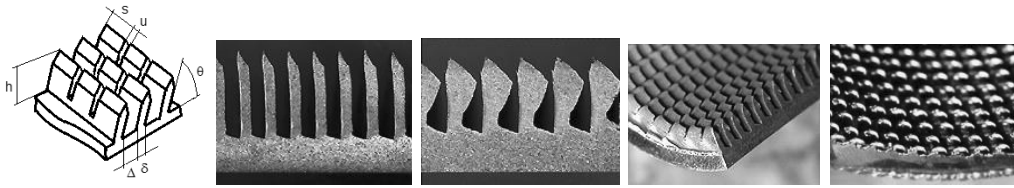


Рис.1. Геометрические параметры микроструктуры поверхности кипения

Обобщение производилось с использованием метода полиномиальной регрессии по модели:

$$\alpha/\alpha_0 = f_2 (K_q, (\theta/90), (h/l_0), (\Delta/l_0), (\delta/l_0), (u/l_0), (s/l_0))$$

где α – коэффициент теплоотдачи на микроструктурированной поверхности, α_0 – коэффициент теплоотдачи на гладкой поверхности, K_q – безразмерный критерий – масштаб осредненной скорости движения жидкости, обусловленной процессом парообразования $K_q = q \cdot l_0 / (r \cdot \rho'' \cdot v')$, l_0 – постоянная Лапласа $l_0 = \sqrt{\sigma / (g \cdot (\rho' - \rho''))}$, пропорциональная отрывному диаметру пузырька. В качестве нормирующего коэффициента теплоотдачи в данной работе рекомендуется принимать зависимость В.М.Боришанского.

В ходе обобщения более 730 экспериментальных точек [2-12] получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении воды, этанола, 60% водного раствора глицерина, фреонов R113 и R123, хладона Noves 649 в большом объеме на поверхностях кипения с двухмерным рельефом (микроресбра):

$$\alpha/\alpha_0 = 6 K_q^{-0,2} (\theta/90)^{0,554} (h/l_0)^{0,19} (\Delta/l_0)^{0,2} (\delta/l_0)^{-0,394}. \quad (1)$$

Зависимость (1) описывает экспериментальные точки с отклонением $\pm 30\%$ при доверительной вероятности 0,95. Зависимость (1) справедлива в диапазоне $q=3800-2,17 \cdot 10^6$ Вт/м², $K_q=5-11500$, $\theta/90=0,72-1$, $h/l_0=0,09-1,45$, $\Delta/l_0=0,002-1,29$, $\delta/l_0=0,01-1$, $Pr=1,75-35,7$, $F/F_0=1,66-9,75$.

В ходе обобщения более 500 экспериментальных точек [2-12] получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении воды, этанола, 60% водного раствора глицерина, фреонов R11, R113, R123, R134a в большом объеме на поверхностях кипения с трехмерным рельефом (микроштырьковые структуры):

$$\alpha/\alpha_0 = 3,2 K_q^{-0,2} (\theta/90)^{-1,64} (h/l_0)^{0,395} (\Delta/l_0)^{0,08} (\delta/l_0)^{0,18} (u/l_0)^{-0,47} (s/l_0)^{-0,47} \quad (2)$$

Зависимость (2) описывает экспериментальные точки с отклонением $\pm 30\%$ при доверительной вероятности 0,85. Зависимость (2) справедлива в диапазоне $q=2400-3,5 \cdot 10^6$ Вт/м², $K_q=8,7-22030$, $\theta/90=0,77-1$, $h/l_0=0,09-$

0,71, $\Delta/l_0=0,002-0,3$, $\delta/l_0=0,042-0,42$, $u/l_0=0,009-0,28$, $s/l_0=0,02-0,79$, $Pr=1,75-7,35$, $F/F_0=2,23-4,8$.

Научные исследования проводились при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по выполнению обязательств по Соглашению 075-03-2020-051-3 от 09.06.2020.

*Алексеев С.А.¹, Аметистов Е.В.², Дмитриев А.С.³, Михайлов В.В.²,
Михайлова И.А.³, Цыпулев Ю.В.²*

¹) Graphene Star, NETPark Incubator, Thomas Wright Way, TS21 3FD, UK,

²) ООО «Институт графена», Москва,
111250, Красноказарменная ул., 13П,

³) Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,
111250, Красноказарменная, 14
asdmiriev@mail.ru

РАЗРАБОТКА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ГРАФЕНОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ: ТЕХНОЛОГИИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Разработка высокоэффективных нагревателей для промышленных и бытовых целей остается одной из важнейших задач перспективных технологий на базе наноматериалов и наноконструкций [1]. Особую роль играют специализированные системы нагрева – антиобледенительные (для предотвращения роста льда на энергетическом оборудовании – высоковольтные линии электропередач, лопасти ветровых турбин), лопастях и крыльях в авиации, обледенение транспортных систем и т.д. Все подобные системы требуют малого веса, высокой эффективности и высокой скорости нагрева и т.п.

Нами разработаны и реализованы новые нагревательные элементы на основе полимерных композиций и графеновых хлопьев. Графеновые хлопья, полученные по технологии ультразвукового и кавитационного расщепления графита в дистиллированной воде имели толщину около 3 нм и латеральные размеры от 15 до 40 мкм (рис.1, слева) [2]. Была также разработана технология смешивания полимеров и акриловых красок с графеновыми хлопьями различной концентрации, а также проведено тестирование полученных наноматериалов, что позволило установить оптимальные соотношения для электропроводности и теплопроводности указанных наноконструкций. Проведенные эксперименты по нанесению указанных композиций на различные поверхности (керамика, металл, стекло, бумага и т.д.) позволило разработать несколько классов нагревательных элементов, в том числе, гибкие. В качестве примера, на рис.1 представлены инфракрасные изображения нагретых графеновых гибких подложек до 47 °С (в центре) и графеновых акриловых композиций

на керамике до 63 °С (справа). Измерения и расчеты эффективности нагрева показали, что полученные материалы для нагревателей более чем на 60% эффективнее имеющихся на сегодня тепловых конверторов, примерно на 30-35% эффективней систем инфракрасного нагрева и примерно на 40% эффективнее пленочных систем «теплый пол». При этом энергопотребление при температуре нагревательных панелей из графеновых нанокомпозитов в диапазоне температур 46-63 °С в 2-3,5 раза ниже, чем у традиционных нагревателей с джоулевым нагревом. Такие уникальные свойства графеновые нанокомпозиты имеют из-за высокой электропроводности (при этом, электросопротивление является сильной функцией температуры, поэтому нагрев подобных композитов имеет положительную обратную связь – степень нагрева падает с ростом температуры, что делает подобные системы чрезвычайно безопасными). Наконец, особо следует подчеркнуть, что рабочие напряжения и токи весьма малы: рабочие напряжения могут лежать в диапазоне 12-48 В (что делает возможным использование таких нагревателей для одежды специального назначения)

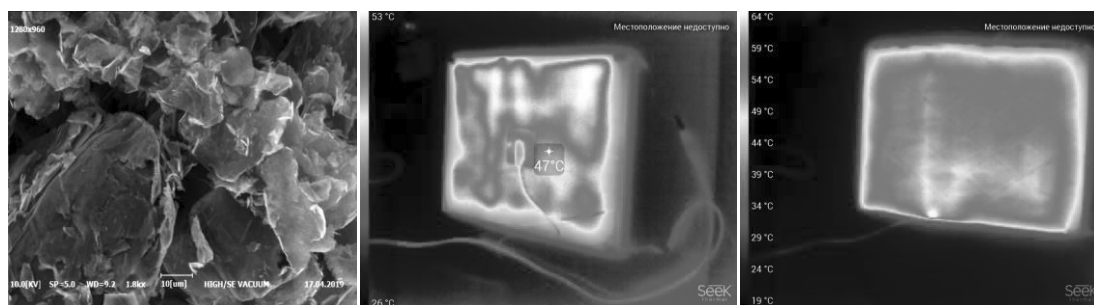


Рис.1. Сканирующая электронная микроскопия графеновых хлопьев (слева), инфракрасные изображения нагретых графеновых гибких подложек до 47 °С (в центре) и графеновых акриловых композитов на керамике до 63 °С (справа)

Список литературы

1. **A. S. Dmitriev.** Hybrid Graphene Nanocomposites: Thermal Interface Materials and Functional Energy Materials. In: Graphene Production and Application// Ed. Prof. Sadia Ameen. 2019. InTechOpen
2. **S A Alekseev, A S Dmitriev, P G Makarov and I A Mikhailova.** Functional energy nanocomposites surfaces based on mesoscopic microspheres, polymers and graphene flakes. Journal of Physics: Conf. Series. 891. 012361. 2017.

*Алексеев С.В.*¹, *Ануфриев И.С.*^{1,2}, *Копьев Е.П.*¹, *Шарыпов О.В.*¹
¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН),
Новосибирск, 630090, пр-т ак. Лаврентьева, 1
² Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),
Новосибирск, 630073, пр-т К. Маркса 20
kopyeve@itp.nsc.ru

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРИСУТСТВИИ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

Сырая нефть является привлекательным топливом для производства энергии, поскольку не требует дополнительных затрат на переработку. Тепловые станции на сырой нефти могут располагаться в непосредственной близости к месторождению, что также экономит расходы на транспортировку топлива. Актуальной проблемой также является утилизация жидких углеводородов, извлекаемых во время испытаний новых скважин. Однако сжигание сырой нефти должно удовлетворять ряду требований, которые в основном включают высокую полноту сгорания, низкое количество вредных выбросов и твердых отложений. Существующие технологии не всегда обеспечивают достижение требуемых энергетических и экологических показателей при использовании сырой нефти по причине неустойчивого воспламенения и горения в топочной камере, быстрого коксования поверхностей горелок и др. Это связано с особенностями нефти: многофракционность, содержание механических примесей и воды, значительное количество сернистых соединений и азотосодержащих продуктов, тяжелые остатки, которые при горении образуют продукты сгорания с большим содержанием сажи.

Настоящая работа посвящена исследованию горения сырой нефти в струе перегретого водяного пара, как одного из перспективных способов повышения энергоэффективности и улучшения экологических показателей технологий сжигания жидких углеводородов [1,2]. В данной работе изучается влияние параметров подаваемого перегретого водяного пара на характеристики горения нефти. Проведены экспериментальные исследования удельного тепловыделения и состава продуктов сгорания на оригинальном горелочном устройстве, в котором распыление жидкого топлива происходит в результате взаимодействия с высокоскоростным потоком перегретого водяного пара. Такой способ распыления позволяет создать высокодисперсный двухфазный поток и предотвращает засорение форсунок при использовании некондиционного топлива и отходов. Паровая газификация продуктов термического разложения топлива обеспечивает высокую полноту сгорания. Для эффективного сжигания тяжелых топлив в модернизированном горелочном устройстве установлен

блок дожигания, увеличивающий степень циркуляции потока. Применение стадийного сжигания повышает устойчивость горения сырой нефти и выгорание топлива. Найдены режимы сжигания сырой нефти в модернизированной горелке, обеспечивающие высокую полноту сгорания топлива при низком содержании оксидов азота и монооксида углерода в продуктах сгорания. Количество этих токсичных компонентов соответствует 1 классу EN 267. Полученные результаты подтверждают эффективность исследуемого способа распыления топлива струей перегретого пара для сжигания сырой нефти, в том числе в горелочных устройствах малой мощности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10134).

Список литературы

1. Способ бессажного сжигания топлива. Патент РФ 2219435 / Вигриянов М.С., Саломатов В.В., Алексеенко С.В.; ИТ СО РАН; зарегистрирован 20.12.2003, приоритет от 11.02.2002.
2. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev // Fuel Processing Technology. 2014. V. 192. P. 154-169.

Амосова Е.В.^{1,3}, Шишкин А.В.^{2,3}

¹ Институт прикладной математики ДВО РАН
690041 Владивосток, Радио 7

² Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041 Владивосток, Радио 5

³ Дальневосточный федеральный университет
690091 Владивосток, Суханова 8
12abcd21@mail.ru, el_amosova@mail.ru

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ РАСПЕРЕДЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТВЭЛЕ С УЧЕТОМ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ТОПЛИВНОЙ ТАБЛЕТКИ И ПЕРЕМЕННЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Рассматривается тепловыделяющая сборка с бесконечным числом ТВЭЛов[1,2], стержни расположены в узлах сетки состоящей из правильных треугольников. Неравномерность энерговыделения в конструкции ТВЭЛа формирует неравномерность температурных полей в материале. Между топливной таблеткой и защитной оболочкой имеется малый зазор, заполненный газом[3]. Наличие газового зазора обеспечивает разгрузку оболочки от механического воздействия со стороны топливных таблеток. В случае если топливные таблетки расположены не концентрически по отношению к защитной оболочке,

возникающее тепловое сопротивление вокруг стержня оказывает неравномерное влияние на распределение температуры и теплового потока в топливе и оболочке. В работе [4] изучен вопрос влияния эксцентриситета расположения топливной таблетки без учета температурно-зависимых свойств материалов.

В данной работе изучается тепловой процесс, происходящий только в энерговыделяющей системе (стержень, зазор, оболочка).

Проблема теплопередачи между оболочкой и теплоносителем не рассматривается.

Тепловыделяющая система может состоять из неограниченного числа защитных элементов. В оболочке имеется эксцентриситет расположения топливной таблетки, что приводит к азимутальному изменению размера зазора между внешней поверхностью топливной таблетки и внутренней поверхностью защитной оболочки. Для описания процессов теплообмена в канале ядерного реактора используется модель течения гомогенной среды. Распределение плотности нейтронного потока в такой среде описывается уравнением диффузии. Теплопроводность и теплоемкость материалов определяются заданной зависимостью от температурного поля. Использование температурно-зависимых свойств делает задачу нелинейной и исключает возможность нахождения аналитического решения.

Список литературы

1. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С. и др. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 1. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
2. Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А., Кудрявцев О.В., Надинский Ю.Н., Нечаев А.Т., Скибин А.П. Разномасштабные задачи теплообмена в атомной энергетике // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6, № 4. С. 60–73. DOI: 10.14529/cmse170405.
3. J.B. Ainscough, Gap Conductance In Zircaloy-clad LWR Fuel Rods, CSNI Report No. 72, april 1982, 52pp.
4. Gaspar Jr., J. C. A., Temperature Distribution on Fuel Rods: A Study on the Effect of Eccentricity in the Position of UO₂ Pellets, Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Bovec, Slovenia, Sept. 12-15, 2011, 814.2- 814.11.

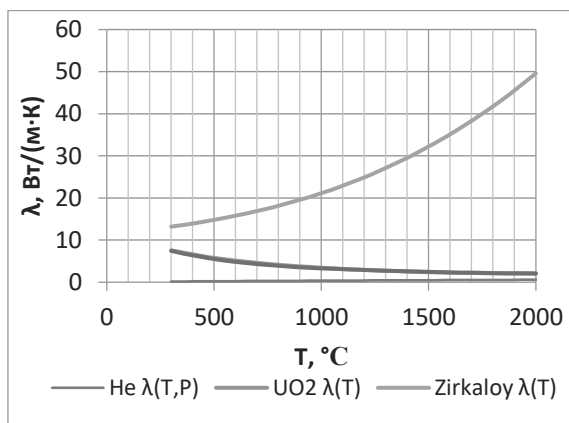


Рис. 1. Зависимость теплопроводности материалов от температуры.

Антонов Д.В., Стрижак П.А, Федоренко Р.М.
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
Томск, 634050, проспект Ленина, дом 30
antonovdv132@gmail.com

МЕХАНИЗМЫ РАСПАДА НЕОДНОРОДНЫХ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ

Процессы микро-взрывной частичной и полной фрагментации капель жидкостей, суспензий, растворов и эмульсий при нагревании способствуют существенному повышению эффективности большой группы перспективных технологий, в частности, в области: создания теплоносителей нового поколения из дымовых газов, паров и капель воды; огневой и термической очистки жидкостей от нерегламентированных примесей; экологичного и эффективного сжигания топлив, в том числе приготовленных из многочисленных промышленных отходов с добавлением технологических и сточных вод. В настоящей работе приведены результаты исследования закономерностей микро-взрывной фрагментации в виде частичного и полного разрушения двухжидкостных капель, состоящих из негорючего (вода) и горючего (масло) компонентов. Изучались последствия интенсивного конвективного теплообмена капли с потоком разогретого воздуха. Для контроля температурного поля капли применялся оптический метод Planar Laser Induced Fluorescence, а скоростей внутренней термогравитационной конвекции в капле – Micro Particle Image Velocimetry. Основное внимание уделено изучению структуры конвективных течений, центрам образования вихрей, скоростям, влиянию на температуру в разных сечениях капли (особенно у межкомпонентной границы, разрушение которой и приводит к микро-взрывному распаду капли). С применением трассирующих частиц и красителя (флуорофора) выполнялся одновременный контроль скорости термогравитационной конвекции в частях капли, представляющих горючий и негорючий компоненты. Установлены скорости и температуры вблизи межкомпонентной границы, достаточные для микро-взрывного распада интенсивно нагреваемой двухжидкостной капли. С использованием полученных экспериментальных данных развиты представления о механизме и основных стадиях разрушения межкомпонентных границ в нагреваемых неоднородных каплях.

Артемов В.И., Макаров М.В., Яньков Г.Г., Минко К.Б.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
makarovmv2000@yandex.ru

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ СОПРЯЖЕННОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ БОЛЬШИХ ВИХРЕЙ

В данной работе основное внимание уделено верификации «сопряженной» версии метода моделирования больших вихрей (LES) и анализу пульсаций температуры в пристеночной области и стенке при турбулентном течении различных теплоносителей в трубе. Задача решалась для стабилизированного течения с периодическими граничными условиями на входе и выходе трубы с использованием авторского CFD кода ANES [1].

Расчеты проводились методом контрольного объема с использованием неструктурированных сеток и схем второго порядка точности во времени и пространстве. Количество ячеек сетки составило 1,85 млн для варианта без учета стенки и 2,58 млн для варианта с учетом стенки (10 ячеек по толщине стенки).

Для вычисления подсеточных напряжений использовалась модель KDEs [2], включающая уравнение переноса для подсеточной турбулентной энергии и сопряжение с двуслойной k - ε моделью турбулентности вблизи твердой стенки.

Результаты получены для воды ($Pr = 6,2$, $Re = 7500$) и ртути ($Pr = 0,025$, $Re = 7000$) для турбулентных течений в горизонтальных обогреваемых трубах, а также для подъемного течения воздуха ($Pr = 0,71$, $Re = 5300$) в вертикальной обогреваемой трубе с различным уровнем влияния термогравитационной конвекции ($Bo = 0,13$; $0,18$).

Результаты расчетов обеспечивают хорошее воспроизведение имеющихся экспериментальных данных и данных прямого численного моделирования турбулентности (DNS) по температурным пульсациям вблизи стенки трубы и правильно отражают влияние безразмерных параметров (числа Прандтля, толщины стенки, тепловой активности материала стенки и теплоносителя) на пульсации температуры в самой стенке. «Сопряженную» модель LES планируется использовать для анализа пульсаций температуры жидкости и стенки канала при МГД-течениях в условиях влияния термогравитационной конвекции.

Предложена приближенная модель реальных граничных условий, позволяющая заменить заданную плотность теплового потока на внешней поверхности стенки или заданное объемное тепловыделение нестационарными граничными условиями на внутренней поверхности

стенки. Расчеты, выполненные с использованием приближенной модели, показали вполне удовлетворительное воспроизведение флуктуаций температуры на внутренней поверхности стенки однородно обогреваемой трубы. Модель может быть использована в качестве более реалистичных граничных условий для расчетов турбулентных течений в трубах методом DNS, традиционно выполняемых в несопряженной постановке.

Список литературы

1. Код ANES [Электронный ресурс]. URL: <http://anes.ch12655.tnweb.ru/> (дата обращения: 10.04.2020).
2. **Артемов В.И.,** Макаров М.В., Яньков Г.Г., Минко К.Б. Использование гибридной LES/RANS-модели турбулентности для исследования процессов теплообмена при течении жидкости с переменными свойствами в трубах // Труды 7-й Российской национальной конференции по теплообмену, М.: Издательский дом МЭИ, 2018, т. 1, с. 137 - 142.

Артемов В.И., Кудимкин И.С., Яньков Г.Г.

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
kudimkin11@gmail.com

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛООТДАЧИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПОДЪЕМНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОБОГРЕВАЕМОЙ ТРУБЕ

Возросший в начале текущего столетия интерес к теплообмену при сверхкритических давлениях (СКД) теплоносителя во многом обусловлен проектами ядерных реакторов IV поколения на «легкой» воде СКД. Несмотря на значительное количество в основном экспериментальных и в меньшей степени расчетных работ, выполненных в прошлом столетии, проблема достоверного расчета теплообмена при СКД оказалась далеко не решенной, даже для течений в круглых трубах. Известно, что при достижении некой критической тепловой нагрузки при подъемных течениях в трубах наступает режим «ухудшенной» теплоотдачи, сопровождаемый резким возрастанием температуры стенки трубы (пиком T_c) в некотором сечении (сечениях) по аксиальной координате. К сожалению, в настоящее время ни одна модель из классов моделей для турбулентной вязкости или моделей для вторых моментов не может быть с уверенностью рекомендована для расчетов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в трубах при любых режимах течения жидкостей СКД, включая и ухудшенные. Наиболее надежные

эмпирические формулы для числа Нуссельта, модифицированные В.А. Кургановым с учетом новых данных о теплофизических свойствах [1], справедливы лишь для «нормальных» режимов теплоотдачи, границы которых достоверно не определяются. В сложившейся ситуации новые знания об особенностях течения и теплообмена можно получить либо экспериментально, либо численно, используя вихреразрешающие методы: прямое численное моделирование (DNS) турбулентности, моделирование крупных вихрей (LES).

В данной работе методом LES анализируются структура течения, статистические характеристики турбулентности, поля осредненных скорости и температуры, коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления для одного из ухудшенных режимов при течении диоксида углерода СКД, рассчитанных Вае et al. [2] методом DNS. Расчеты выполнены с использованием CFD кода ANES [3]. Обсуждаются причины некоторого рассогласования по температуре стенки с данными [2], закономерности формирования М-образного профиля осредненной аксиальной скорости, особенности порождения кинетической энергии турбулентных пульсаций за счет деформации осредненного поля скорости и сил плавучести. Показано, что возврат к нормальному режиму теплообмена после достижения температурой стенки локального пика обусловлен исключительно действием сил плавучести.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №17-08-01007-а.

Список литературы

1. **В.А. Курганов, Ю.А. Зейгарник, Г.Г. Яньков, И В. Маслакова.** Теплообмен и сопротивление в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя: итоги научных исследований и практические рекомендации / Под редакцией Ю.А. Зейгарника. - М.: Издательство ООО «Печатный салон «Шанс», 2018.- 304 с.
2. **J. H. Waе, J. Y. Yoo, H. Cho.** Direct numerical simulation of turbulent supercritical flows with heat transfer // *Physics of Fluids*, v. 17, 105104 (2005); doi: 10.1063/1.2047588.
3. <http://anes.ch12655.tmweb.ru> - официальный сайт CFD-кода ANES.

Асланов А.Р., Краев В.М.
Национальный исследовательский университет «МАИ»,
125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4
kraevvm@mail.ru

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Криогенное топливо в авиации имеет ряд особенностей по сравнению с авиационным керосином. Криогенное топливо, имеет большой хладоресурс и работоспособность до его сжигания, а также большую теплоту сгорания чем у керосина. Наиболее перспективным криогенным топливом является сжиженный природный газ (далее - СПГ), состоящий в основном из метана.

Криогенная топливная система (КТС) состоит из криогенного топливного бака, подкачивающего насоса, турбонасосного агрегата и теплообменного аппарата (ТА) газификатора.

Для проведения расчетно-теоретических исследований разработана математическая модель криогенной топливной системы. Основными параметрами являются: давление, температура, объемный расход, гидравлические потери, а также рассчитывается масса каждого элемента.

Переходные режимы полета, например, руление-взлет, делятся от нескольких долей секунд до нескольких секунд. Такие режимы с точки зрения тепловых и гидродинамических процессов являются существенно нестационарными. Применение т.н. квазистационарного подхода, когда коэффициент теплоотдачи и гидродинамического сопротивления рассчитываются по мгновенным параметрам, может привести к ошибке в расчетах более 100% [1]. Эксперименты показывают, что при смене режима работы двигателя, т.е. массового расхода жидкого топлива, могут возникать кратковременные скачки по теплоотдаче и гидравлическим сопротивлениям из-за изменения турбулентной структуры течения [2].

В процессе формирования облика КТС геометрические размеры элементов топливной системы, масса топливной системы, потери криогенного топлива и т.п. с контролем обеспечения работоспособности всех элементов топливной системы и двигателя должны определяться с учетом нестационарных процессов.

В работе получены результаты, показывающие существенный рост коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в момент вывода двигателя на взлетный режим. Причиной такого изменения является перестройка структуры турбулентного течения в гидродинамически нестационарных условиях [2]. Коэффициент теплоотдачи может превышать значения, рассчитанные по стационарным зависимостям более 2-х раз, а коэффициент гидравлического сопротивления - более 3-х раз. Указанное отличие приводит к

существенным нарушениям работы всей криогенной топливной системы, и может привести к отказам в работе.

Результаты расчетов показывают границы применимости квазистационарного подхода в зависимости от времени срабатывания топливной арматуры и диаметра топливных магистралей. В качестве решения авторы предлагают при нестационарных процессах в криогенных системах авиационных двигателях продолжительностью менее 5 секунд применять трубопроводы наименьшего диаметра и/или увеличивать мощность подкачивающих насосов.

Список литературы

1. Краев В.М., Мякочин А.С. Анализ структуры гидродинамически нестационарного турбулентного течения в каналах энергоустановок летательных аппаратов. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 2. С. 75-81.
2. Kraev V.M, Myakochin A.S. The unsteady turbulent flows structure study present status. INCAS Bulletin, Volume 11, Issue 2/ 2019

Бабаходжаев Р.П., Мирзаев Д.А.

Ташкентский государственный технический университет,
Ташкент, 100095, Университетская, 2
rachimjan@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ С ИНТЕНСИФИЦИРОВАННЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Выполнено теоретическое исследование и получены результаты по гидродинамике интенсифицирующего кипящего слоя (ИКС) с целью повышения энергоэффективности работы топочного агрегата. В качестве ИКС рассматривается взвешенный слой газозвеси, где используются принципы классических фонтанирующего и кипящего слоев [1-2]. Объектом исследования является многосекционная рабочая камера, разработанная для одновременного проведения комплекса тепловых и физических процессов над моно- и полидисперсными низкосортными твердыми топливами.

Разработана математическая модель процессов гидродинамики ИКС. Основываясь на принципах ИКС, приведенных в работах [1-2], можно написать уравнение движения гетерогенной среды в центральной продольной части секции топочной камеры:

$$C_v \rho_M (\overline{W} \nabla) \overline{W} = \rho_M C_v g + \frac{3}{4} \xi \frac{C_v \rho_G}{d} |\overline{g} - \overline{W}| (\overline{g} - \overline{W}) - \nabla(C_v P) \quad (1)$$

где \bar{W} и \bar{g} - скорость твердой фазы и газа, м/с; ρ_M и ρ_G - плотности угля и газа, кг/м³;

C_V – объёмная концентрация материала в газе; d - диаметр частиц угля, м; ξ – коэффициент лобового сопротивления частицы угля; P – давление газа, Па.

Для решения данного уравнения приняты следующие допущения: 1) движение частиц угля и газа в ядре потока одномерное; 2) сушка и раздробление частиц угля в ядре восходящего потока незначительны.

Полученная математическая модель решена по методу Рунге-Кутты четвертого порядка. Составлен алгоритм расчета на языке Турбо-Паскаль и получены графики изменения скорости газов и твердых частиц в зависимости от высоты рабочей камеры, а также характер изменения скорости газового потока по высоте рабочей камеры в зависимости от угла раскрытия конической части рабочей камеры.

Определены следующие особенности гидродинамики топочной камеры с ИКС:

- скорость газовой фазы в начале имеет максимум и по мере продвижения потока вверх значительно снижается с учетом конусности нижней части рабочей камеры;

- скорость твердой фазы по высоте рабочей камеры монотонно возрастает по отношению к начальной скорости;

- увеличение угла раскрытия конической части рабочей камеры приводит к уменьшению скорости газозвеси за счет увеличения свободного пространства вокруг ствола фонтанирующего слоя.

Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании современных топочных устройств для сжигания низкосортных углей.

Список литературы

1. **Babahodzhaev R.** Intensified fluidized bed burning of the angren brown coal containing an increased amount of ash. N. Syred and A. Khalatov (eds.), Advanced Combustion and Aerothermal Technologies, 2007. Springer. P.65-72.

2. **Бабаходжаев Р.П., Мухиддинов Д.Н., Каримов А.А. и др.** Установка для сжигания твердых топлив или тепловой обработки полидисперсных материалов. № IAP 04840. Патент на изобретение Республики Узбекистан. Бюлл., 2014. № 3. С.49.

Бабаходжаев Р.П., Ташбаев Н.Т., Эшкуватов Л.М.
Ташкентский государственный технический университет,
Ташкент, 100095, Университетская, 2
rachimjan@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИДЕИ ВИБРАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ТУРБУЛИЗАТОРОВ В ТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ ЗА СЧЕТ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ

В работе рассмотрена идея турбулизации потока жидкости в рекуперативных теплообменниках с применением локальных турбулизаторов (ЛТ). Идея заключается в том, что так называемые ЛТ состоят из упругой нити и нанизанных на нее через определенное расстояние объемных элементов с определенными геометрическими конфигурациями. ЛТ устанавливается в трубки (каналы) теплообменного аппарата таким образом, что один конец нити крепится на входе, а другой конец оставляется свободным. Объемные элементы ЛТ изготавливаются из специального материала. При работе теплообменного аппарата, поток жидкости омывает поверхность объемных элементов и его кинетическая энергия совместно с силами упругости нити приводит их в возвратно-поступательное движение вдоль продольной, и колебательное движение по радиальной оси, что создает вибрацию ЛТ.

Для численного исследования рассматриваемого процесса составлена компьютерная модель в программной среде *Comsol Multiphysics*. Выбор данного программ-продукта основывается на простоте использования, относительно высокой точности эксперимента и широкой возможности применения в научных исследованиях по данному направлению. Создана модель эксперимента. В расчете были приняты условия несжимаемой жидкости и непроницаемости стенки. Модель турбулентного теплопереноса в жидкости включает уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса), неразрывности (закон сохранения массы жидкости), диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы).

При проведении численных экспериментов были исследованы 4 разные геометрические конструкции объемного элемента ЛТ в виде куба, параллелепипеда, шара и овала. В расчетах диаметр и длина трубок составляли 20 мм и 1100 мм соответственно. Получены поля давлений, скоростей и температур для потока жидкости в трубках с ЛТ и без них при одинаковых условиях эксперимента.

Обобщенные результаты исследования показывают, что самое наименьшее значение потерь напора имеет трубка, свободная от ЛТ, а трубки с ЛТ в виде куба и параллелепипеда эти потери имеют относительно высокие значения. Изменение эквивалентных диаметров

объемных элементов на меньшее или большее значение дают примерно такие же характерные результаты. Скорость потока жидкости в пристеночной области более чем в 2...2,5 раза больше чем в свободной от ЛТ трубке, при этом зона турбулизации получается относительно вытянутой, особенно при объемных элементах в виде куба и параллелепипеда.

При условии нагрева трубок с наружной стороны, ЛТ с объемными элементами в виде куба и параллелепипеда позволяют получить относительно высокое значение температурного напора по сравнению с другими конструкциями.

Частота вибрации объемных элементов зависит от степени упругости нити, их удельного веса и внешней конфигурации, а также от расхода и напора потока жидкости. ЛТ турбулизуют поток воды и этим активизируют гидродинамику процесса, особенно в пристеночной зоне течения жидкости. Турбулизуемые зоны будут перемещаться в ограниченном пространстве внутри трубок с соответствующей частотой, равной частоте вибрации ЛТ.

Снижение загрязнения на поверхностях теплообмена также является актуальной проблемой. Предварительные результаты исследования показывают, что имеется возможность применения предлагаемых вибрируемых ЛТ для снижения темпа образования загрязнения на теплообменных поверхностях.

Таким образом, рациональные значения гидравлического сопротивления ЛТ и коэффициента теплоотдачи определяются в зависимости от геометрической конфигурации и эквивалентного диаметра объемного элемента, а также от расстояния между соседними турбулизаторами.

Багаев Д.В., Кудинович И.В., Сыралёва М.Н.,
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе д.44
syraleva_masha@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ БОРЬБЫ С ВНУТРЕННИМ ОБЛЕДЕНЕНИЕМ СУДОВЫХ ЦИСТЕРН

Для предотвращения внутреннего обледенения арктические суда в соответствии с требованиями Российского Морского Регистра Судоходства должны быть оборудованы системами подогрева жидкостей в судовых цистернах, соприкасающихся с наружной обшивкой. Образование льда в верхней части балластных цистерн, находящиеся выше ватерлинии, вызывает проблемы в работе балластной системы, что может привести к нарушению остойчивости судна.

При проектировании арктических судов актуальной задачей является выбор оптимального способа борьбы с внутренним обледенением балластных цистерн. Для предотвращения избыточного ледообразования в балластной цистерне применяются разные методы, основными из которых являются: подогрев воды и интенсификация циркуляции воды внутри цистерны (воздушный и паровой барботаж, вынужденная циркуляция воды).

Первый способ связан с использованием систем подогрева воды в цистерне, что обеспечивает температурный режим, при котором толщина льда на внутренней поверхности цистерны находится в допустимых пределах.

Второй способ обеспечивает интенсивный конвективный теплоподвод к поверхности льда за счет омывания водой находящейся ниже ватерлинии температура, которой незначительно превышает температуру ледообразования (замерзания) морской воды.

В представленной работе выполнен сравнительный анализ энергоэффективности следующих систем борьбы с внутренним обледенением судовых цистерн: система рекуперативного теплообмена, система воздушного барботажа, система с вынужденной циркуляцией воды. В качестве критерия энергоэффективности принимается отношение полного теплового потока на поверхности льда, обеспечивающего заданную толщину льда, к затрачиваемой мощности на работу системы.

*Базюк С.С., Галев И.Э., Дьяков Е.К., Нужин В.Н., Солдаткин Д.М.,
Солнцев В.А., Тухватулин Ш.Т.*

Научно-исследовательский институт Научно-производственное
объединение «ЛУЧ»,
Подольск, 142103, Железнодорожная, 22
bazukss@sialuch.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ ТОПЛИВА И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТЕРЖНЕВОГО БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТВЭЛА

К твэлам исследовательских реакторов и необслуживаемых реакторных установок малой мощности предъявляются требованиями значительной автономности, пониженных габаритных размеров при высокой интенсивности работы [1-3]. Автономность РУ может быть удовлетворена за счет значительной загрузки топлива в виде композиций урана различного состава. Малые габаритные размеры и закрутка твэла вокруг главной продольной оси позволяют обеспечить дистанционирование твэлов в тепловыделяющей сборке и увеличить теплоотвод к

теплоносителю при повышенном объемном энерговыделении за счет перемешивания потока.

В настоящей работе проведен термомеханический анализ профиля поперечного сечения биметаллического твэла с учетом принципа максимизации загрузки ядерного топлива. В качестве базового ограничения принималось условие, при котором радиус описанной окружности лопасти, образуемой при вращении вокруг продольной оси, оставался неизменным. Рассматривались следующие формы поперечных сечений: лопасть со сглаженными углами, трехлучевой «клевер», выпуклый треугольник и крест (рис. 1). Рассматривались топливный сердечник из металлического урана и циркониевого или ниобиевого сплавов Э110 и НБЦ-1 соответственно, а также оболочка из одноименных материалов.

Расчеты термомеханического состояния твэла на номинальном режиме работы и в нестационарных условиях (маневрировании) выполнялись в двумерной постановке с использованием пакета программ Ansys v.16, реализующим вычисления методом конечных элементов. Учитывались зависимости теплофизических свойств материалов от температуры.

Полученные результаты будут использованы для обоснования оптимальной конструкции наиболее ураноемкого твэла, а также в качестве референтного состояния при разработке нового твэла, состоящего из двух различных материалов.

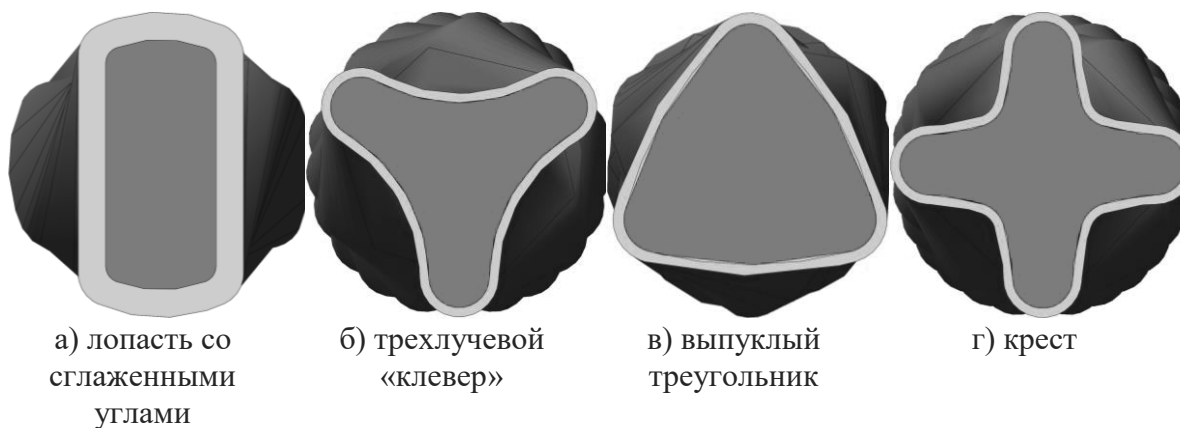


Рис. 1 - Формы поперечных сечений биметаллических твэлов

Список литературы

1. Handbook of Small Modular Nuclear Reactors. Edited by M.D. Carelli, D.T. Ingersoll. Woodhead Publishing, 2014, p.536. doi.org/10.1016/C2013-0-16379-9.
2. **Фрост Б.** Твэлы ядерных реакторов. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 248 с.
3. **С. Алексеев, В. Зайцев, С. Толстухов.** Дисперсионное ядерное топливо. Москва: Техносфера, 2015 – 248 с.

Базюк С.С., Галев И.Э., Кузма-Кичта Ю.А., Нужин В.Н.,

Солдаткин Д.М., Тухватулин Ш.Т.

Научно-исследовательский институт Научно-производственное
объединение «ЛУЧ»,
Подольск, 142103, Железнодорожная, 22
bazukss@sialuch.ru

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ ТВС РУ ВВЭР С ПЕРСПЕКТИВНЫМИ ТОЛЕРАНТНЫМИ ТВЭЛАМИ

Обеспечение безопасности ядерных технологий является неременным условием развития мировой атомной отрасли. Штатные UO_2-Zr ТВЭЛы в условиях максимальной проектной (МПА) и запроектной (ЗПА) аварии с потерей теплоносителя легководных реакторов подвержены интенсивной экзотермической реакции с водяным паром начиная при температуре выше 800-850 °С.

Пароциркониевая реакция самоподдерживается и превышает по интенсивности остаточное тепловыделение уже при 1200 °С [1]. В настоящее время в мире активно ведутся разработки более инертного в условиях аварии толерантного топлива, а также активных зон мобильных реакторных установок (РУ) малой мощности, более инертных к высокотемпературным парометаллическим реакциям. При этом единой концепции по выбору материалов топлива и оболочки не существует. Расчетное прогнозирование характеристик ТВЭЛов на

номинальных и маневренных режимах, а также в случае МПА и ЗПА представляет большую практическую значимость. Наиболее ответственными с точки зрения безопасности РУ являются теплогидравлические характеристики ТВЭЛов и тепловыделяющих сборок.

В настоящей работе проведено предварительное исследование теплогидравлических характеристик толерантных ТВЭЛов ТВС реактора ВВЭР-1000 в номинальных режимах эксплуатации и при имитации ЗПА. Расчетное моделирование с использованием кода PARAM-TG [2] выполнено на 61 стержневой модели ТВС легководной РУ (рис. 1). Код описывает перенос тепла теплопроводностью в твердых телах, жидкостях и газах, однофазную конвекцию к теплоносителю и теплообмен излучением в нестационарной осесимметричной постановке. Учитываются физико-химическое взаимодействие материала оболочки ТВЭЛА с водяным паром,

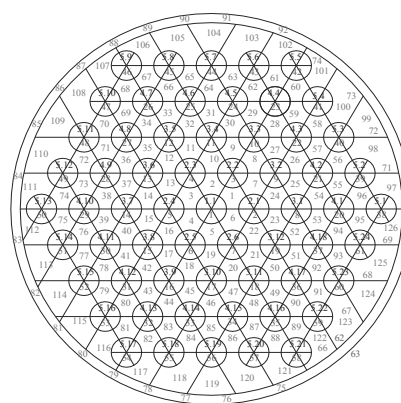


Рис. 1 – Описание ТВЭЛов, теплогидравлических трактов и корпуса модели 61 стержневой ТВС ВВЭР-1000 в одном из сечений

тепловое расширение тел и температурные зависимости теплофизических свойств веществ.

Рассматривались толерантные контейнерные твэлы, идентичные по геометрическим параметрам твэлам ВВЭР-1000, с топливными таблетками из моонитрида (UN), дисилицида (U_3Si_2) и карбонитрида (UZrCN) урана. В качестве материала оболочки использовались сплавы Э110, НБЦ-1, молибден. Также анализировалось поведение цельных биметаллических дисперсионных твэлов из сплавов U-Zr (50 % масс.) и U-Mo (10 % масс.). Данный набор топливных композиций выбран исходя из увеличения загрузки урана и увеличения длительности кампании без перегрузки, совокупности нейтронно-физических (сечение поглощения, энергетический спектр) и теплофизических свойств (коэффициент теплопроводности, изобарная теплоемкость) свойств.

Выполненный анализ показал преимущество биметаллических твэлов по сравнению с другими вариантами толерантных твэлов как на номинальных режимах работы, так и при маневрировании РУ.

Список литературы

1. Базюк С.С., Кузма-Кичта Ю.А., Паршин Н.Я., Попов Е.Б., Солдаткин Д.М. Исследование расхолаживания модельных тепловыделяющих сборок и дебриса легководного реактора при имитации аварии с потерей теплоносителя. Теплофизика высоких температур, т.55, №6, 2017, с. 750-758.
2. Базюк С.С., Кузма-Кичта Ю.А., Паршин Н.Я., Полунин К.К., Попов Е.Б., Солдаткин Д.М. и др. Характеристики высокотемпературного окисления и теплогидравлики толерантных твэлов в условиях ЛОСА. Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2018. № 4 (14). с. 74-89.

Байдаков В.Г., Каверин А.М.
Институт теплофизики УрО РАН,
Екатеринбург, 620016, Амундсена, 107а
baidakov@itp.uran.ru

КИНЕТИКА СПОНТАННОГО ВСКИПАНИЯ РАСТВОРОВ ОЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

В отсутствие готовых и легко активируемых центров парообразования жидкости могут быть значительно перегреты за линию их равновесного сосуществования с паровой фазой. Распад перегретой жидкости начинается с флуктуационного образования и последующего роста парового зародыша. Этот процесс описывается теорией гомогенного зародышеобразования.

В опытах по измерению времени жизни исследована кинетика спонтанного вскипания растворов с полной и частичной растворимостью компонентов. Объектами исследований были растворы криогенных жидкостей (кислород, азот, метан) и криогенные жидкости, насыщенные газами (гелием, водородом). Эксперименты проведены при давлениях от атмосферного до близких к критическому в интервале частот зародышеобразования $J = 10^4 - 10^9 \text{ с}^{-1}\text{м}^{-3}$. Полученные в опыте температуры перегрева T_n растворов с полной взаимной растворимостью компонентов ниже рассчитанных по правилу аддитивности. Отклонения от аддитивных значений достигают 8 К (раствор метан–азот). Насыщение жидкости слабо растворимым в ней газом приводит к снижению T_n и росту величины перегрева $\Delta T = T_n - T_s$, где T_s - температура насыщения при заданном давлении. Растворение 0.1 моль % гелия в метане увеличивает перегрев на 3.1 К.

Для всех исследованных чистых жидкостей и газонасыщенных растворов при $J = 10^7 - 10^9 \text{ с}^{-1}\text{м}^{-3}$ достигнутые перегревы систематически ниже рассчитанных из теории гомогенного зародышеобразования в макроскопическом приближении, то есть без учета зависимости свойств зародышей паровой фазы от их размера. Расхождения по температуре перегрева составляют 0.2 – 1.1 К. Иное соотношение теории и эксперимента наблюдается в растворах с полной взаимной растворимостью компонентов. Для составов, близких к эквимольному, зарегистрированные в опытах перегревы превышают их теоретические значения.

Мы дополнили результаты экспериментальных исследований кинетики зародышеобразования молекулярно-динамическим моделированием. Расчеты проведены в системе леннард-джонсовских частиц с параметрами взаимодействия метана и азота. Как и в натуральных экспериментах, для нахождения частоты зародышеобразования использовался метод определения времени жизни метастабильной жидкости. При трех значениях температуры исследована барическая зависимость частоты J . Во всем диапазоне концентраций и $J = 10^{30} - 10^{35} \text{ с}^{-1}\text{м}^{-3}$ определены предельные растяжения (перегревы) растворов. Для чистых компонентов выявлены систематические «недогревы» до теоретических значений. Растворение азота в метане приводит к уменьшению рассогласования теории и результатов моделирования. Одно и то же количества азота в метане при низкой температуре ($0.65 T_k$, где T_k - температура в критической точке растворителя) оказывает существенно меньшее влияние на перегрев (растяжение), чем при высокой ($0.85 T_k$).

Мы связываем выявленное рассогласование данных натуральных экспериментов, молекулярно-динамического моделирования и теории с размерной зависимостью поверхностного натяжения критических зародышей в чистых жидкостях и растворах. Для оценки зависимости

поверхностного натяжения паровых пузырьков от их размера использована теория капиллярности Ван-дер-Ваальса. Построены единые для жидкости и пара уравнения состояния растворов метан–азот и метан–гелий, описывающие их стабильные и метастабильные области. Записан функционал Ван-дер-Ваальса системы перегретый раствор – паровой зародыш, минимизацией которого получена работа образования критического пузырька. Определены положения разделяющих поверхностей в межфазном слое, поверхностное натяжение как функция размера зародыша, температуры и концентрации раствора. Установлено, что поверхностное натяжение критических пузырьков чистых жидкостей в области спонтанного зародышеобразования систематически на 5 – 7 % ниже, чем на плоской межфазной границе. В растворах с полной растворимостью компонентов при положительных давлениях и составах, близких к эквимолярному, поверхностное натяжение критических пузырьков превышает его макроскопическое значение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00403).

Баринов А.А., Лю Б., Хвесюк В.И., Цяо В.

Московский государственный технический университет имени Н.Э.

Баумана,

Москва, 105005, 2-я Бауманская ул. 5 стр. 1

barinovE6@bmstu.ru

О РЕШЕНИИ ХАРАКТЕРНЫХ ПРОБЛЕМ НАНОТЕПЛОФИЗИКИ

Существует ряд задач, которые характерны для нанотеплофизики, но не представляют интереса в классической теплофизике, изучающей процессы, протекающие в макроскопических объектах. Важно подчеркнуть, что в настоящее время состояние решения этих задач находится на начальной стадии; данная область интенсивно развивается, но существует множество «белых пятен», которые требуют плодотворного анализа. Так в данной работе рассматриваются три актуальные задачи, характерные для твердотельных наноструктур – полупроводников и диэлектриков, в которых перенос тепла осуществляется фононами [1]. Эти материалы представляют особый интерес в связи с разработками средств наноэлектроники.

1) Первая задача – взаимодействие фононов с границами наноструктур. Данная задача является определяющей при расчете теплопереноса в структурах, где свободная длина пробега фононов сопоставима или во много меньше размера образца (то есть в баллистическом и диффузионно-баллистическом режимах переноса тепла). В настоящее время единственным фактором, учитываемым при анализе взаимодействия

фононов с границами, является вероятность зеркального рассеяния p , $0 \leq p \leq 1$, которая характеризует долю фононов, рассеянных зеркально. Для определения p используется выражение [2]: $p(\zeta, \theta) = \exp(-16\pi^2 \zeta^2 \cos^2 \theta)$, учитывающее лишь $\zeta = \sigma_{\text{rms}} / \lambda$ – соотношение между величиной средне квадратичной шероховатости, σ_{rms} , и характерной длиной волны фонона, λ ; θ – угол между нормалью к поверхности и падающим фононом. При этом влияние температуры, особенностей геометрии поверхности, направления распространения теплоты и пр. не учитываются. Более того, параметр зеркального отражения используют в качестве «подгоночного» для достижения хорошего согласия с экспериментальными данными. В связи с этим нами развит численный метод оценки этой величины в зависимости от морфологии рассматриваемого образца и температуры. Принципиальным является многопараметричность рассматриваемой задачи и необходимость детального анализа влияния различных факторов на рассеивание на границе. Проведено сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными. Показано, что формула [2] не соответствует ряду физических закономерностей процессов распространения фононов в баллистическом режиме.

2) Изучение кинетики фононного газа. Процессы взаимодействия фононов друг с другом очень сложны, из-за чего не удаётся пока обеспечить их полный и детальный учёт при моделировании процессов переноса. Существующие модели являются достаточно грубыми []. В связи с этим в рамках относительно простой задачи диффузии фононов удалось учесть практически точно процессы взаимодействия фононов. Это позволяет получить оценки того, насколько точны современные методы расчёта кинетических процессов.

3) Расчёт сопротивлений Капицы. Появление контактного термического сопротивления на границе между двумя твердыми телами оказывает существенное влияние на перенос тепла в многослойных структурах (сверх решётках), т.к. лимитирует передачу тепла между отдельными слоями. Существует несколько методов расчёта сопротивлений Капицы. Среди них наиболее ясным с физической точки зрения является модель акустического несоответствия, впервые сформулированная Халатниковым [3]. Считается, что эта модель применима только для низких температур [4]. Однако в современном варианте модель не является полной – в ней не учитывается дисперсия акустических волн. Нами показано, что учёт дисперсии позволяет получить результаты, хорошо согласующиеся с экспериментами для наноструктур в широком диапазоне температур.

Список литературы

1. Пайерлс Р. Квантовая теория твёрдых тел R&C Dynamics, Москва, Ижевск (2002).

2. Soffer S.B. Statistical Model for the Size Effect in Electrical Conduction // J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 1710.
3. Khvesyuk V.I., Qiao W., Barinov A.A. The effect of phonon diffusion on heat transfer // J. Phys.: Conf. Ser., 2019. Vol. 1385. N. 012046. (7 pp.)
4. Халатников И.М. Теплообмен между твердым телом и гелием-II // ЖЭТФ. 1952. Т. 22(6). С. 687–704.
5. Monachon Ch., Weber L., Dames Ch. Thermal Boundary Conductance: A Materials Science Perspective // Annu. Rev. Mater. Res. 2016. Vol. 46. P. 433–463.

Белавина Е.А.^{1,2}, Беляев И.А.^{1,2}, Пятницкая Н.Ю.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
belavinaea@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ИМИТАТОРОВ РАСПЛАВА СОЛИ В КАНАЛЕ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ ОБОГРЕВЕ

Возможность применения расплавленных солей на основе фторидов в качестве рабочего тела в перспективных разработках ядерно-энергетических систем для новой технологической базы России требует решения нескольких ключевых научно-технических проблем [1]. Эти проблемы связаны с разработкой надежных конструкционных материалов и исследованием теплофизических особенностей теплоносителя. Для решения поставленных задач и дальнейшего численного моделирования вышеупомянутых процессов необходима надёжная экспериментальная информация о пространственном (трёхмерном) распределении скорости и температуры в потоке расплавленной соли. Однако, проведение лабораторного эксперимента непосредственно на жидких солях связано с техническими трудностями. Главная из них – высокие температуры плавления «флайба» (LiF.BeF₂) и «флинака» (LiF.NaF.KF), порядка 450 °С. Очевидно, что рабочие температуры в контуре должны быть существенно выше этого уровня, что не даёт возможности применения большинства датчиков. Работа в этой области ведётся коллективом авторов НИУ МЭИ - ОИВТ РАН [2]. Исследования проводятся путем численного моделирования и экспериментов с использованием модельных теплоносителей на установке «Солевой контур РК-3». Получение данных непосредственно изнутри потока стало возможным благодаря уникальной технологии микротермопарных погружных зондов. С помощью шарнирного зонда выполнялось измерение температурного

поля исследуемого сечения, и на основании данных о температуре и режимных параметрах рассчитываются безразмерные локальные и затем средние по периметру коэффициенты теплоотдачи (КТО) и числа Нуссельта [3].

Работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей гидродинамики и теплообмена при смешанной конвекции имитаторов расплава солей в условиях одностороннего обогрева под воздействием сильного поперечного магнитного поля. В качестве модельного теплоносителя использовался 20-ти процентный водный раствор КОН. Выбор данного рабочего тела был обусловлен, в первую очередь, возможностью применить теорию подобия, так как теплофизические свойства водных растворов электролитов близки к свойствам расплавов солей.

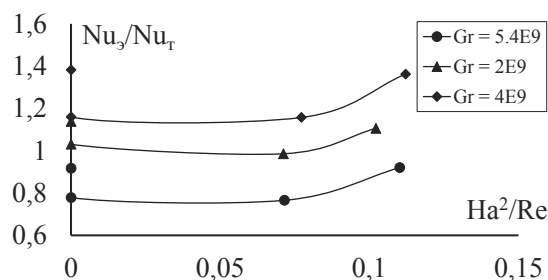


Рис.1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Стюарта.

Была проведена серия экспериментов в прямоугольном канале при числах Рейнольдса ($Re=5000-8000$) под влиянием компланарного магнитного поля ($Ha=23$) и неоднородного обогрева. В результате проведенных исследований были получены данные об осредненных и пульсационных характеристиках потока. Значения безразмерной температуры, полученные экспериментально, находятся в диапазоне турбулентных, рассчитанных аналитически. Также, заметно характерное расслоение профилей при наложении магнитного поля, однако, данный перепад сопоставим с погрешностью эксперимента. Значительного снижения коэффициентов теплоотдачи, также не обнаружено, следовательно, в исследуемых режимах подавления турбулентности не происходит.

Работа выполнена при поддержке Мега Гранта МИНОБР №14.Z50.31.0042.

Список литературы

1. Жидкосолевые ядерные реакторы. / Блинкин В. Л., Новиков В. М.. - М.: Атомиздат, 1978, 1112 с.
2. Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. / Генин Л.Г., Свиридов В.Г. М.: Изд-во "МЭИ", 2001. 199 с.
3. Беляев И. А., Захарова О. Д., Краснощёкова Т. Е., Свиридов В. Г., Сукомел Л. А. Лабораторное моделирование теплообмена жидкостей с числами $Pr > 1$. Теплоэнергетика, 2016.

Беляев И.А. ², Листратов Я.И. ¹, Пятницкая Н.Ю. ², Свиридов Е.В. ¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Объединенный институт высоких температур РАН,
125412., Москва, Ижорская, 13, стр.2
ListratovYI@mpei.ru

ТЕЧЕНИЕ В ТОНКИХ СДВИГОВЫХ СЛОЯХ И СТРУЯХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Формирование тонких сдвиговых слоев, вихрей или струй различного типа при течении электропроводной жидкости в магнитном поле [1] - одна из особенностей МГД течений. Особый интерес представляют струйные течения, встречающиеся в различных технических приложениях, например, в потоках при внезапных расширениях или при смешении, нагреве или охлаждении теплоносителей. Круглая затопленная струя [2, 3] в магнитном поле - каноническая конфигурация, традиционно рассматриваемая как один из основных объектов, иллюстрирующих влияние магнитного поля на гидродинамические структуры. В этом качестве, струя совмещает эффекты глобальной трансформации течения и массопереноса с локальными эффектами трансформации свободного сдвигового слоя. Плоская затопленная струя является ещё одной канонической конфигурацией [4]. Основная особенность плоской струи и её основное отличие от круглой струи – практически мгновенное формирование тонких сдвиговых слоев в плоскости параллельной магнитному полю. Как описано, например, в [5], эти слои проникают глубоко внутрь потока оставаясь чрезвычайно тонкими (с толщиной порядка $1/Na$). Таким образом, плоская затопленная струя может рассматриваться как оптимальная конфигурация в том смысле, что она позволяет нам изучать внутренние сдвиговые слои, образующиеся во многих МГД системах, и, в тоже время, реализуема в лабораторном эксперименте.

В работе представлена подробная экспериментальная программа, разные способы формирования круглой и плоской затопленных струй в потоке электропроводной жидкости в присутствии продольного (до 1 Тл) и поперечного магнитных полей (до 1.7 Тл), численные и экспериментальные методики, а также первые результаты численного моделирования методом DNS в конфигурациях, соответствующих эксперименту и подходы к созданию маломодовых моделей. На рис.1 представлен участок опытной секции, на котором формируется плоская струя. На участке предусмотрена муфта для смены плоской струи на круглую, а также два хонейкомба, расположенных на некотором

расстоянии друг от друга для успокоения спутного потока. Вся конструкция вставляется в квадратный канал 60×60 мм, основной контур и контур формирования

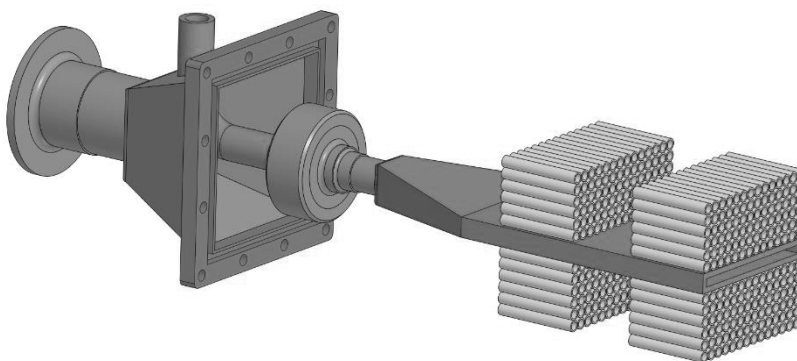


Рис. 1. Формирование плоской струи в квадратном канале.

струи подключается к установке независимо.

Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ № 20-69-46067.

Список литературы

1. Davidson P. A. Magnetic damping of jets and vortices / Journal of Fluid Mechanics. 1995. Т. 299. С. 153-186.
2. Kim J., Choi H. Large eddy simulation of magnetic damping of jet / Int. Congress of Th. And Appl. Mech. 2004.
3. Kim J., Choi H. Large eddy simulation of a circular jet: effect of inflow conditions on the near field / Journal of Fluid Mechanics. 2009. Т. 620. С. 383.
4. Stanley S. A., Sarkar S. Influence of nozzle conditions and discrete forcing on turbulent planar jets / AIAA journal. 2000. Т. 38. №. 9. С. 1615-1623.
5. Magnetohydrodynamics / Moreau R. J: Springer .1990. 320 p.

Biryukov D.A.¹, Gerasimov D.N.², Yurin E.I.²

¹ Joint Institute for High Temperatures RAS,
Russia, 125412 Moscow, Izhorskaya, 13-2

² National Research University "MPEI",
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14
yurinei91@gmail.com

MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF THE LEIDENFROST EFFECT

The results of molecular dynamics simulation of the contact between argon droplet and overheated (with temperature exceeding argon critical) copper surface are presented. The droplet with initial temperature of 100 K is sent (with initial velocity 10 m/s) towards the copper wall with temperature 300 K (which is 150 K above critical).

Calculation is performed for the system containing 10 000 and 20 000 argon atoms, the problem time is about 1 ns.

Some snapshots of the numerical simulation are presented in the figure below (grayscale is corresponds to the temperature map).

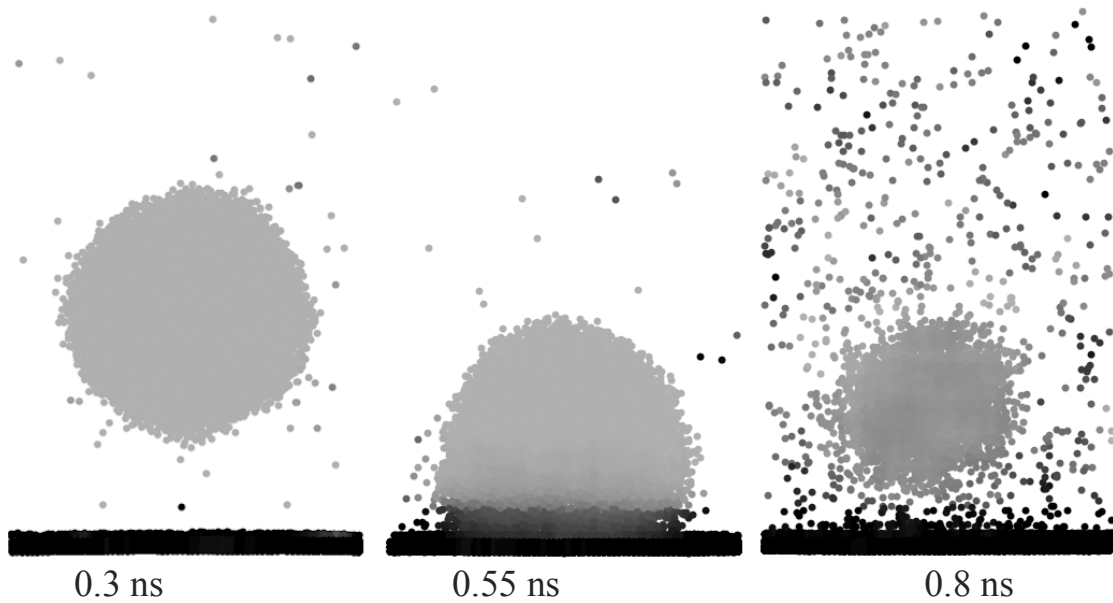


Fig. 1. Contact of the argon droplet (10 000 atoms) and the solid wall with temperature 300 K

The contact of argon (supercritical fluid) and overheated surface takes place in the numerical simulation, which leads to the extremely high evaporation flux. Such contact was previously observed in the numerical simulation of the explosive evaporation.

КАВИТАЦИЯ ВБЛИЗИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЛНОВОДА

В работе исследуется процесс кавитации на ультразвуковом волноводе (частота ~ 20.5 кГц, мощность установки 2 кВт), погруженном в глицерин. В подобных условиях наблюдается явление многопузырьковой сонолюминесценции, описанное, в том числе, в [1]. В упомянутой работе отмечена связь между свечением и наличием в жидкости парогазовой фазы; в частности, можно наблюдать свечение в виде «сетки» на ультразвуковом волноводе либо отходящие от волновода одиночные светящиеся «стримеры». Явление сонолюминесценции приведено на рис. 1.

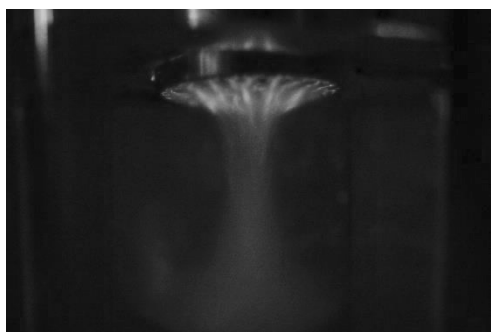


Рис. 1. Сонолюминесценция.

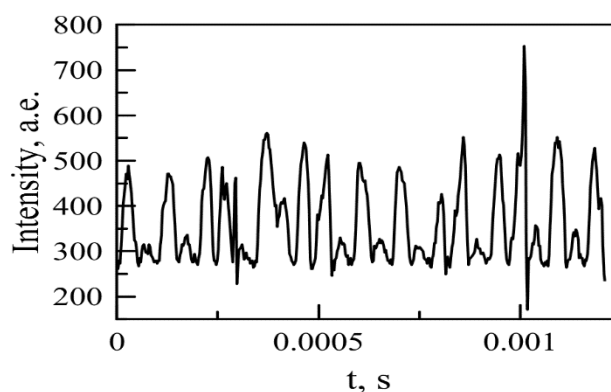


Рис. 2. Интенсивность сигнала.

В данной работе представлены результаты, полученные при скоростной съемке (до 400 000 кадров в секунду) ультразвукового волновода, погруженного в глицерин. Результат – яркость в точке под ультразвуковым волноводом – показан на рис.2; изменение яркости обусловлено образованием и исчезновением пены (многочисленных микроскопических пузырьков) под действием ультразвукового давления.

В работе определяются динамические характеристики явления, а также обсуждается связь кавитирующих пузырьков с сонолюминесценцией.

Список литературы

1. Biryukov D.A., Gerasimov D.N. Triboluminescence of Liquid Dielectrics: On a Way to Discover the Nature of Sonoluminescence// in “Triboluminescence: Theory, Synthesis and Application”. Springer, 2016. P. 95 – 123.

Boshkova I.L., Volgusheva N.V., Boshkov L.Z.
Odessa National Academy of Food Technologies
Ukraine, Odessa, 65082, Dvoryanskaya 1/3
ira_boshkova@mail.ru

ANALYTICAL STUDY OF TEMPERATURE FIELD DURING MICROWAVE DRYING OF THE MATERIAL

In many heat transfer processes, there are heat sources inside a body. They may be positive (for example, heating a body by microwave field) and negative (moisture evaporation in a moist body when being heated). The feasibility of obtaining analytical solutions is associated with a practical interest in microwave drying. Information on the temperature distribution in the material is important for various technological processes, for example, drying of seed grain. The objective of the work is to compile a mathematical model and obtain a formula for calculating the temperature of a semi-limited body during microwave heating using accurate analytical methods. The mathematical model of thermal conductivity is written in differential form and is based on the law of conservation of energy.

A semi-infinite body is considered, the temperature of which at all points is the same and equal to t_0 . At time τ_0 , the semi-infinite body is placed in a microwave (MW) field, heat sources inside the semi-infinite body begin to act. It is assumed that the surface temperature t_w remains constant: boundary conditions of the first kind are satisfied. The action of the microwave field leads to an increase in temperature in the semi-infinite body. A one-component model has been adopted, according to which the semi-infinite body is considered as a quasi-homogeneous medium with effective characteristics. It is assumed that the physical characteristics of the material are temperature independent. The temperature changes along the x coordinate and in time τ .

The problem stated may be written mathematically as follows:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_{v10}}{c \cdot \rho} e^{-\alpha x} + \frac{q_{v20}}{c \cdot \rho} e^{-\beta x}, \quad (1)$$

$$t(x, 0) = t_0; \quad \frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0, \quad t(0, \tau) = t_w = const, \quad (2)$$

where a is the thermal diffusivity, m^2/s ; c is the heat capacity of the material, $J/(kgK)$; q_{v10} is the maximum specific power of a positive heat source, W/m^3 ; α is the attenuation factor of electromagnetic energy in the material, $1/m$; q_{v20} is the maximum specific power of a negative heat source, W/m^3 ; β is the attenuation factor of the negative internal source, $1/m$; ρ is the density of the material, kg/m^3 .

To solve equation (1), the Laplace transform method was applied.

The solution of the differential heat equation (1) with initial and boundary conditions (2) made it possible to obtain the expression for calculating the

temperature of a semi-bounded body, which is applicable for conditions when the ambient temperature is lower than the temperature of the material. This condition reflects the actual physical process of microwave heating.

$$\begin{aligned}
 t(x, \tau) = & (1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}})t_0 + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \cdot t_w - \\
 & - \frac{q_{v10}}{c\rho a \alpha^2} \left[e^{-\alpha x} - \frac{1}{2} e^{\alpha^2 a \tau - \alpha x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \alpha \sqrt{a\tau} \right) + \frac{1}{2} e^{\alpha^2 a \tau + \alpha x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \alpha \sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right] - \\
 & (3) \\
 & - \frac{q_{v20}}{c\rho a \beta^2} \left[e^{-\beta x} - \frac{1}{2} e^{\beta^2 a \tau - \beta x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \beta \sqrt{a\tau} \right) + \frac{1}{2} e^{\beta^2 a \tau + \beta x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \beta \sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right],
 \end{aligned}$$

where the subscript 0 at specific power indicates that the value refers to the maximum value.

It was found that the analytical equation for calculating the temperature of the material during drying works satisfactorily in the range of operating parameters corresponding to the drying regimes of grain: initial moisture content $u=0.2$ kg/kg, drying speed $N = (10^{-5} \dots 10^{-4})$ s⁻¹. Calculation of temperatures according to the developed mathematical model, considering two internal sources of heat, allows obtaining satisfactory data and predicting the thermal state of the material at an arbitrary point in time.

Бухаров А.В., Гиневский А.Ф., Вишневский Е.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, ул. Красноказарменная, 14

boukharov@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СТРУЙ КСЕНОНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСТАНОВКАМ ПО ПОЛУЧЕНИЮ КРИОГЕННЫХ МОНОДИСПЕРСНЫХ МИШЕНЕЙ

Взаимодействие высокоинтенсивного ультракороткого лазерного излучения с поверхностью мишени приводит к образованию плазмы и появлению ультрафиолетового излучения с экстремально малой длиной волны (extreme ultra violet – EUV). Использование EUV излучения в процессе изготовления микросхем позволит существенно повысить плотность насыщения микросхем полупроводниковыми элементами. В настоящее время работы по созданию новых источников EUV излучения проводятся в США (Intel, AMD, Micron Technology, Motorola, IBM), в Европе и Японии.

Наиболее перспективными для получения EUV излучения признаны криогенные корпускулярные мишени из инертных газов. Такие мишени

обладают большим коэффициентом выхода излучения и не загрязняют рабочую оптику. Примером может служить разрабатываемый японской фирмы «ASML» вариант промышленной установки, в которой для получения EUV излучения предполагается использовать монодисперсные гранулы ксенона с диаметром 30 мкм. Ориентировочная стоимость установки 50 миллионов долларов.

В программной среде PHOENICS создана модель истечения тонких струй ксенона испаряющихся в область низкого давления. Проведены численные расчеты изменения температуры по длине струи и по радиусу в зависимости от диаметра струи, скорости, начальной температуры струи и давления. Показана принципиальная возможность создания высокоскоростных криогенных монодисперсных мишеней из ксенона. В соответствии с расчетами при вводе в вакуум тонких жидких струй ксенона со скоростью, большей 100 м/с, струи не успевают замерзнуть и могут быть разбиты на монодисперсные капли.

Для проверки результатов расчётов создана экспериментальная установка и проведены тестовые эксперименты. В состав установки входят следующие элементы и системы: вакуумная камера с иллюминаторами для осуществления наблюдения и специальной съемки; измерительная система, вакуумная система; система криогенного охлаждения ловушек, предназначенная для конденсации паров и система генерации монодисперсных капельных потоков.

Список литературы

1. Бухаров А.В. Криогенные корпускулярные мишени в энергетике / А.В.Бухаров, А.С.Дмитриев. – М.: МЭИ, 2013. – 144 с.

Бухаров А.В., Тимохин А.Д., Бухарова М.А.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, ул. Красноказарменная, 14
boukharov@mail.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ КАПЕЛЬНЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Получение стабильных во времени и пространстве монодисперсных капельных потоков является наиболее важной проблемой создания нового типа космических теплообменников - капельных холодильников излучателей (КХИ). Согласно имеющимся оценкам, для сброса с космического аппарата максимального избыточного тепла КХИ должен обладать следующими параметрами; количеством капель в потоке от 10^5 и больше, диаметр капель больше 50 мкм, скорость от 1 м/с до 20 м/с, максимальная рабочая температура 250 - 350 °С.

Наиболее важным элементом капельного холодильника излучателя является система генерации, основу которой составляет генератор монодисперсных капель. Именно генератор монодисперсных капель является тем элементом, с помощью которого из жидкой струи создаются монодисперсные капли.

На основании требований к параметрам капельных холодильников излучателей и требованиям к их конструкции был разработан специальный генератор монодисперсных капель. Генератор состоит из следующих частей: корпуса, системы возбуждения, выходного насадка с одним или с несколькими сопловыми каналами. Так как в России не было технологии обеспечивающей высокое качество выходных насадок с большим количеством сопловых каналов, то для их изготовления была разработана специальная технология. В результате удалось достичь получить выходные насадки с несоосностью сопловых каналов ~ 0.5 мрад.

Теоретическую основу генерации капель теплоносителя в области рэлеевского распада составляет теория Рэлея-Вебера, в соответствии с которой жидкая струя неустойчива по отношению к осесимметричным возмущениям поверхности, возрастающим по закону:

$$\delta(t) = \delta_0 \cdot e^{\gamma t},$$

где: δ_0 – амплитуда начального возмущения, γ – инкремент неустойчивости.

Для оценки качества разработанного генератора был проведён ряд экспериментов по определению влияния на амплитуду начального возмущения частотных характеристик системы генерации и рабочей температуры. Эксперименты проводились со струями вакуумного масла VM-1 при температурах от 30 °С до 100 °С. Диаметр струй менялся от 200 мкм до 600 мкм, а скорости от 3 м/сек до 20 м/сек.

В ходе экспериментов было получено, что только 30 % энергии системы возбуждения преобразуется в амплитуду начального возмущения. Кроме того, при изменении температуры от 20 °С до 100 °С амплитуда начального возмущения возрастает на 10 %.

Окончательная проверка работоспособности генератора проводилась в условиях микрогравитации и высокого вакуума в космических экспериментах «Пелена-2» и «Капля-2». Эксперименты показали, что разработанный генератор позволяет получать капельные потоки с высокой параллельностью струй и может работать при высоких температурах в условиях космоса в течение длительного времени, сохраняя свои характеристики.

Бучилко Э.К.¹, Милованов О.Ю.², Муратова Н.С.²

¹ Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
Беларусь

Республика Беларусь, 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15

² ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106

ebuchilko@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА БИДИСПЕРСНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Одним из методов переработки влажных биоотходов является процесс пиролиза перегретым паром в кипящем слое при температурах 250-300°C (торрефикация). В таком процессе в кипящем слое частиц размером порядка 0,2÷1,0 мм находятся куски перерабатываемого материала, существенно отличающегося от инерта формой, размерами и плотностью. Различный полифракционный состав частиц кипящего слоя накладывает определенную специфику на гидродинамику слоя. Обеспечение высокой интенсивности теплообмена и устойчивого псевдооживления с хорошим перемешиванием обрабатываемого материала является исключительно важной задачей для высокой эффективности процесса торрефикации отходов. Получение зависимостей для расчета скорости начала псевдооживления и коэффициента теплоотдачи, учитывающих влияние указанных факторов, является важной практической задачей, которая в настоящее время по-прежнему ещё далека от приемлемого решения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования псевдооживления различных видов бидисперсных слоёв, отличающихся характером распределений по фракциям частиц, составляющих эти смеси. Обобщение результатов показало, что при отношении средневесовых диаметров компонент менее 5,0 возможно использовать эквивалентный средневесовой диаметр смеси. Величина среднеповерхностного диаметра имеет область применения, ограниченную отношением размеров частиц ≤ 2 . Получены зависимости для расчета скорости начала псевдооживления бидисперсного слоя.

Экспериментально исследован теплообмен между псевдооживленным бидисперсным слоем и погруженным в него трубным пучком. Для расчета коэффициента теплоотдачи от горизонтального пучка труб к псевдооживленному бидисперсному слою предложена корреляция, обобщающая полученные опытные данные. Даны рекомендации по расчету эквивалентного диаметра бидисперсной смеси частиц.

Ван Юпен, Дедов А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ГИПЕРВАПОТРОННЫХ МОДУЛЯХ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР

Первая стенка термоядерных установок обязана выдерживать непрерывное действие плазмы при уровне плотности тепловых потоков до десяти МВт/м². Для стабильной работы первой стенки в международном термоядерном экспериментальном реакторе (ИТЭР) применяются гипервапотронные модули, представляющие собой оребренную теплообменную поверхность, охлаждаемую недогретой до температуры насыщения водой. Пример конструкции гипервапотрона приведен на рис.1. Основной режим теплообмена – однофазная конвекция, но при увеличении плотности теплового потока на стенке в результате проявления различного рода неустойчивостей в плазме возможно кипение теплоносителя. Критический тепловой поток при кипении (КТП) – параметр, который ограничивает работоспособность теплообменника и обеспечивает устойчивую работу установки.

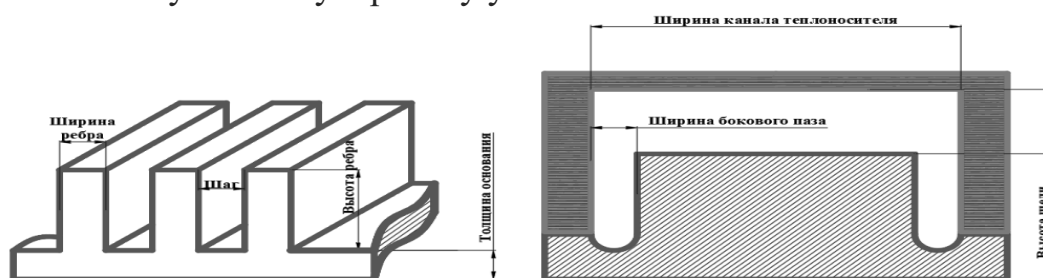


Рис. 1. Конструкция гипервапотрона.

В докладе выполнен обзор исследований теплообмена и КТП в гипервапотронных модулях, рассмотрены такие понятия, как «эффект вапотрона», «влияние образования вихря». Ряд экспериментов с гипервапотроном, которые обратили внимание на влияние параметров жидкости, структуры ребер на интенсивность теплообмена, были обобщены.

Для увеличения значений КТП в гипервапотронах необходимо использовать современные технологии модификации теплообменной поверхности. В работе предлагается выполнение экспериментальных исследований теплообмена и КТП на моделях гипервапотронных модулей с модифицированной теплообменной поверхностью. Представлена конструкция рабочих участков.

Юпен Ван благодарит за финансовую поддержку Китайский совет по стипендиям (CSC). Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWF-2020-0023).

Васильев Н.В.^{1,2}, Ходаков К.А.¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская, 13/2

² Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5
nikvikvas@mail.ru

КИПЕНИЕ НЕДОГРЕТОЙ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ НАСЫЩЕНИЯ ЖИДКОСТИ: ДЕТАЛИ МЕХАНИЗМА И ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Кипение недогретой жидкости как метод охлаждения позволяет отводить от греющих поверхностей предельно высокие плотности тепловых потоков. Однако до сих пор не существует общепризнанной феноменологической модели данного процесса. В настоящей работе с помощью высокоскоростной видеосъемки (с частотой кадров до 100 кГц) были уточнены важные детали механизма явления, позволившие сделать вывод о том, что наиболее правдоподобно описывающей процесс кипения недогретой жидкости является модель Снейдера-Берглеса (рис. 1).

Опыты проводились на установке подробно описанной в [1] на дистиллированной деаэрированной воде при массовой скорости в канале с ρw до 1200 кг/(м²·с), при величинах недогрева $\Delta t_{нед} = 30-75$ °С в условиях атмосферного давления при плотностях теплового потока вплоть до критических. С помощью экспериментов на плоской гладкой теплоотдающей пластине, обогреваемой электрическим током, были получены данные по статистическим характеристикам процесса: плотности центров парообразования, их пространственному распределению и устойчивости, распределению пузырей по размерам. Была проведена серия экспериментов на структурированных греющих поверхностях, образованных методом микродугового оксидирования (МДО), показавшая слабое влияние поверхности данного типа на вышеуказанные характеристики процесса.

С помощью высокоскоростной видеосъемки в профиль одиночного пузыря, получаемого посредством локализованного нагрева поверхности лазерным излучением, были получены дополнительные данные по

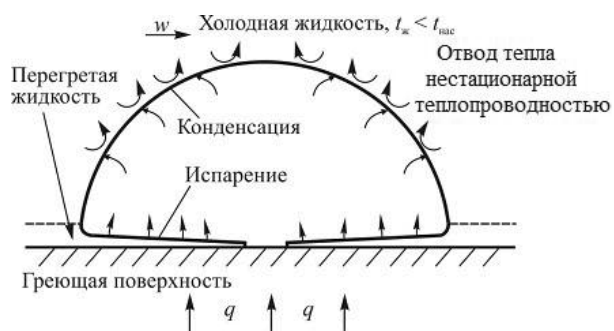


Рис. 1. Модель теплоотдачи при кипении недогретой жидкости Снейдера-Берглеса.

эволюции формы и размеров пузыря во времени, а также о влиянии на них величины недогрева и плотности теплового потока. Благодаря данной экспериментальной методике также были отмечены некоторые явления, такие как уменьшение в размерах (схлопывание) пузыря со всех сторон и испускание после схлопывания пузыря по нормали к греющей поверхности небольших объемов жидкости с температурой выше температуры потока.

С помощью синхронизированных скоростных видеосъемок процесса в двух взаимно перпендикулярных поверхностях установлено, что наступлению кризиса кипения недогретой воды в канале предшествует возникновение в результате слияния одиночных пузырей крупных паровых образований – агломератов, сопровождаемое ростом сухих пятен – непосредственных очагов развивающегося кризиса [2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00188

Список литературы

1. Кипение жидкости, недогретой до температуры насыщения в каналах, как метод отвода предельных тепловых потоков / Н.В. Васильев, Ю.А. Зейгарник, К.А. Ходаков, И.В. Маслакова // Теплоэнергетика. 2019. № 5. С. 69—81.
2. Экспериментальное исследование структуры двухфазного потока недогретой жидкости в предкризисных условиях / Н.В. Васильев, Ю.А. Зейгарник, К.А. Ходаков, И.В. Маслакова // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 37—42.

Вербанов И.С.¹, Гулимовский И.А.¹, Лепешкин А.Р.^{1,2}

¹ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,

111116, Москва, Авиамоторная, 2

² «МАИ» Национальный исследовательский университет,

Москва, 125993, Волоколамское шоссе, 4

isverbanov@ciam.ru

ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОХОЛМИСТОЙ И ГОФРИРОВАННОЙ ПЛАСТИНЧАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

На установке, визуализирующей распределения температуры по поверхности электро-обогреваемого охлаждаемого потоком воздуха теплообменного конверта с помощью тепловизора, проведены исследования микрохолмистой и гофрированной теплообменных поверхностей. Экспериментальные исследования проводились в широком диапазоне расходов воздуха $G \sim [0.4; 1.9]$ г/с. Это соответствовало числам

$Re_h \sim [450; 2150]$ для микрохолмистой и $Re_h \sim [450; 2300]$ для гофрированной поверхностей. При сравнительном анализе среднее отклонение значений полученных экспериментально на установке от численного моделирования для критерия Нуссельта составило порядка $\pm 5\%$. Наихудшее систематическое несоответствие чисел Эйлера (превышение расчетных потерь над экспериментом) наблюдается для гидравлических характеристик микрохолмистой поверхности, но и оно не превышает $+22\%$ в переходной области, уменьшаясь до $+14\%$ в области развитой турбулентности. В пределах данных погрешностей возможно использование численных 3d расчётов для наработки баз данных критериальных зависимостей гофрированных и микрохолмистых теплообменных поверхностей.

Для дальнейших расчётов полногабаритных теплообменных аппаратов представлены полученные расчётным путём критериальные зависимости для различных по геометрическим характеристикам моделей гофровой и микрохолмистой поверхностей.

Список литературы

1. **Arsenyeva O., Tran J., Kenig E. Y.** Thermal and hydraulic performance of pillow-plate heat exchangers. 28th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 2018, 181–186. *doi:10.1016/b978-0-444-64235-6.50033-4*
2. **Arsenyeva O., Tran J., Piper M., Kenig E.** An approach for pillow plate heat exchangers design for single-phase applications. Applied Thermal Engineering. 2018. *doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.08.083*
3. **Zhang Y., Jiang C., Yang Z., Zhang Y., Bai B.** Numerical study on heat transfer enhancement in capsule-type plate heat exchangers. Applied Thermal Engineering, 108, 1237–1242., 2016. *doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.033*
4. **Гулимовский И.А., Вербанов И.С., Светлаков А.Л.** Численное исследование теплогидравлических характеристик микрохолмистой и зигзагообразной поверхностей повышенной турбулентности // Промышленная энергетика. 2018. № 3. С.26 – 31
5. **Андреев М.М, Берман С.С.** Теплообменная аппаратура энергетических установок // М.: МАШГИЗ, 1963, 240 с.

Витовский О.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, просп. Академика Лаврентьева, 1
vitovsky@itp.nsc.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ С НОВЫМ ЗАВИХРИТЕЛЕМ

В работе рассматривается процесс энергоразделения в вихревой трубке с оригинальным завихрителем потока шнекового типа. Цель работы - исследование влияния входного давления, давления на горячем и холодном выходах трубки и массовой доли холодного потока в общем потоке на температурную сепарацию. Исследование распределения температур нагретого газа вблизи стенки вихревой трубы и охлаждающегося газа в приосевой области завихрителя проведено для определения области энергоразделения.

Вихревая труба, используемая в экспериментальных исследованиях, - рис. 1а, была изготовлена из тонкостенной нихромовой трубы внешним диаметром 6 мм, толщиной стенки 300 мкм и длиной 143 мм. Со стороны ввода газа в трубу вставлен и закреплен трехвитковый завихритель шнекового типа общей длиной 9 мм, внешним диаметром 5.4 мм и внутренним диаметром 3 мм. Труба вставлена в тройник таким образом, что через противоположный конец тройника была введена пластиковая труба внешним диаметром 3 мм и толщиной стенки 0.5 мм. Пластиковая труба проходила через приосевое пространство шнекового завихрителя так, что образовывался кольцевой винтовой зазор высотой 1.2 мм. Пластиковая труба соединялась с медной трубой аналогичного размера, на поверхности которой была зачеканена термопара T_c , что позволяло измерять температуру протекающего в трубе газа. Так был сформирован выход холодного газа через трубу внутренним диаметром 2 мм. Для исследования механизма передачи энергии между различными слоями потока в закрученном течении газа в шнековом завихрителе в вихревой трубке Рэнка-Хилша была установлена термопара, впаянная заподлицо на внешней поверхности пластиковой трубы вблизи торца T_{ce} , - рис.1а, что позволило измерять температуру газа, вытекающего из кольцевого винтового зазора вблизи поверхности пластиковой трубы. На

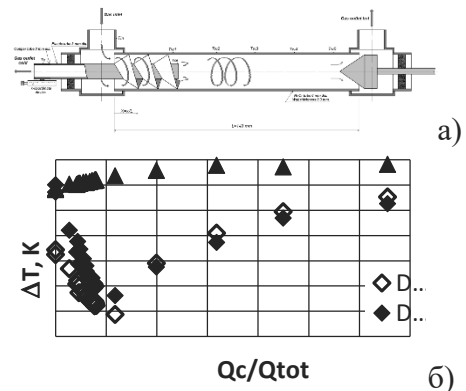


Рис. 1. Схема вихревой трубы (а) и зависимость охлаждения/нагрева воздуха в трубке от доли газа, протекающего через холодный выход (б).
 $P_{in} = 5.1$ бар, $P_{out} = 1$ бар.

противоположном конце нихромовой трубы в области горячего выхода газа устанавливался конический вентиль для регулирования соотношения расходов через холодный и горячий концы вихревой трубы. На внешней поверхности нихромовой трубы диаметром 6 мм были приварены 5 термопар $T_{w1} \dots T_{w5}$ для измерения распределения температуры поверхности по длине трубы. Малая толщина стенки трубы и низкий коэффициент теплопроводности нихрома минимизируют переток тепла по стенке трубы, поэтому температура стенки трубы отражает температуру газа, текущего в трубе вблизи стенки. Температура входящего газа T_{in} измерялась как с помощью термопары с изолированным спаем, размещенной в потоке в подводящей трубе, так и с помощью термопары, приваренной на поверхности подводящей нихромовой трубы. Температура выходящего из вихревой трубы газа через горячий выход принималась равной температуре трубы вблизи выхода T_{w5} . Вихревая труба была интегрирована в замкнутый газовый контур, циркуляция газа в котором обеспечивалась диафрагменным компрессором. В качестве рабочего газа использован воздух.

Примененный завихритель является оригинальным и ранее не использовался в трубке Рэнка-Хилша. Его использование вместе с применением термопарных методов исследования позволило говорить о том, что температурная сепарация газа происходит внутри шнекового завихрителя при спиральном течении газа в условиях значительных центробежных сил и, соответственно, больших градиентов радиального давления. Исследовано влияния входного давления, давления на горячем и холодном выходах трубки и массовой доли холодного потока в общем потоке, - рис.1б, на температурную сепарацию и эффективность процесса. Показано, что с увеличением входного давления эффект сепарации температуры потока усиливается. Полученные распределения температур нагретого газа вблизи стенки вихревой трубы и охлаждающегося газа в приосевой области шнекового завихрителя показали на значительное охлаждение потока, выходящего через холодный выход, и небольшой нагрев потока, выходящего через горячий выход вихревой трубы. Работа вносят свой вклад в понимание процессов энергоразделения в вихревой трубе и ее результаты могут использоваться при разработке и оптимизации таких труб для практических нужд.

Войтков И.С., Ткаченко П.П., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050, Ленина, 30
vojtkov12@mail.ru

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ В АЭРОЗОЛЬНОМ ОБЛАКЕ

При тушении пожаров применяются разнообразные по компонентному составу жидкости, растворы, суспензии и эмульсии для интенсификации процессов сдерживания и подавления горения веществ и материалов. Основные сложности заключаются в достоверном прогнозировании дисперсности жидкостных составов при тушении после прохождения расстояний от участка распыления до зоны пламенного горения в случае использования авиации или распылительных систем. Целесообразно выполнение сравнительного анализа изменения размеров капель типичных огнетушащих составов при свободном падении в газовой среде с варьируемой высотой.

Для изучения граничных условий и интегральных характеристик измельчения капель струй и массивов различных жидкостей с применением высокоскоростной видеорегистрации был создан экспериментальный стенд (Рис. 1) главными компонентами которого, как и в [1,2] являются камера Phantom Micro M310 и источник света MULTILED LT для создания однородного фона.

В качестве исследуемых жидкостей в экспериментах применялись: вода, эмульсия пенообразователя (AFFF), суспензия бентонита (размеры твердых частиц около 1 мкм), раствор бишофита, раствор ОС-5.

При обработке результатов использовалось ПО «ActualFlow» с пакетом Multiphase Kit. Применялся метод «Shadow Photography» [1]. Систематическая погрешность определения размеров капель в проведенных экспериментах не превышала 3.5%.

Проведенные эксперименты показали существенные отличия распределений капель суспензий,

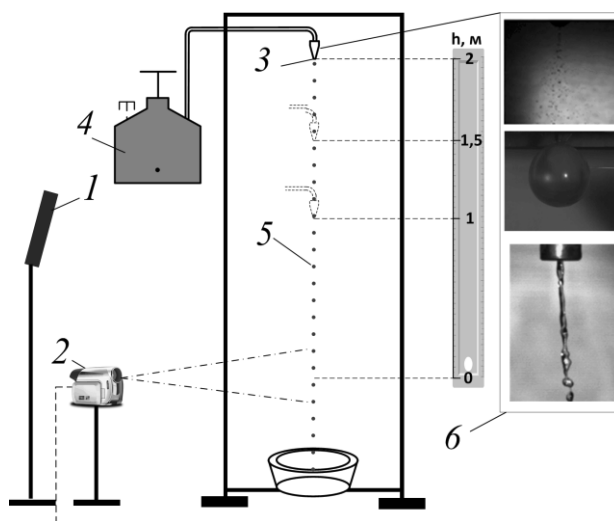


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – прожектор; 2 – высокоскоростная видеокамера; 3 – форсунка; 4 – емкость с жидкостью; 5 – траектория движения жидкости; 6 – три варианта подачи жидкости.

эмульсий и растворов. Для суспензий распределения меняются во времени полета менее масштабно по сравнению с растворами и тем более эмульсиями. Установлены условия, при которых распределения капель различных огнетушащих составов остаются сопоставимыми.

Список литературы

1. **Volkov R.S.** Transformation of a water slug in free fall under the conditions of exposure to an air flow orthogonal to the direction of the slug motion // Journal of engineering physics and thermophysics. 2016. Т. 89. № 4. С. 864—869.
2. **Копылов Н.П.** Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров // Пожарная безопасность. 2015. №. 2. С. 49—55.

*Волгин Я.С., Гиневский А.Ф.*¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ УЛЬТРАДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЫ ПО РАЗМЕРАМ В ПАРОГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Количество публикаций и исследований на тему коагуляции ультрадисперсных систем постоянно увеличивается; в их число входят и исследования механизмов получения наноматериалов, в частности, наночастиц. Данная работа посвящена выводу модели коагуляционного роста частиц и проведению численного моделирования эволюции системы жидких наночастиц.

Ключевым элементом описания эволюции коагулирующей системы является функция распределения частиц по размерам. Для ее нахождения используется система из уравнений, описывающих процесс коагуляционного роста.

Цель исследования состоит в том, чтобы провести анализ математического модели коагуляции. Нас интересует, как меняется функция распределения по размерам в модели коагуляции при разных начальных параметрах. Прочие формы взаимодействия, как, например, дробление капель, в данной работе не учитываются, так как рассматриваемая система неподвижна [2], и данными формами взаимодействиями можно пренебречь и рассматривать только коагуляцию.

Для нахождения функции распределения рассматривается система из уравнений, описывающих процесс коагуляции наночастиц внутри парогазовой среды.

Рассматривается задача о коагуляции наночастиц глицерина внутри камеры установки испарения-конденсации при постоянной температуре системы и отсутствии течения.

Для решение данной задачи составляется система из уравнений, описывающая коагуляцию с применением уравнения Смолуховского в дискретной форме. Учитывая бóльшую скорость взаимодействия частиц с молекулами парогазовой среды по сравнению со скоростью соударений частиц, мы можем считать, что данная система находится в термодинамическом равновесии. [1]

Для данной системы применяются следующие допущения: система изолирована от окружающей среды; температура всех элементов системы постоянная и одинаковая; начальное распределение частиц – монодисперсное; учитываются только парные столкновения; начальное распределение частиц – монодисперсное; движение частиц хаотично; парогазовая среда не оказывает сопротивление частицам;

Была составлена модель эволюции монодисперсной системы из уравнений, описывающих в дискретной форме коагуляцию каждого из сортов частиц:

$$\frac{dN_n}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} \alpha_{n-k,k} N_{n-k} N_k - N_n \sum_{k=1}^{N_{\max}} \alpha_{nk} N_k, \quad n = 1 \div N_{\max}$$

$$\alpha_{nk} = \left(n^{1/3} + k^{1/3} \right) \sqrt{\frac{n+k}{nk}} R_1^2 \sqrt{\frac{8\pi\kappa_B T}{m}} \exp\left(-\frac{E_a}{\kappa_B T}\right), \quad n, k = 1 \div N_{\max}.$$

где α_{nk} – коэффициент столкновения, N_{\max} – максимальное число сортов частиц, E_a – энергия активации, R_1 – размер частицы 1-ого сорта.

Вывод выражения для коэффициентов столкновений выполнен с использованием ряда приближений [1] и допущения о сферичности жидких наночастиц, при этом величина энергии активации принимается равной нулю.

Было проведено численное исследование зависимости функции распределения частиц от времени. Получены графики распределений при разных начальных концентрациях и максимальных числах сортов частиц.

Полученные результаты будут в дальнейшем использованы в рамках создания численной модели генерации наночастиц в парогазовом потоке.

Список литературы

1. Самуйлов Е.В. Кинетическое уравнение для функции распределения капель конденсационного аэрозоля по размерам при учете коагуляции капель // Известия Ак. Наук Энергетика. 2009. №5. С. 125-130.
2. Сумм Б.Д., Иванова Н.И. Коллоидно-химические аспекты нанохимии – от Фарадея до Пригожина // Вест.Моск.ун-та.сер.2.химия. 2001. Т. 42. №5. С. 300–305.

3. Береснев С.А., Грязин В.И. Физика атмосферных аэрозолей. Курс лекций. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. 227 с.
4. Ивлев Л.С., Довгало Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. – Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ, 1999. 194 с.

Волгин В.С.¹, Гиневский А.Ф.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Солнечный термоэлектрический генератор (СТЭГ) – энергетическая установка, в которой поглощенное солнечное излучение используется для генерации электричества с помощью термоэлектрического генератора (ТЭГ). ТЭГ состоит из горячего коллектора, холодного теплостока и термоэлектрических модулей (ТЭМ), располагающихся между ними. При работе установки между сторонами ТЭМ возникает температурный перепад, приводящий к появлению в ТЭМ электродвижущей силы вследствие эффекта Зеебека. В качестве преобразователей солнечной энергии для СТЭГ наиболее часто используются солнечные коллекторы на базе концентраторов излучения [1] и солнечные вакуумные трубки [2]. В данной работе рассматриваются СТЭГ с солнечными вакуумными трубками.

При различных значениях отношения площади адсорбирующей солнечное излучение поверхности к количеству ТЭМ в СТЭГ можно создавать различные температурные перепады на ТЭМ. При оптимизации конструкции, с целью максимизации получаемой электрической мощности с единицы площади адсорбирующей поверхности, данное отношение можно изменять за счет числа ТЭМ в установке. Однако следует отметить, что существует нелинейная связь между температурным перепадом между сторонами ТЭМ и мощностью выработки электричества. Поэтому при изменении количества ТЭМ будут меняться температурные режимы их работы, следовательно мощность тоже будет изменяться нелинейно. Эта особенность может вызвать серьезные трудности при проектировании и оптимизации конструкции СТЭГ.

Для исследования влияния зависимости мощности от количества ТЭМ на интегральные характеристики СТЭГ, был использован испытательный стенд, реализующий оригинальную конструкцию, в которой возможно изменение количества модулей в установке при неизменном количестве солнечных вакуумных трубок, которое равно 5. Изменение площади

адсорбирующей поверхности, приходящейся на один модуль, реализуется за счет изменения количества ТЭМ от 2 до 5 штук. Были получены тепловые и энергетические интегральные характеристики для разных отношений площади адсорбирующей поверхности к ТЭМ в установке. В результате был выявлен рост общей генерируемой электрической мощности при уменьшении количества модулей (Рис.1): так для конфигурации из 5ти модулей мощность генерации составила 2,789 Вт, а для конфигурации из 2 модулей 3,302 Вт при одинаковых условиях. Средняя мощность генерации на одном модуле для 5-ти модульной конфигурации составила 0,558 Вт, а для 2-ех модульной – 1,651 Вт.

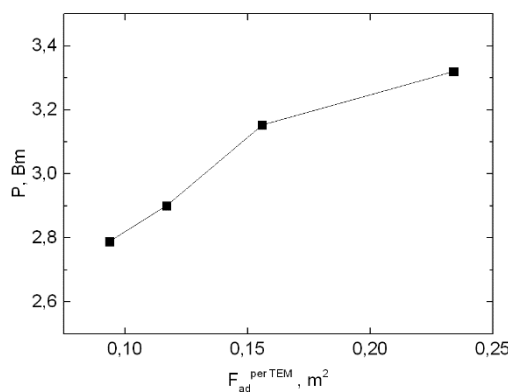


Рис. 1. Мощность СТЭГ при разном отношении адсорбирующей площади к количеству ТЭМ.

Список литературы

1. Kraemer, D., Jie, Q., McEnaney, K., et al. (2016). Concentrating solar thermoelectric generators with a peak efficiency of 7.4%. *Nature Energy*, 1(11)
2. Lv, S., He, W., et al. (2017). Study on a high-performance solar thermoelectric system for combined heat and power. *Energy Conversion and Management*, 143, 459–469.

Волков Г.Ю.¹, Мелихов В.И.¹, Мелихов О.И.¹, Никонов С.М.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности
АЭС,
142530, Московская обл., ул. Святого Константина, 6
gogirik92@gmail.com

АНАЛИЗ КОДОМ WANA ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО КОНДЕНСАЦИОННЫМ ГИДРОУДАРАМ НА СТЕНДЕ КГУ

Расчетный код WANA [1] был разработан в рамках европейского проекта WANALoads, который был посвящен расчетным и экспериментальным исследованиям конденсационных гидроударов. Код предназначен для моделирования конденсационных гидроударов в трубопроводах. Основу кода составляет двухжидкостная модель пароводяной среды с уравнениями сохранения массы, импульса и энергии для каждой фазы. Отличительной особенностью данного кода является схема численного интегрирования уравнений сохранения, основанная на методе С.К. Годунова, которая эффективна для волновых задач двухфазной газодинамики. С помощью кода WANA были проанализированы эксперименты по конденсационным гидроударам на установках РМК-2 (Венгрия), ROSA (Япония) и ФЭИ (Обнинск).

В 2018 году в ЭНИЦ на стенде КГУ были проведены эксперименты по исследованию конденсационных гидроударов [2]. Рабочий участок стенда представляет собой горизонтальную трубу с внутренним диаметром 64 мм и длиной 3 м. Давление пара составляло 0,6 и 1,0 МПа, температура подаваемой воды – 30 и 60 °С. Число Фруда, определенное по расходу воды и внутреннему диаметру трубы, было в диапазоне 0,1-0,6. В экспериментах наблюдались как конденсационные гидроудары, вызванные образованием изолированных паровых полостей и их быстрой конденсацией, так и режимы расслоенного течения жидкости и пара без конденсационных гидроударов. В экспериментах ясно различались две стадии исследуемого процесса. Первая - квазистационарное стратифицированное течение, когда подаваемая в один конец горизонтальной трубы вода сливалась через другой её конец в приемную ёмкость и заполняла её. При этом находящийся над водой пар конденсировался на ней, вызывая встречное течение пара из парового резервуара. Вторая стадия – заполнение горизонтальной трубы после того как уровень воды в нижней части приёмной ёмкости достигал горизонтальной трубы. На обеих стадиях наблюдались конденсационные гидроудары.

Численное моделирование эксперимента с помощью кода WANA показало, что код достаточно хорошо описывает вторую стадию процесса, но не воспроизводит конденсационные гидроудары, наблюдавшиеся в экспериментах на первой стадии. Для выяснения причин такого расхождения была разработана стационарная математическая модель расслоенного течения жидкости и пара в горизонтальной трубе с учетом процесса конденсации на межфазной границы. Модель была дополнена локальным критерием Тайтеля – Даклера, который определяет параметры потока, при которых образуется водяная перемычка, перекрывающая сечение трубы, и место её возникновения, что необходимо реализации конденсационного гидроудара. Применение этой модели к анализу экспериментов на стенде КГУ позволило определить поправку к расчету теплового потока, учет которой в математической модели кода WANA сделал возможным воспроизведение эти кодом конденсационных гидроударов, наблюдавшихся на первой стадии процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержки Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 19-08-00647.

Список литературы

1. WANA3 Code Manual / Tiselj I., Horvat A. et al. Josef Stefan Institute Report IJS-DP-8841, Rev. mar-04. Ljubljana, March 04.
2. **Елкин И.В., Никонов С.М., Мелихов В.И. и др.** Экспериментальное исследование конденсационных гидроударов на стенде АО "ЭНИЦ" // Трубопроводная арматура и оборудование, 2019, № 1 (100), с.44-45.

Воробьева Ю.А.¹, Жерлыкина М.Н.¹, Бурак Е.Э.¹, Кононова М.С.¹,

Муравьев А.В.¹

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026, Воронеж, Московский проспект, 14
cccp38@yandex.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИ РАЗВИТИИ ТРЕЩИН В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ЗДАНИЙ

Введение. Во время эксплуатации ограждающие конструкции зданий претерпевают изменения, как правило, в худшую сторону. Возникновение в результате старения конструкции трещин, щелей, крупных пор нарушает равномерность поступления наружного воздуха через ограждение и увеличивает его инфильтрацию, что влияет на уменьшение температуры внутренних поверхностей ограждающих

конструкций, снижение значений внутренней температуры помещения, увеличение подвижности воздуха [1].

Материалы и методы. Для исследования влияния развития трещин на воздухопроницаемость ограждения была составлена расчетная схема [2], для которой приняты следующие допущения: трещину можно представить как щель размером r , заполненную воздухом; линейные размеры поверхности, образованной трещиной значительно превышает ширину ее раскрытия $\delta \gg r$, $L \gg r$; плотность воздуха является неизменной величиной, $\rho = const$; течение воздуха в воздушной прослойке происходит при достаточно малых числах Рейнольдса, поэтому инерционными членами в основных уравнениях динамики можно пренебречь.

Движение воздуха для рассматриваемой схемы было описано уравнениями Навье - Стокса. Применительно к тонким слоям воздушной среды была составлена система уравнений, включающая уравнения динамики и уравнения неразрывности, которая после ряда преобразований и интеграций с учетом граничных условий представлена в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{12 \cdot Q \cdot \mu}{r^3 \cdot L^2 \cdot A} = 0, \quad (1)$$

где P - избыточное давление в щели, Па; ρ - плотность воздуха, кг/м³; τ - время, с; $M = \frac{Q \cdot \rho}{A \cdot L^2 \cdot r}$ массовый расход воздуха в единицу времени на единицу объема, занимаемого трещиной, кг/м²с; μ – динамическая вязкость воздуха, Н с/м²., $A = \delta / L$, где δ , L –характерные размеры трещины, м; Q - объемный расход воздуха, поступающего в воздушную прослойку, м³/с.

После ряда преобразований получаем зависимость расхода воздуха через трещину от ее размерных характеристик и давления:

$$Q = \frac{P \cdot r^3 \cdot L^2 \cdot A}{12 \cdot \eta \cdot B}, \quad (2)$$

где

$$B = \left(\frac{8}{\pi^2} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{(-1)^{\frac{(i+j)-1}{2}} \cdot (-1)^{\frac{(i+1)-1}{2}} \cdot (-1)^{\frac{(i+1)-1}{2}}}{i \cdot j \cdot (i^2 + j^2)} \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет определять расходные характеристики наружного воздуха, проходящего через сквозную трещину в ограждающей конструкции с учетом ее линейных размеров и величины избыточного давления. Дальнейший анализ показывает, что при ширине раскрытия трещины до 1 мм расход воздуха через щель имеет не существенные значения, т.е. как и через поры ограждения. При ширине раскрытия трещины более 2 мм расход воздуха через ограждение резко возрастает.

Список литературы

1. **Воробьева Ю.А.** Анализ снижения тепловой эффективности ограждающих конструкций жилых зданий с различным износом // Научный вестник ВГАСУ Серия: Высокие технологии. Экология. – Воронеж, ВГАСУ– 2010.– С. 54-56.
2. **Воробьева Ю.А.** Влияние процесса старения ограждающих конструкций и инженерных систем жилых зданий на микроклимат помещений / Ю.А. Воробьева.- автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03/. – Воронеж, 2006.– 18с.

Vu S.K., Glazov V.S., Kobzeva A.A.
National Research University "MPEI",
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

AIR BREATHABLE THERMAL INSULATION WITH HEAT TRANSFER INTENSIFIERS FOR HIGH-TEMPERATURE INSTALLATIONS

The formulation and solution of problems devoted to improving the energy effectiveness and reliability of high-temperature heat-engineering plants is especially important for countries with developing economies. In recent years, this has become significant due to the increase in consumption and the cost of minerals, the desire to be an energy and technology independent country in the context of the sanctions policy. The prudent use of fuel and the improvement of heat engineering processes in the heat power system is one of the possible solutions to the problems encountered on the way to a highly developed economy.

High-temperature installations (HTI) are energy-intensive units. The increase in their efficiency is carried out mainly due to the utilization of the heat of the flue gases and the reduction of heat losses through the external fencing. The latter is usually ensured by its tightness and lowering the heat transfer coefficient by selecting appropriate heat-insulating materials. There is another method that allows you to increase the service time of the HTI walls and to reduce the heat losses through them. It is based on the use of breathable materials. Cold air passing through such a material heats up itself, cools the lining (a multilayer system of the fireproof and heat insulating materials) of the HTI and is sent to combustion. The higher the temperature of the air sent to combustion or heating the batch material, the more efficient the installation is. Therefore, it is proposed to use heat transfer intensifiers (HEI) in the form of dimples (spherical segments) to intensify heat transfer and increase the air temperature at the outlet of the channels placed inside the HTI walls.

The objective of the present study was to identify the feasibility of using dimples to intensify heat transfer in the HTI walls and, as a result, to increase

the energy effectiveness of the HTI. Figure 1 shows options of locating the dimples on the surfaces of the air channels in the HTI walls.

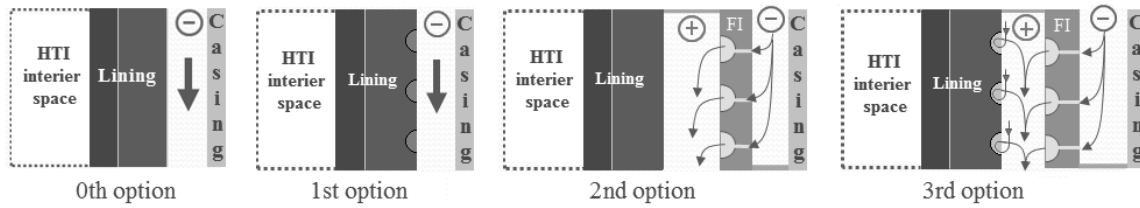


Fig. 1 - Investigated options for the HTI external fence

In the first option air moves in the channel between the lining, on which the dimples are located, and the HTI casing. In the 2nd option air is supplied to the channel between the filtered (breathable) insulation containing the dimples with the bottom holes and the HTI casing. Moreover, the surface of the inner channel from the side of the HTI lining is smooth. In the 3rd option, unlike the 2nd option, there are HEI in the form of dimples on the surface of the lining.

Numerical modeling of heat transfer for all the considered options was performed in the PHOENICS program. The following turbulence models were used: Chen Kim $k\epsilon$ Low Re in the 1st option, Realizable $k\epsilon$ in the 2nd and 3rd options. Under thermal calculations of the HTI walls with filtered insulation the following criterial parameters were identified: the value of heat losses through the HTI walls - Q_{loss} , the mass-average temperature of the air for combustion - t_{out} , and also the temperature of the HTI metal casing - t_{coat} . The results are presented in Table 1.

Table 1. Results of computational experiments

№	Variants of wall constructions for the HTI	u_{inlet} , m/s	t_{inlet} , °C	t_{outlet} , °C	t_{coat} , °C	Q_{loss} , W
0	Smooth outer lining and no permeable insulation	10	20	139.30	21.56	2.16
1	Dimples on the outer surface of the lining and no permeable insulation	10	20	175.58	63.95	26.74
2	Smooth outer surface of lining and dimples with the bottom holes in permeable insulation	3	20	182.95	21.70	2.26
3	Dimples on the outer surface of the lining and dimples with the bottom holes in permeable insulation	3	20	193.35	19.30	1.30

As can be seen from the table, the best option that showed the lowest heat losses Q_{loss} through the walls of the HTI is the 3rd option. Here, the air passes through an air-permeable insulation containing the dimples with bottom holes, heats up, becomes turbulent and, when interacting with the lining, takes away some part of the heat from it. The presence of dimples on the walls of the hot

channel increases the intensity of heat exchange and, as a result, the air acquires a higher temperature. Leaving the hot channel, the air carries with itself a significant part of the heat which was not used in the other options considered and simply went out through the walls of the HTI.

Conclusion. To increase the energy effectiveness of HTI, it is advisable to use air-permeable insulation with the bottom holes dimples which intensify heat exchange, so the air in the outer enclosure acquires a higher temperature. And further the air is used for preheating the batch material and / or for maintaining combustion in the burner devices, which leads to fuel savings in heat-technological processes.

Гайдукова О.С.¹, Мисюра С.Я.²

¹Томский политехнический университет,
Томск, 634050, Ленина, 30

²Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе,
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
osyl@tpu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

На сегодняшний день газовые гидраты являются альтернативным экологически-чистым энергетическим источником и помогут существенно продвинуться в решении задач энергетики [1]. Проводимые научные и технологические исследования связаны с четырьмя важными направлениями: добыча природного гидрата метана, производство искусственного гидрата метана, технологии добычи и транспортировки и технологии горения. Анализ литературы показал, что большая часть экспериментальных работ касается горения простых гидратов. Крайне мало исследований по диссоциации и горению двойных газовых гидратов. В литературе также отсутствует анализ относительно того, какие минимальные температуры порошка и газа необходимы для возникновения горения гидрата горючего газа.

Целями настоящей работы являются исследование диссоциации двойного гидрата (пропан-метан) при индукционном нагреве и определение минимальной температуры, при которой начинается горение при индукционном методе сжигания газового гидрата.

Эксперименты проведены в диапазоне температур поверхности цилиндра 550-1000 °С. Диссоциация и горение газового гидрата состоит из нескольких характерных областей. Под действием высокой температуры на поверхности гранулы появляется тонкая плёнка воды, которая стекает вниз под действием силы тяжести, плёнка воды

разбивается на капли, которые превращаются в пар. Между гранулой и стенкой образуется слой пара. Пар течёт под гранулой и создаёт гидродинамическое трение, а также разность давлений, которое противодействует силе тяжести и делает гранулу висящей.

На рис. 1 приведены фотографии пламени для разных моментов времени. Со временем изменяется форма и высота пламени. В завершающей стадии диссоциации высота пламени быстро уменьшается, так как резко падает концентрация метана из-за уменьшения площади реакции и объёма оставшегося гидрата в сферических частицах порошка [2] Минимальная температура начала горения двойного газового гидрата пропан-метан при индукционном нагреве составила 655 °С.

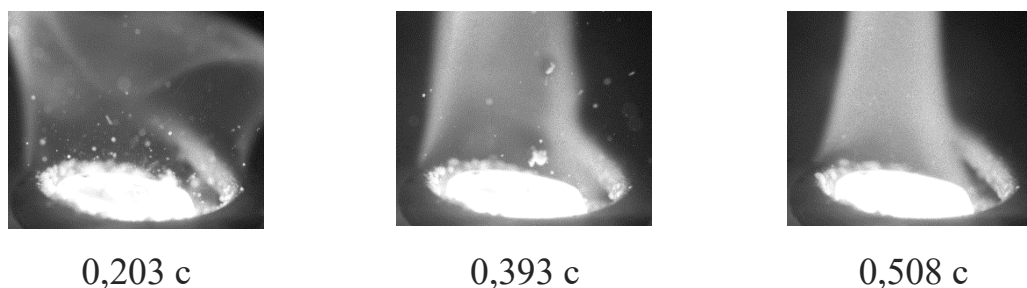


Рис. 1. Видеокадры процесса зажигания газового гидрата при индукционном нагреве при 720 °С

Проведено исследование диссоциации газового гидрата при индукционном методе горения. Полученные результаты помогут подобрать оптимальные варианты для дальнейшего развития технологий сжигания газовых гидратов в виде порошка с учётом нескольких важных факторов: температуры начала горения, скорости диссоциации и устойчивости пламени, а также подобрать оптимальные варианты по доставке топлива в рабочую зону реактора.

Исследования проводятся при поддержке гранта РФФИ (18–43–700001).

Список литературы

1. Газовые гидраты в природных условиях / В.А. Истомина, В.С. Якушев. М.: Недра, 1992. 236 с.
2. **Misyura S.Y.** Effect of heat transfer on the kinetics of methane hydrate dissociation // *Chemical Physics Letters*. 2013. Vol. 583. P. 34—37.

Георгиевская Е.П.^{1,2}, Михайлов Е.А.², Тепляков И.О.¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская, 13 стр.2

² Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, д.1
ea.mikhajlov@physics.msu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В ЛИНЕЙНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Электровихревые течения (ЭВТ) возникают в жидкой проводящей среде при взаимодействии электрического тока переменной плотности с его собственным магнитным полем [1]. ЭВТ играют важную роль в различных электрометаллургических процессах, таких как электросварка, электрошлаковый и электродуговой переплав металлов, и т.д. [2]. На базе ОИВТ РАН действует экспериментальная установка для изучения ЭВТ в полусферической геометрии. Установка представляет собой полусферу (являющуюся электродом) заполненную эвтектическим сплавом In-Ga-Sn, температура плавления которого составляет 10.5°C. В центре полусферы находится электрод, от которого распространяется электрический ток в объем жидкого металла [3].

Отдельный интерес представляет исследование течения во внешнем магнитном поле. С одной стороны, это диктуется приложениями, где может быть необходим учет дополнительных силовых воздействий, например со стороны токоподводов, а в промышленных установках токи достигают значений в сотни кА, с другой – лабораторный эксперимент показывает, что даже относительно слабое магнитное поле Земли может заметно искажать характеристики течения, делая их отличными от результатов моделирования без учета внешних сил.

С целью описания происходящих процессов была построена модель течения включающая в себя внешнее магнитное поле. Влияние магнитного поле направленного вертикально приводит к возникновению течения в азимутальной плоскости. Скорость течения в сферической системе координат $r - \theta - \varphi$ можно представить в виде $\mathbf{v} = u\mathbf{e}_\varphi + \text{rot}(\psi\mathbf{e}_\varphi)$, где u - азимутальная скорость течения (индуцированная внешним полем), ψ – азимутальная компонента векторного потенциала скорости, описывающая полоидальные течения. Если измерять расстояния в единицах радиуса внешней полусферы, а время – в характерных временах вязкости, то система уравнений, описывающих течение жидкого металла в линейном случае примет следующий вид [4]:

$$\Delta\psi - \frac{\psi}{r^2 \sin^2 \theta} = -\omega;$$

$$\Delta\omega - \frac{\omega}{r^2 \sin^2 \theta} = -\frac{A(1 - \cos\theta)}{\sin\theta};$$

$$\Delta u - \frac{u}{r^2 \sin^2 \theta} = -\frac{\alpha \sin\theta}{2\pi r^2};$$

где $\omega = \text{rot}v$ – завихренность, A – параметр, характеризующий электрический ток, α – параметр влияния внешнего магнитного поля.

В ходе решения уравнений получены поля скорости, изучен процесс влияния внешнего поля на течение, проведено сравнение с результатами полученными ранее.

Список литературы

1. Электровихревые течения / В.В.Бояриевич, Я.Ж.Фрейберг, Е.И.Шилова, Э.В.Щербинин. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.
2. Электровихревые течения в каналах МГД-устройств. / С.Ю.Хрипченко. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 261 с.
3. Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О. К вопросу о закрутке осесимметричных электровихревых течений // ТВТ. 2011. Т.47. №6. С.927 - 929.
4. Михайлов Е.А., Тепляков И.О. Аналитическое решение задачи об электровихревом течении в полусфере с электродами конечного размера в стоксовом приближении // Вестник Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2018. №2. С.39 – 44.

Gerasimov D.N., Morgunova S.B.
National Research University "MPEI",
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14
deniger@mail.ru

FAST DECOMPOSITION ON PROPER VECTORS IN MULTIDIMENSIONAL SPACE

We have proposed method to calculate proper vectors for a data set. This method faster than Karhunen-Loeve expansion in two important cases: for multidimensional (dimension comparable with the number of points in set) phase space, on when we need only a few first vectors of decomposition.

Possibly, this method may be useful for solving the tasks where the expansion on proper vectors is usually applied.

To avoid these difficulties of the Karhunen–Loeve expansion (KLE), we will use main idea of decomposition: we want to reproduce our data set by the orthogonal vectors oriented in the 'main directions'. In KLE we mean that 'main

directions' satisfied to conditions $\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\vec{q}^i \vec{v}^j)^2 \rightarrow \max$, i.e. deviation of \vec{v}^j from the set of \vec{q}^i is minimal. In this paper we propose another way to define 'main directions'.

Let us consider a data set \vec{q}^i (as described above) and a hyperplane H , crossing a zero point (that is center of mass of the set) and defined by its normal vector \vec{v} . Then we find a center of mass for points \vec{q}^i in both half-spaces relatively H . In fine, we demand that both centers of mass must lie along 'main direction' \vec{v} . Exactly, we find a vector \vec{v} from equation

$$\vec{v} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M k_i \vec{q}^i, \text{ where } k_i = \text{sign}(\vec{v} \vec{q}^i) \quad (1)$$

Equation (2) represents not only idea, but also the way for calculations: we may use (1) as the iterative map to find \vec{v} (i.e. use (1) as $\vec{v}^{(n)} \rightarrow \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M k_i^{(n-1)} \vec{q}^i$).

We may also normalize \vec{v} , if we want.

Equation (1) may be used to find all vectors $\vec{v}^j, j=1..N$, but we must recalculate vectors $\vec{q}^i, i=1..M$ after finding vector \vec{v}^j by projecting \vec{q}^i on the orthogonal plane to \vec{v}^j :

$$\vec{q}^i \rightarrow \vec{q}^i - \vec{v}^j (\vec{q}^i \vec{v}^j), \quad (2)$$

if vector \vec{v}^j is normalized.

This method gives economy on time in special tasks when we have few points in multidimensional space. For example, this decomposition may be useful in pattern recognition problems, where we have comparable amounts of attributes and patterns.

Gerasimov D.N., Morgunova S.B.
National Research University "MPEI",
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14
deniger@mail.ru

DETECTING CHAOS IN TIME SERIES

Usual methods to discover the chaotic nature of the time series are 1) the calculation of the Lyapunov exponent, 2) the calculation of the correlation integral. The last method allows to calculate the correlation dimension (corresponding to the Renyi entropy for $d=2$).

In this work we discuss another procedure to detect chaos in time series.

a) Let us consider time series $X_i, i=0,1..N-1$, where i corresponds to the time moment t_i . Time gaps are the same: $t_1-t_0=\dots=t_{N-1}-t_{N-2}=\tau$.

b) Constructing cross-section $X=R$ with the same sign of dX/dt , we can obtain time values t_j , $j=0,1\dots M$ corresponded to intersections. At each value t_j the system shows the same value $X=R$, so for $M>1$ there may be three different cases: periodic, random, chaos. Each case corresponds to the certain type of the dynamics of initial system.

c) Calculate $T_k=t_{k+1}-t_k$, $k=0,1\dots M-1$ – time gaps between two consecutive intersections $X=R$.

d) Set $\{T_k\}$ has different capacities (the Minkowski dimensions) \dim_C for different types of dynamics of initial system. This dimension \dim_C can be calculated through correlation integral with the box-counting method, for example.

The basic idea: the set $\{T_k\}$ is a Cantor-like, i.e. this set has the property of the self-similarity.

This method works properly, at least, for the Lorenz attractor with the addition of white noise.

The method can be useful not only to discover chaos in usual time series, when a quantity is measured at fixed intervals. This method is rather useful for the measurements when the time gaps corresponding to the certain (critical) value are measured directly.

Горшенин А.С., Краснова Н.П., Рахимова Ю.И.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,

Самара, 443100, Молодогвардейская, 244

JuliyRahimova@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА АЛЮМИНИЕВОГО СЛИТКА ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ

В настоящее время изделия из алюминиевых сплавов находят все большее применение. Одним из способов производства таких изделий является горячее прессование. Полуфабрикатами служат алюминиевые слитки, получаемые способом непрерывного литья в охлаждаемый кристаллизатор. Как известно [1], при литье круглых алюминиевых слитков в охлаждаемый кристаллизатор ускоренное охлаждение слитков при литье ведет к появлению неравновесной структуры. Такие дефекты в слитках ухудшают их качество, что непременно выясняется на этапе прессования.

Для устранения таких дефектов проводят термическую обработку слитков. Одним из видов термической обработки является гомогенизационный отжиг. Важное значение на структуру сплава оказывает скорость охлаждения после гомогенизации. При медленном охлаждении слитка после гомогенизации успевает произойти распад твердого раствора алюминия с легирующими компонентами. Сплав приобретает повышенную пластичность и может деформироваться при

меньших удельных давлениях и с большими скоростями. При быстром охлаждении слитка после гомогенизации выше температуры перехода основных легирующих элементов в твердый раствор происходит закалка сплава. Слиток получается более однородным и прочным, что с одной стороны способствует получению более высоких механических свойств полуфабрикатов вследствие однородной структуры и повышения температуры рекристаллизации, а с другой – требует более высоких усилий деформации. Таким образом скорость охлаждения слитка после гомогенизации не должна превышать критическую скорость охлаждения [2].

Регулирование скорости охлаждения можно несколькими способами, одним из них является выдержка слитков после гомогенизации в камере охлаждения. Авторами предложена конструкция камеры с конвективным способом охлаждения алюминиевых слитков воздухом. Для расчета температуры авторами предложена математическая модель охлаждения одиночного слитка

$$\frac{(T_1 - t_{\text{в}})}{(T_0 - t_{\text{в}})} = \exp(-Bi \cdot F_0 \cdot 4) \quad (1)$$

Уравнение (1) представляет собой математическую модель охлаждения одного алюминиевого слитка. Здесь T_1 - конечная температуры охлаждения слитка, T_0 - начальная температура охлаждения слитка, т. е. температура, с которой слиток начинает охлаждаться, $t_{\text{в}}$ - температура охлаждающего воздуха, F_0 - критерий Фурье. Данное уравнение позволяет в дальнейшем построить модель охлаждения ряда из нескольких слитков.

Список литературы

1. Одинцов М.В. Анализ процесса литья алюминия в кристаллизаторе с подвижным дном // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы междунар. Заоч. Науч. конф. (г. Санкт-Петербург, март 2011 г.)./ Под общ. Ред. Г.Д. Ахметовой.- СПб.: Реноме, 2011.- С.126-129.
2. Металловедение алюминия и его сплавов: Справ. изд. 2-е изд., перераб. и доп./ Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н. и др. – М.: Металлургия, 1983. С. 280.

*Грибин В.Г.¹, Тищенко А.А.¹, Алексеев Р.А.¹, Гаврилов И.Ю.¹, Попов В.В.¹,
Тищенко В.А.¹*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
gavriloviy@mpei.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ СЕПАРАЦИОННОЙ ЩЕЛИ В СОПЛОВЫХ РЕШЕТКАХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Применение систем внутриканальной сепарации в последних ступенях конденсационных паровых турбин способствует снижению интенсивности эрозионного износа поверхностей рабочих лопаток и повышению эффективности и надежности работы турбомашин. Основная цель подобных систем – организовать удаление водяной пленки с поверхностей сопловых лопаток, которая является источником крупных капель. Процесс формирования жидкой пленки является крайне сложным. Он связан как с взаимодействием полидисперсных потоков частиц влаги с поверхностями межлопаточных каналов, так и с межфазовым взаимодействием (динамическим и термодинамическим). Кроме того, геометрия обводов самой лопатки существенно влияет на особенности формирования водяной пленки. В настоящей работе рассматривается методика расчета, позволяющая оценить распределение основных параметров пленки вдоль поверхностей профилей и определить оптимальное местоположение сепарационной щели, обеспечивающее максимальную эффективность удаления жидкости из проточной части паровой турбины.

В качестве исследуемого объекта использовалось плоское поперечное сечение сопловой решетки с повышенной сепарационной способностью. Ее геометрические характеристики соответствуют ступеням реальных машин. В качестве граничных условий применялись параметры, характерные для периферийных сечений последних ступеней мощных паровых турбин. На входе в исследуемую решетку задается полидисперсный состав капель с различными начальными скоростями и направлением движения, полученный в результате измерения этих характеристик на работающих турбинах.

Численное исследование проводилось в два этапа. Сначала в CFD пакете моделировалось движение влажно-парового потока в решетке, и определялись основные характеристики основной (паровой) фазы в межлопаточном канале. Эти данные использовались для моделирования движения капель и водяной пленки. Для этих целей использовалась разработанная авторами и экспериментально апробированная численная

модель. Она позволяет описать процесс движения частиц жидкой фазы, характер их взаимодействия с поверхностью лопатки, формирование, развитие и срыв водяной пленки.

В результате исследования определены распределения основных характеристик жидкой пленки вдоль образующих решетки – толщина, скорость, расход. Получены данные по дисперсному составу жидкой фазы за решеткой, сформированному в результате взаимодействия капель с поверхностью сопловой решетки и срыва водяной пленки. Эти данные позволяют проанализировать особенности формирования жидкого слоя на поверхности сопловых лопаток в проточной части турбины и определить оптимальное положение сепарационной щели, при котором обеспечивается максимальная эффективность влагоудаления.

Представленная методика расчета дает разработать эффективную систему внутриканальной сепарации на этапе проектирования проточной части паровых турбин.

Грибиненко Д.В.¹, Молчанов А.М.¹

¹ ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, 125993, Волоколамское шоссе, 4
dgribinenko@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «UNIVERSE», ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Проблема создания отечественного программного кода для решения задач аэрокосмической техники является в настоящее время одной из наиболее приоритетных. Представленный в данной работе программный комплекс «Universe» предназначен для решения широкого круга задач, связанных с аэро-термогазодинамикой высокоэнтальпийных газовых и гетерогенных течений.

Математическая модель [1] включает: модель турбулентности, учитывающую влияние высокоскоростной сжимаемости на интенсивность турбулентного смешения; систему уравнений, описывающих неравновесную химическую кинетику горения углеводородных топлив, газофазные химические реакции в пламени твердотопливного двигателя, химические реакции диссоциации и ионизации воздуха; систему уравнений, описывающих механизмы колебательного энергетического обмена и спонтанную излучательную дезактивацию колебательных мод; методику расчета многофазных

течений, в которой уравнения для газа и для твердых частиц записываются в комплексной постановке Лагранжа-Эйлера; методику расчета разреженных газов на основе решения квазигазодинамических уравнений [2]; метод расчета ионизированного высокоскоростного потока в условиях термической и химической неравновесности с учетом взаимодействия движущейся электропроводящей сплошной среды с электромагнитным полем.

При разработке программного комплекса «Universe» учитывались следующие требования: 1) максимально оптимизированный программный код, учитывающий особенности современных аппаратных систем; 2) хорошая масштабируемость на вычислительном кластере; 3) код написан на достаточно высоком уровне абстракции, позволяющем с минимальными затратами вносить, отлаживать и тестировать изменения в вычислительных алгоритмах.

Программный комплекс «Universe» состоит из следующих основных компонентов:

Интерфейс пользователя, который является одновременно pre- и post- процессором. Он отвечает за загрузку сетки, задание граничных условий и параметров вычислительных алгоритмов, первоначальное распределение нагрузки на вычислительные узлы в кластере, формирование файла с заданием, а также просмотр и обработку результатов. Данный компонент написан на языке C++ с использованием библиотеки графического интерфейса Qt5 и библиотеки визуализации VTK.

Решатель. Загружает файл с заданием, распределяет задание среди вычислительных узлов и производит расчёты. Написан на C++ с использованием библиотеки линейной алгебры Blaze.

Одной из основных особенностей реализации решателя является применение библиотеки, реализующей среду выполнения (runtime system) для высокопроизводительных параллельных вычислений HPX (High Performance ParalleX) [3]. Данная библиотека позволяет описать зависимости между отдельными вычислительными задачами (tasks) в виде графа. Планировщик заданий ставит задачу на выполнение, как только были удовлетворены все её зависимости, что позволяет избежать лишней синхронизации присущей «fork-join» параллелизму (OpenMP, Intel TBB, и т. д.).

Список литературы

1. **Молчанов А.М.** Математическое моделирование гиперзвуковых гомогенных и гетерогенных неравновесных течений при наличии сложного радиационно-конвективного теплообмена / А. М. Молчанов. - М. : МАИ, 2017. - 159 с.

2. **Елизарова Т.Г.** Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений / Т.Г. Елизарова. - М.: Научный Мир, 2007. – 350 с.
3. High Performance ParalleX (HPX). DOI: 10.5281/zenodo.598202

Губаревич Т.А.¹, Клементьев А.А.¹, Минко К.Б.^{1,2}, Яньков Г.Г.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,
Калуга, 248023, Степана Разина, 26
minkokb@gmail.com.

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ НАТЕКАНИЯ КОНДЕНСАТА В ПУЧКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ

В работах [1,2] разработана модель (ниже CFD модель) для расчета процесса конденсации пара на пучке гладких горизонтальных труб из движущейся парогазовой смеси (ПГС) и верифицирована с привлечением экспериментальных данных [3]. В этой модели для внешнего потока ПГС используются уравнения однофазной гидродинамики, энергии и диффузии. Граничные условия (ГУ) для указанных уравнений на поверхности пленки конденсата в приближении малой (по сравнению с диаметром труб) толщины пленки задаются на внешней поверхности труб. Параметры, необходимые для задания ГУ, определяются из решения одномерных уравнений для пленки. Натекание конденсата на трубу с вышерасположенных труб учитывалось в предположении, что конденсат из точки отрыва движется вертикально вниз и падает на нижерасположенную трубу. Для более детального анализа моделей натекания конденсата в настоящей работе был выполнен расчет конденсации чистого пара на вертикальном ряду труб с режимными характеристиками и геометрическими параметрами конструкции, соответствующими характеристикам и параметрам работы [3]. Расчеты выполнены с использованием двух моделей: CFD модели, упомянутой выше, и упрощенной модели, в основу которой положено аналитическое решение, аналогичное решению Нуссельта для конденсации неподвижного пара на горизонтальном цилиндре. Предполагалось, что по охлаждающей воде трубы соединены последовательно «сверху-вниз», тем самым характерная разность температур ΔT (насыщения и внешней стенки трубы) уменьшалась с возрастанием номера трубы, отсчитываемого от верхней трубы. Теплоотдача к воде рассчитывалась по известной формуле Петухова-Кириллова. Рассматривались три варианта: 1) натекание конденсата с вышерасположенных труб не учитывалось;

- 2) натекание конденсата учитывалось аналогично подходу Якоба (симметричное натекание);
- 3) натекание конденсата считалось несимметричным, т.е. весь конденсат с верхних труб попадал только на одну половину нижерасположенной трубы.

При анализе распределения средних коэффициентов теплоотдачи по высоте ряда для варианта 1 наблюдался рост теплоотдачи «сверху-вниз», связанный с уменьшением ΔT . Для 2-го варианта характерно монотонное падение, аналогичное классической зависимости Якоба. Для варианта 3 наблюдалась немонотонная зависимость: вначале происходило падение среднего коэффициента теплоотдачи, за которым следовал его незначительный рост и выход практически на постоянное значение. Результаты расчета для третьего варианта качественно аналогичны данным, полученным с использованием CFD модели.

CFD-расчеты были выполнены в среде кода ANES [4]. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01604).

Список литературы

1. **A mathematical** model of forced convection condensation of steam on smooth horizontal tubes and tube bundles in the presence of noncondensables / К.В. Минко, В.И. Артемов, Г.Г. Янков, О.О. Мильман // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 140. P. 41–50.
2. **Численное** моделирование конденсации пара при течении парогазовой смеси в канале переменного сечения с пучком гладких горизонтальных труб/ К.Б. Минко, В.И. Артемов, Г.Г. Янков, В.С. Крылов // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С 68–76.
3. **Высокоэффективный** конденсатор пара из парогазовой смеси / О.О. Мильман, В.С. Крылов, А.В. Птахин, А.В. Кондратьев, Г.Г. Янков // Теплоэнергетика. 2017. № 12. С. 16–26.
4. **Код ANES**. [Электрон. ресурс.] URL: <http://anes.ch12655.tnweb.ru/> (дата обращения: 10.05.2020).

*А.С. Гузеев*¹, *С.З. Сапожников*², *В. Ю. Митяков*², *В.В. Сероштанов*²,
*В.В. Сучок*², *А.С. Власов*², *Н.А. Жидков*²

¹ ФГУП Крыловский Государственный научный центр,
Санкт-Петербург, 196158, Московское шоссе, 44

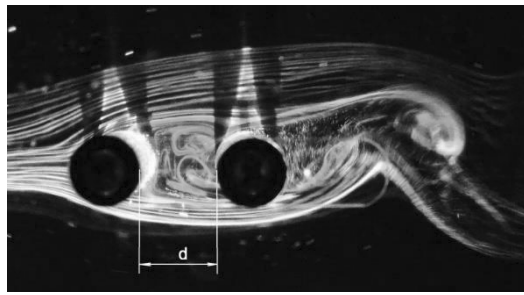
² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29
vladvik1992@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ДВУХ ЦИЛИНДРОВ

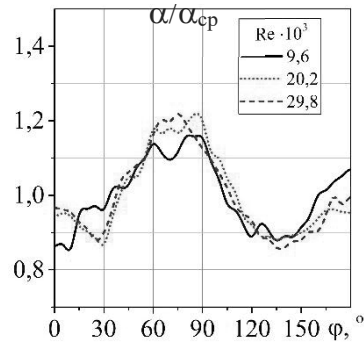
При создании рекуперативных теплообменников важно выявить связь между течением и распределением плотности теплового потока на теплообменных поверхностях. Представлены результаты исследований структуры вихревого течения и теплообмена вблизи двух круговых цилиндров, расположенных на различном расстоянии по потоку. Сопоставлены картины течения в гидро- и аэродинамической трубах. Плотность теплового потока измерена методом градиентной теплотрии.

Вертикальная гидродинамическая труба имеет прозрачный рабочий участок сечением 150×150 мм [1]; диапазон скоростей $W = 4...50$ см/с, диаметр цилиндров $d = 12$ мм. Второй цилиндр располагался на расстоянии от первого, равном d , $2d$, $3d$ и $4d$ на свободной подвеске, позволяющей перемещать его поперек потока. По результатам опытов установлено, что если второй цилиндр находится в зоне отрыва потока за первым, то на нем не возникают поперечные силы, и он остается неподвижным (колебания отсутствуют). Если второй цилиндр располагается за зоной отрыва, то на него набегает переменные вихри противоположных направлений, вызывающие периодические поперечные силы, и цилиндр начинает колебаться. С удалением второго цилиндра интенсивность вихрей уменьшается, при этом уменьшаются и поперечные силы.

Опыты в аэродинамической трубе с визуализацией течения методом PIV выполнены при сходных режимах и геометрии. На втором цилиндре был установлен градиентный датчик теплового потока (ГГДТП) из монокристаллического висмута [2], а цилиндр мог проворачиваться вокруг оси на азимутальный угол φ . Схема позволила получить распределение плотности теплового потока по полуповерхности цилиндра в зависимости от угла φ . Результаты опытов в гидро- и аэродинамической трубах представлены на рис. 1.



а)



α - местный КТО;
 α_{cp} - средний по
 поверхности КТО.

б)

Рис. 1. Визуализация вихревого течения (а); распределение безразмерного КТО по поверхности цилиндра (б).

Результаты исследований показали удовлетворительное совпадение картин вихревого течения, а градиентная теплотометрия позволила выявить особенности теплообмена вблизи второго цилиндра в зависимости от геометрических и режимных параметров.

Список литературы

1. **Гузев А.С.** Вихреобразование вблизи палуб морских судов и инженерных конструкций. Под ред. Ю.Н. Дубнищева, Б.С. Ринкевичуса. Оптические методы исследования потоков: Труды XV Международной научно-технической конференции 24-28 июня 2019. М.: Издательство «Перо», 2019 [Электронное издание]. Стр. 71-80.
2. **Mityakov, A., et al. (2017).** Hydrodynamics and heat transfer of yawed circular cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 333-339.

Davidzon M. I.
 Ivanovo State University
 Russia, 153025 Ivanovo, Ermaka, 39
 davease@mail.ru

ON LINEAR AND NONLINEAR APPROXIMATION IN THE THEORY OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER

In the simplest case of a heated liquid being incompressible and no mass forces present, a system of linear equations for convective heat transfer can be written in the form of (1-4):

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \nabla v = - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\eta}{\rho} \Delta \vec{v} \quad (1) \quad \frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \nabla T = \frac{\lambda}{\rho c} \Delta T \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (2) \quad q = \alpha (T_w - T) \quad (4)$$

Here \vec{v} is velocity vector; t is time; ρ is liquid's density; P is pressure; η is dynamic viscosity coefficient; ∇ and Δ are Hamilton and Laplace operators; λ is liquid's thermal conductivity coefficient; C is liquid's specific heat at a constant volume; q is heat flux surface density (heat flux); α is heat transfer coefficient (heat exchange coefficient); T is liquid's temperature (in International System of Units SI).

Currently, this system of equations (1-4) is widely used for solving various heat transfer problems – regardless of liquid's flow patterns and sizes of channels, where heat transfer occurs. However, there are some experimental data that cannot be explained within the framework of this theory. For example, it is known that when liquid's flow pattern in channels changes from laminar to turbulent, its velocity profile becomes more filled up, i.e. tends to be more uniform. As a result, liquid's flow rate through the same cross-section of a channel increases. And something similar also happens to a temperature profile at a channel's cross section. But linear Navier-Stokes equations and energy equations do not imply a possibility that different velocity and temperature profiles can exist.

Expression (4) presumes an obligatory linear relationship between surface density of a heat flux and temperature difference. But experiments show that in reality, when liquid gets heated up in channels, this dependence is not linear. This experimentally obtained conclusion suggests that a system of linear equations (1-4) does not adequately describe convective heat transfer. Perhaps, this is due to a fact that when Navier-Stokes equations and energy equations are being derived, only linear hypotheses are used: Newton's linear hypothesis (on proportionality of friction stress to velocity gradient), and Fourier's linear hypothesis (on proportionality of heat flux surface density to the temperature gradient). If we replace linear hypotheses with power-law hypotheses [1], and stop using Newton's law of cooling [2, 3] (which is also not consistent with the first law of thermodynamics), it will allow us to write a nonlinear system of equations in the form of (5-8):

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \nabla v = - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \frac{A}{(n+1)} \Delta \vec{v}^{n+1} \quad \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \nabla T = \frac{1}{\rho C} \cdot \frac{B}{n+1} \Delta T^{n+1} \quad (5) \quad (7)$$

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (6) \quad q = \frac{f}{\Pi} \rho C v \frac{d\langle T \rangle}{dx} \quad (8)$$

where f is the cross section of the channel where liquid flows; Π is channel's perimeter; A , B , n are some constants.

The system of equations (5-8) allows calculating laminar transitional and turbulent flows, and, at least qualitatively, describes changes in velocity and temperature profiles during transition from a laminar flow to a turbulent one. When these changes take place, coefficients of viscosity and thermal conductivity also change. And if $n = 0$, linear Navier-Stokes and energy equations become a particular case of nonlinear equations.

References

1. **Davidzon M.Y.** On Navier-Stokes Equations in Theory of Convective Heat Transfer. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012041.
2. **Davidzon M.Y.** First Law of Thermodynamics in Vector Form and Convective Heat Transfer// American Journal of Physics and Application, 2018. V. 6. N.6. pp. 147-153.
3. **Davidzon M.Y.** Newton's Law of Cooling and Its Interpretation // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012. V. 55. pp. 5397-5402.

Давлетшин И.А.^{1,2}, *Мухеев Н.И.*¹, *Шакиров Р.Р.*¹

¹ Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН,

420111, Казань, Лобачевского, 31/2

² КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева,

420111, Казань, К. Маркса, 10

davlet60@mail.ru

ТЕПЛООБМЕН И СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОМ ДИФФУЗОРЕ

Выявление особенностей гидродинамических и тепловых процессов в градиентных течениях остается актуальной задачей современной теплофизики [1-3]. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований теплоотдачи и кинематической структуры течений в плоском диффузорном канале. Проведены измерения коэффициента теплоотдачи по длине канала. Оптическим методом проведены измерения двумерных полей скорости в осевом сечении канала. Построены профили скоростей и характеристик турбулентности в характерных сечениях.

На рис. 1 представлены результаты исследований тепловых и гидродинамических процессов в диффузоре с углом раскрытия $2,5^\circ$ при различных значениях скорости теплоносителя (воздуха при атмосферных условиях). Канал имел длину 1,8 м. Его высота на входе составляла 28 мм, на выходе – 100 мм, ширина – 150 мм. Эксперименты проводились в диапазоне расходов воздуха $Q=(128 - 338)$ м³/ч. Нагрев стенки электрическим током обеспечивал граничное условие по конвективному теплообмену близкое к $q=\text{const}$.

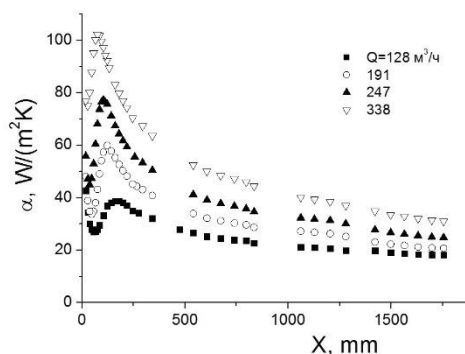


Рис. 1. Распределение коэффициента теплоотдачи на стенке диффузора.

Из графиков (рис. 1) видно, что на начальном участке диффузора распределения коэффициента теплоотдачи α имеют характер и значения соответствующие ламинарному режиму течения. Далее наблюдается рост теплоотдачи связанный с ламинарно-турбулентным переходом. Турбулентный участок показывает монотонно убывающие зависимости теплоотдачи по длине канала, связанные с понижением скорости потока.

Анализ полученных данных показал, что в качестве определяющей скорости для коэффициента теплоотдачи следует рассматривать среднерасходную скорость теплоносителя во входном сечении диффузора.

Проведено сопоставление тепловых параметров с характеристиками кинематической структуры потока. Показано, что повышение исходной степени турбулентности потока интенсифицирует теплообмен главным образом за счет более раннего ламинарно-турбулентного перехода на начальном участке диффузора.

Исследования теплообмена выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00889), структуры потока - при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-19-00355).

Список литературы

1. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин. М.: «Энергия», 1970. 384 с.
2. **Rend R. R., Sparrow E. M., Bettenhausen D. W., & Abraham J. P.** Parasitic pressure losses in diffusers and in their downstream piping systems for fluid flow and heat transfer // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Т. 61. P. 56-61.
3. **Hain R., Scharnowski S., Reuther N., Kähler C. J., Schröder A., Geisler R., ... & Cuvier C.** Coherent large scale structures in adverse pressure gradient turbulent boundary layers // 18th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal. 2016. P. 04-07.

Девянин В.А.

slava.devyanin@gmail.com

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ НА ДЫРЧАТЫХ ЛИСТАХ БАРБОТАЖНЫХ АППАРАТОВ ТЭС И АЭС НА РАЗМЕР ОТРЫВНЫХ ПУЗЫРЕЙ

Дырчатые листы нашли широкое применение в барботажных аппаратах ТЭС и АЭС как в качестве распределительных устройств пара (парогенераторы АЭС, барабаны паровых котлов и т.д.), так и в качестве устройств диспергирования газовой фазы в слой жидкости, находящейся на дырчатом листе, в котором происходят процессы массообмена или очистки пара от мелкодисперсной капельной влаги (испарители, выпарные аппараты и т.д.). Для моделирования гидродинамических процессов, протекающих как в первом, так и во втором случае очень важно иметь возможность оценивать как средний диаметр отрывных пузырей, образующихся на отверстиях дырчатых листов, так и распределение их по размерам в зависимости от физических свойств двухфазной среды, геометрических размеров дырчатых листов и высоты двухфазного слоя.

подавляющее количество имеющихся в литературе данных получены для условий работы оборудования в химической промышленности. При этом в основном исследовалось образование пузырей на одиночных отверстиях. Для режима истечения газа в виде отдельных пузырей имеется ряд зависимостей, которые можно применить в области энергетике только при очень низкой нагрузке зеркала испарения.

После защиты кандидатской диссертации на кафедре ТЭС МЭИ была начата работа по изучению образования пузырей на отверстиях дырчатых листов, которая продолжилась вовремя прохождении научной стажировки в Техническом университете Клаусталя ФРГ. В продолжение проведенных в институте Термических технологий исследований /1/ автором были проведены эксперименты по изучению процессов образования пузырей на дырчатых листах в режиме струйного истечения воздуха при нагрузках, соответствующим нагрузкам энергетических аппаратов.

Основные результаты этой работы были доложены на конференции /2/, а затем и опубликованы. В статье /3/ путем сравнения экспериментальных данных и экстраполяции зависимости /4/ показано, что формула, полученная для пузырькового режима истечения газа, может быть успешно использована для расчета среднего отрывного диаметра пузырей для единичных отверстий в струйном режиме. Так же путем обобщения экспериментальных данных получен поправочный коэффициент, позволяющий рассчитывать средний по поверхности диаметр отрывных пузырей для погруженных дырчатых листов /5/.

Несмотря на пройденное с тех пор время, в литературе до сих пор отсутствуют как рекомендации по расчету отрывных пузырей, образующихся на дырчатых листах с низким уровнем жидкости, так и распределения отрывных пузырей по размерам при высоких нагрузках зеркала испарения.

В связи с вышесказанным, целью настоящей работы является разработка методики расчета вышеперечисленных параметров на основе как ранее опубликованных данных, так и экспериментальных данных, публикуемых впервые.

При обработке экспериментальных данных получены степенные зависимости среднего диаметра d_{B10} , среднего диаметра по объему d_{B13} и среднеквадратичного отклонения s_{10} от среднего значения диаметров отрывных пузырей, образующихся на дырчатых листах различной геометрии, от определяющих параметров в широком диапазоне изменения нагрузки зеркала испарения и уровня воды над дырчатым листом. Сравнения расчетных и экспериментальных данных показало, что расхождение не превышает 10%.

Выбрав за основу гамма-распределение и используя полученные формулы d_{B10} и s_{10} были проведены сопоставления экспериментальных данных распределений отрывных пузырей по размерам с расчетными. Сходимость данных эксперимента и расчетов получилась хорошая.

Список литературы

1. Schwarzer J., Dewjanin W., Vogelpohl A. Primaerblasenbildung an Lochplatten –Mechanismen,Umstroemung und Groessenverteilung // Chem.Ing.Tech. 1990. Vol.62. №2. S.144-145.
2. Dewjanin W., Schwarzer J.,Vogelpohl A. Einfluss des Lochdurchmessers, der Teilung und der Fluessigkeitshoehe auf die Primaerblasengroesse an Siebboeden //Fortrag auf der GVC-Fachuasschussitzung “Mehrphasenstromungen” von 22.2-23.2.1990 in Stuttgart.
3. Девянин В.А. Влияние диаметра отверстия на размер отрывных пузырей. Теплоэнергетика // 1992. №8. С.62-65.
4. Mersmann A. Druckverlust und Schaumhoehen von gasdurchstroemten Fluessigkeiten auf Siebboeden. VDI-Forschungheft 491, VDI-Verlag, Duesseldorf 1962.
5. Девянин В.А. Влияние геометрических характеристик дырчатых листов на размер отрывных пузырей // Теплоэнергетика. 1994. №6. С.42-46.

Демидов А.С.¹, Тупотилов И.А.¹, Захаренков А.В.¹, Локтионов В.Д.¹,
Дедов А.В.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
ZharenkovAV@mpei.ru

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАБОЧЕГО УЧАСТКА ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Введение.

Согласно прогнозам, мировое население достигнет 10 миллиардов к середине 21 века. В связи с ростом населения, возникает необходимость в наращивании электрической мощности, и одним из путей развития мировой энергетики является термоядерное направление. В настоящее время по всему миру расположены десятки исследовательских термоядерных реакторов различных типов и конструкций.

Одной из главных проблем термоядерных экспериментальных установок является стационарное длительное удержание плазмы, а также ряд сопутствующих проблем, среди которых можно выделить охлаждение и термостабилизацию внутрикамерных элементов реактора, обращенных к плазме.

Наиболее многообещающим методом охлаждения высокотемпературных поверхностей является использование двухкомпонентного потока теплоносителя. Для создания дисперсной смеси капель используются так называемые «форсунки», которые способны создавать равномерно распределенный поток теплоносителя. К настоящему времени в мире известно огромное количество различных типов и конструкций «форсунок», различающихся как по принципу своей работы, так и по назначению.

Описание установки.

Испытательный стенд состоит из трех основных систем:

- Система равномерного по периметру нагрева рабочего участка, созданная на основе высокочастотного генератора ВЧ-60АВ и подключенного к нему индуктора.
- Система охлаждения рабочего участка, предусматривающая контроль за теплогидравлическими параметрами теплоносителя.
- Система сбора и обработки информации, созданная на основе оборудования L-Card и ПО LabView.

Рабочий участок выполнен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т в виде трубки, с внешним диаметром 24 мм, при толщине стенки 4 мм. Для

контроля за температурой рабочего участка используются заранее откалиброванные термопары ХА и ХК.

Создание диспергированного потока обеспечивается за счет форсунки со следующими характеристиками:

- 1) Используемый теплоноситель: дистиллированная вода и воздух (или инертные газы, такие как азот и аргон)
- 2) Массовый расход теплоносителя: вода – $0.014 \div 0.070$ кг/с, воздух – $(0.4 \div 3.0) \cdot 10^{-3}$ кг/с
- 3) Диаметр получаемых капель – $10 \div 100$ мкм

Результаты работы.

Получены экспериментальные данные по температуре стенки рабочего участка для следующих диапазонов рабочих параметров: массовый расход воды и воздуха $G_{\text{water}} = (0.014 \div 0.060)$ кг/с, $G_{\text{air}} = (1.5 \div 3.0) \cdot 10^{-3}$ кг/с, давление воды и воздуха $p_{\text{water}} = (1 \div 5) \cdot 10^5$ Па, $p_{\text{air}} = (1 \div 10) \cdot 10^5$ Па, нагревательная мощность $N_{\text{el}} = (1 \div 17)$ кВт. Для данной форсунки определены оптимальные параметры теплоносителя, при которых прекращается повышение эффективности отвода тепла.

Предварительный анализ полученных результатов показывает, что применение данного способа охлаждения позволяет эффективно отводить тепло от рабочего участка без его повреждения при тепловых нагрузках порядка $\approx (2 \div 2.5)$ МВт/м².

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (соглашение № 19-79-00271).

Деревич И.В., Хан Зо Тун
Московский Государственный
Технический Университет им. Н.Э.Баумана
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА В ТРУБАХ С ГЛАДКИМИ И ШЕРОХОВАТЫМИ СТЕНКАМИ

Введение. Транспорт дисперсных материалов в каналах является важным элементом энергетического и химико-технологического оборудования. Дисперсные турбулентные потоки широко встречаются в природных явлениях. Энергетические затраты на транспортировку дисперсных материалов определяются расходами газовой и дисперсной фаз и преобразованием импульса частиц при соударении со стенками каналов. В работе представлена вероятностная модель движения частиц при турбулентном течении в каналах с гладкими и

шероховатыми стенками. Показано, что механизмы генерации турбулентности дисперсной фазы в каналах с гладкими и шероховатыми стенками принципиально различны.

Теоретические методы. Модель построена с использованием вероятностного подхода. Выведено замкнутое уравнение для функции плотности вероятности (ФПВ) распределения скорости и координаты частиц в турбулентном неоднородном потоке (Derevich and Zaichik, 1990). На основе метода Грэда найдено решение уравнения для ФПВ, учитывающее градиенты осредненных параметров потока в линейном приближении. На основе этого приближенного решения получена замкнутая система уравнений для первых и вторых моментов параметров частиц и граничные условия, учитывающие преобразование аксиальной и нормальной компонент импульса частиц при соударении с шероховатой поверхностью. Проведены расчеты турбулентного течения газа с частицами в канале с гладкими и шероховатыми стенками.

Некоторые результаты расчетов. Здесь мы представляем сопоставление небольшую часть результатов расчета среднеквадратичных скоростей частиц в гладком и шероховатом каналах.

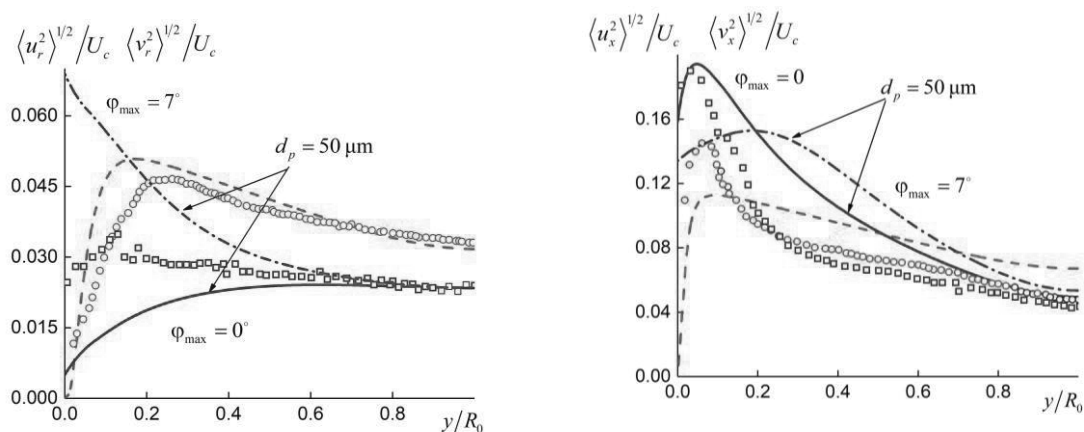


Рис. 1. Распределение среднеквадратичной радиальной и аксиальной скорости газа и частиц в канале с гладкими стенками. Точки – экспериментальные данные (Fong et al., 2019) для гладкого канала, кривые – расчет. Кружки – газ, квадраты – частицы. Штрихпунктирная кривая – шероховатый канал.

Заключение. В гладком канале флуктуации скорости частиц возникают в результате вовлечения примеси в турбулентные флуктуации скорости газа. В результате преобразования скорости на шероховатой поверхности существенно увеличивается интенсивность флуктуаций скорости частиц. Дисперсия флуктуаций скорости частиц в шероховатом канале может заметно превосходить дисперсию турбулентных флуктуаций скорости частиц в канале с гладкими стенками.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта № 20-08-01061).

Список литературы

1. Derevich I.V., Zaichik L.I. An equation for the probability density, velocity, and temperature of particles in a turbulent flow modelled by a random gaussian field// Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 1990. V. 54. P.631-637.
2. K.O. Fong, O. Amili, F. Coletti. Velocity and spatial distribution of inertial particles in a turbulent channel flow// Journal of Fluid Mechanics. 2019. V. 872. P. 367–406,

*Дмитриев С.М., Герасимов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В.,
Лыскова В.Э., Рубцова Е.В., Рязанов А.В., Хробостов А.Е.*

Нижегородский государственный технический

университет им. Р.Е. Алексеева, 603950,

Нижний Новгород, Минина, 24

nevid000@mail.ru

ГИДРОДИНАМИКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР С ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИМИ СБОРКАМИ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики потока теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА–Т и ТВСА-Т.mod.2 [1].

Моделирование процессов течения потока теплоносителя в пучке твэлов проводились на аэродинамическом стенде [2]. Исследования осуществлялись на модели фрагмента смешанной активной зоны реактора ВВЭР, состоящей из одного сегмента ТВСА–Т и двух ТВСА-Т.mod.2. Измерение поля давлений потока проводилось, пятиканальным пневмометрическим зондом [3]. Полученное поле давлений потока согласно зависимостям, полученным при тарировке, пересчитывалось в направление и величину вектора скорости теплоносителя. Для получения детальной картины течения потока была выделена характерная область поперечного сечения модели, включающая межкассетное пространство и четыре ряда твэлов каждой из топливных сборок ТВСА.

В рамках реализации данного исследования был проведен анализ пространственного распределения проекций скорости потока теплоносителя, который позволил выявить закономерности обтекания теплоносителем дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток ТВСА, были

определены величины поперечных потоков теплоносителя, вызванных обтеканием гидравлически неидентичных решеток и установлена их локализация в продольном и поперечном сечениях экспериментальной модели, а также был выявлен эффект накопления гидродинамических возмущений потока в продольном и поперечном сечениях модели, вызванный шахматным расположением гидравлически неидентичных решеток.

Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–Т и ТВСА-Т.mod.2 приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР и включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики и детального поэлементного расчета активной зоны реакторов ВВЭР.

Список литературы

1. **Дмитриев С.М., Зверев Д.Л., Бых О.А., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Фарафонов В.А.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / – М.: Машиностроение. – 2013.
2. **Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР // Атомная энергия. - 2012. - Т 113. - Вып. 5. - С. 252-257.
3. **Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.** Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов // Приборы и методы измерений. – 2015 – Т. 6. – Вып. 2. – С. 188–195.

*Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Рязанов А.В., Добров А.А.,
Доронков Д.В., Легчанов М.А., Рубцова Е.В., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н.*
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ)
Нижний Новгород, 603950, Минина, 24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В НАПОРНОЙ КАМЕРЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЗДУШНОЙ И ВОДЯНОЙ РАБОЧИХ СРЕД

Для районов с децентрализованным энергоснабжением целесообразно размещать ядерные реакторы в составе атомных станций малой

мощности. Разрабатываемые перспективные проекты АСММ основываются на технологиях судовых ЯЭУ. Это влечёт за собой потребность в проведении работ по обоснованию безопасности как новых конструктивных элементов ядерного реактора, так и режимов работы самой энергетической установки. Неотъемлемой частью данного процесса являются работы по обоснованию теплотехнической надёжности активной зоны. Обоснование теплотехнической надёжности невозможно без точных входных данных полей скорости и температуры. Всё это определяет высокую степень актуальности исследований процессов перемешивания петлевых потоков теплоносителя в опускной камере ядерного реактора.

Изучение перемешивания турбулентных потоков теплоносителя в геометрии, характерной для современных ядерных энергетических установках, не многочисленны. Проведённые работы не дают ответа на вопросы масштабируемости результатов на более высокие числа Рейнольдса, влияние отдельных параметров, входящих в этот критерий, на процессы турбулентно смешения. Данный факт обуславливает необходимость проведения экспериментальных исследований явлений, которые могут существенно влиять на безопасность энергоустановки.

В проведённом комплексном экспериментальном исследовании изучению было подвержено явление перемешивания петлевых потоков теплоносителя внутри модели опускной камеры ядерного реактора. Экспериментальные работы проводились на двух экспериментальных стендах НГТУ им. Р.Е. Алексеева (высоконапорный аэродинамический стенд и гидродинамический стенд исследования смешения потоков), исследуемая масштабная модель ядерного реактора обладала конструктивными элементами, характерными для петлевых ядерных установок (опускной кольцевой тракт, нижняя напорная камера). Экспериментальные исследования были проведены в диапазоне чисел Рейнольдса (Re) от 20 000 до 50 000. При помощи пневмометрического зонда в экспериментах исследовано поле осевых скоростей на входе в имитатор активной зоны модели реактора. Для экспериментального изучения температурного поля в эксперименте использовался метод диффузии примесей. Моделирование потока с отклоняющимися характеристиками осуществляется введением в одну из петель контрастного трассера. Концентрация на входе в имитатор активной зоны даёт возможность оценивать степень перемешивания потоков. В качестве контрастной примеси применялся пропан (C_3H_8) в экспериментах с воздушным потоком, а также сульфат натрия (Na_2SO_4) в экспериментах в водной среде.

Проведено исследование процесса межпетлевого перемешивания потоков теплоносителя в напорной камере модели реактора в двух областях: опускной кольцевой канал и нижняя напорная камера. Анализ

экспериментальных данных показал хорошее согласование результатов экспериментальных исследований воздушного потока с исследованием процессов перемешивания при использовании водяного теплоносителя. Показано, что:

- увеличение числа Re от 20 000 до 50 000 не вносит существенного влияния на характер процесса турбулентного перемешивания потоков;
- влияние осецентрального вихря преобладает над тороидальным и поперечным вихрём, в результате чего в нижней напорной камере нет ярко выраженного процесса перемешивания потоков. В связи с чем не происходит сильного размытия пятна контрастного трассера относительно последнего сечения опускной камеры;
- в основном перемешивание межпетлевых потоков было обусловлено конвективным переносом в опускной камере модели реактора, в результате чего обнаружена малая величина турбулентного переноса в напорной камере. Максимальные относительные концентрации трассера в напорной камере составили величину $\sim 0,45$ от концентрации в подающей ветке. Минимальные относительные концентрации вводимой примеси в напорной камере модели реактора находились в диапазоне 0,05-0,09.

Дмитриев А.С.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
asdmiriev@mail.ru

О НОВОМ МЕХАНИЗМЕ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И ГЕНЕРАЦИИ ПАРОВОЙ ФАЗЫ ПРИ КОНТАКТЕ ЖИДКОСТИ С ПЕРЕГРЕТЫМ ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

В настоящее время строго показано, что радиационный теплообмен между телами при расстояниях между ними $\delta > \lambda_T = c\hbar / k_B T$ (при комнатной температуре $\lambda_T \approx 10$ мкм) определяется законом Стефана–Больцмана, который является следствием квантовой теории Планка для черного излучения. В этом предельном случае передача тепла определяется бегущими электромагнитными волнами, излучаемых телами в области дальнего поля. При $\delta < \lambda_T = c\hbar / k_B T$ на основе разработанной флуктуационной электродинамики теоретически было предсказано и экспериментально подтверждено, что радиационный тепловой поток между двумя телами с разными температурами в области ближнего поля может быть на много порядков больше предела, который устанавливается законом Планка для излучения черного тела [1,2]. Это увеличение связано с вкладом от неоднородных (безызлучательных) электромагнитных волн, амплитуда которых экспоненциально уменьшается при удалении от поверхности (из-за быстрого затухания неоднородные волны не дают

вклада в передачу тепла в области дальнего поля). Таким образом, если между двумя телами (например, жидкостью и твердым телом), которые в рамках флуктуационной электродинамики отличаются только комплексными показателями преломления, имеется заметная разность температур, то между ними может возникать тепловой поток на малых расстояниях (порядка микрометров при комнатных температурах и сотен нанометров при нескольких сотнях градусах), существенно превышающий тепловой поток Стефана-Больцмана. Последнее может приводить к сверхбыстрому вскипанию тонкого слоя жидкости (на глубине проникновения неоднородных электромагнитных волн), что приведет к формированию паровой фазы не в области непосредственного контакта перегретого твердого тела с жидкостью, а на некотором расстоянии от области контакта.

В рамках данной работы построен новый механизм переноса тепла и генерации паровой фазы при контакте жидкости с перегретым твердым телом. Главной особенностью предложенного механизма является эффект быстрого появления тонкого слоя жидкости между перегретым твердым телом и паровой полостью за счет эффекта ближнего радиационного поля. В этом случае вклад теплопроводности (фононного переноса тепла) ослабляется, хотя на малых расстояниях в узких наноразмерных областях на контакте твердого тела и жидкости также возможно не только фотонное, но и фононное туннелирование. Эти процессы радикально меняют традиционные представления о контакте жидкости с перегретым твердым телом и о механизмах зарождения паровой фазы. Помимо сказанного, отмеченные выше эффекты, могут играть основную роль при нагреве наножидкостей близи сильно перегретых поверхностей. Что очень важно для механизмов генерации пара при объемном испарении в солнечной теплоэнергетике [3].

Рассмотренный механизм может играть основную роль в механизме триггера для возникновения парового взрыва, в контакте жидких капель с перегретой поверхностью в эффекте Лейденфроста, эволюции нанопузырей при быстром разогреве поверхностей, на которых они находятся []. Следует особо подчеркнуть, что из-за имеющихся всегда на поверхности твердого тела нанощероховатостей, твердое тело и жидкость разделены нанополостями с низким давлением газа в них (фактически, вакуумными зазорами) [].

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФ № 17-19-01757.

Список литературы

1. Введение в нанотеплофизику / А.С. Дмитриев. М.: Изд. БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015. 792 с.

2. Electromagnetic Fluctuations at the Nanoscale. Theory and Applications / **A. Volokitin and B. Persson**. Springer, Heidelberg. 2017. 425 p.
3. **А.С. Дмитриев, А.В. Клименко**. Преобразование солнечного излучения в пар – новые возможности на основе наноматериалов (обзор). Теплоэнергетика. 2020. № 2. С. 1–16.
4. **I. Sher, R. Harari, R. Reshef, E. Sher**. Film boiling collapse in solid spheres immersed in a sub-cooled liquid. Applied Thermal Engineerin. 2012. 36. 219-226.
5. **D. Lohse and X. Zhang**. Surface nanobubbles and nanodroplets. Rev. Mod. Phys. 2015. 87. 981.

Дмитриев А.С.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
asdmiriev@mail.ru

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПАР В СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

В последние годы, в связи с активным развитием солнечной теплоэнергетики на новых материалах, значительно усилился интерес к точным моделям расчета эффективности преобразования солнечного излучения в пар с использованием наноматериалов и наноконструкций [1]. Вместе с тем, солнечный нагрев обычно происходит неравномерно по объему или поверхности испарения, часть потока излучения переотражается, часть уходит в потери за счет теплообмена с окружающей средой и т.п. [2,3]. Помимо этого, поскольку при объемном нагреве и испарении часть солнечной мощности идет на нагрев наноконструкций, необходимо точно учитывать потери на повышение температуры твердой фазы, на нагрев паровых пузырей, причем последние могут нести на своей межфазной границе наноконструкцию, что затрудняет точные оценки диссипации тепла за счет подобного механизма.

В данном исследовании проведен точный анализ эффективности объемного преобразования солнечного излучения в пар, получены критерии эффективности, выведены соотношения для расчета скорости генерации пара, проведены расчеты скорости генерации и объема генерируемого пара как для случая одного солнца, так и с учетом использования концентраторов солнечного излучения, в том числе, для нескольких солнц. Рассмотрен вклад концентрации наноконструкций в объеме рабочей наножидкости при солнечном испарении, показано, что имеет место немонотонный характер влияния концентрации на скорость испарения. На рис.1. представлены результаты вычислений для

наножидкостей вода+графеновые хлопья различной концентрации скорости испарения и эффективности преобразования в пар солнечного излучения различной удельной мощности (различное число солнц, в случае использования концентраторов). Нетрудно видеть, что с ростом концентрации графеновых хлопьев эффективность конверсии воды в пар заметно увеличивается, а тепловые потери снижаются. Это является важнейшим фактором использования подобных рабочих тел.

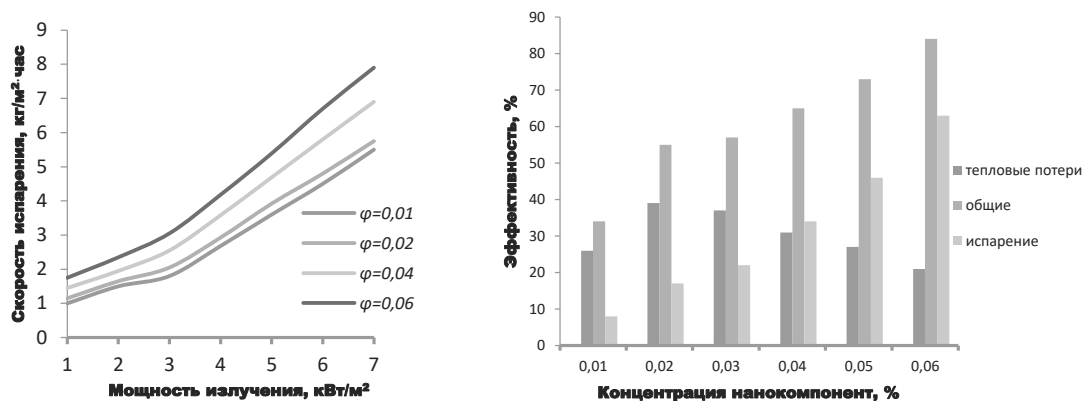


Рис.1. Скорость испарения под действием солнечной радиации (слева) и эффективность преобразования в пар (справа)

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФ № 17-19-01757.

Список литературы

1. А.С. Дмитриев, А.В. Клименко. Преобразование солнечного излучения в пар – новые возможности на основе наноматериалов (обзор). Теплоэнергетика. 2020. № 2. С. 1–16.
2. S. Wu, G. Xiong, H. Yang et al. Scalable Production of Integrated Graphene Nanoarchitectures for Ultrafast Solar-Thermal Conversion and Vapor Generation. Matter. 2019. №1, October 2, P. 1017–1032.
3. X. Liu, X. Wang, J. Huang, G. Cheng and Y. He. Volumetric solar steam generation enhanced by reduced graphene oxide nanofluid. Applied Energy. 2018. 220. P. 302–312.

Дмитриев А.С., Михайлова И.А.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА И ГЕНЕРАЦИИ ПАРА ГРАФЕНОВЫМИ ХЛОПЬЯМИ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ КОНЦЕНТРИРОВАННОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В последнее время интерес к нагреву наножидкостей с графеновыми хлопьями значительно усилился в связи с рядом обнаруженных эффектов при нагреве и генерации пара. Среди таких эффектов – высокое поглощение, быстрый нагрев графеновых хлопьев до высоких температур, активная и быстрая генерация микроскопических пузырьков пара, их быстрый отрыв от графеновых хлопьев (отрывные размеры пузырьков заметно меньше, чем их критический размер в макроскопических условиях), также сильная неравновесность температуры жидкости и пара. Указанные явления играют важную роль при исследовании эффективности преобразования излучения в пар в солнечной теплоэнергетике [1,2].

В данной работе получены новые экспериментальные данные по нагреву графеновых жидкостей (вода + графеновые хлопья различной концентрации), по скорости генерации пара в графеновой наножидкости и данные измерений температуры жидкости и пара в процессе нагрева концентрированными источниками солнечного излучения. Эксперименты проводились на солнечном имитаторе, а также при воздействии лазерного излучения на наножидкости. Получены кривые пространственного поглощения излучения в наножидкостях, кривые температуры жидкости и пара, а также другие параметры взаимодействия излучения с наножидкостью графеновые хлопья + вода. Помимо этого, показано, что под действием солнечного излучения планковского спектра с использованием капиллярных подложек, покрытых слоями графена, можно получать чистую обессоленную воду.

Построены модели нагрева графеновых хлопьев излучением, отмечен новый механизм нагрева окружающей жидкости при теплообмене с графеновыми хлопьями на основе флуктуационного электромагнитного излучения ближнего поля, интенсивность которого в несколько раз может превышать интенсивность излучения абсолютно черного тела на характерных масштабах менее длины волны [3]. Подобный механизм передачи тепла позволяет с высокой интенсивностью разогревать тонкие слои окружающей графеновые хлопья жидкости, приводя к формированию микроскопических пузырьков пара. Показано, что температура графеновых хлопьев может достигать 550-600 °С при концентрации солнечного излучения 4-5 кВт/м² (четыре-пять солнц). При

этом температура генерируемого пара может составлять 470-510 °С, а температура окружающей жидкости, даже при десятиминутном нагреве менее 65 °С. Важнейшую роль в создании подобной температурной неравновестности играет высокое термическое сопротивление Капицы на границе раздела жидкость-графеновые хлопья, а также механизм генерации и всплытия пузырьков пара, отрывной диаметр которых, в силу особого смачивания жидкостью 2D структур (графеновых хлопьев).

Эффективность нагрева графеновой наножидкости можно оценить по приведенному ниже соотношению, используя экспериментальные данные по скорости генерации пара при нагреве излучением.

$$\eta_T = (dm / dt)L / Q_a = \{C \cdot (T_b - T_0)(dm / dt) + L\} / Q_a \approx 71\%$$

где (dm / dt) – масса пара, генерируемая при солнечном нагреве; L – удельная теплота парообразования; Q_a – поглощенная мощность солнечного излучения.

Представленные результаты имеют важное значение в новых технологиях конверсии солнечной энергии в пар, электрическую энергию и получение чистой и обессоленной воды [4].

Авторы благодарят А.В. Клименко за обсуждение различных проблем солнечной теплоэнергетики и Н.Ф. Ивлева за помощь. Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФ № 17-19-01757.

Список литературы

1. **А.С. Дмитриев, А.В. Клименко.** Преобразование солнечного излучения в пар – новые возможности на основе наноматериалов (обзор). Теплоэнергетика. 2020. № 2. С. 1–16.
2. **S. Wu, G. Xiong, H. Yang et al.** Scalable Production of Integrated Graphene Nanoarchitectures for Ultrafast Solar-Thermal Conversion and Vapor Generation. Matter. 2019. №1, October 2, P. 1017–1032,
3. Введение в нанотеплофизику / **А.С. Дмитриев.** М.: Изд. БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015. 792 с.
4. **J. Huang, Y. He, M. Chen, X. Wang.** Separating photo-thermal conversion and steam generation process for evaporation enhancement using a solar absorber. Applied Energy. 2019. 236. 244–252.

Дроздов С.М., Ртищева А.С.
Центральный аэрогидродинамический институт,
140180 Жуковский, Жуковского, 1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ГИПЕРЗВУКОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ

При работе гиперзвуковых аэродинамических труб (АДТ) для достижения требуемых чисел Маха в сопле и рабочей части необходимо подогреть воздух, а затем охлаждать перед подачей в эжекторную систему. В ЦАГИ существуют установки, специально предназначенные для проведения испытаний на термостойкость материалов объектов ракетно-космической техники при аэродинамическом нагреве, где температура торможения в форкамере сопла может достигать значений $T_0=5000$ К (при давлении $p_0 \sim 12$ атм).

За счет теплопередачи через стенки рабочего тракта, которые чаще всего выполняют охлаждаемыми, можно отвести $\sim 20-25$ % тепловой мощности, однако температура торможения в ядре гиперзвуковой струи, взаимодействующей с поверхностью теплообменника-охладителя, остается примерно равной температуре торможения в форкамере сопла. Поэтому теплообменник, применяемый в гиперзвуковых АДТ, должен иметь высокую эффективность при сравнительно небольших габаритах. Кроме того, поверхность охлаждения, взаимодействующая с центральной струей, должна перераспределять тепловую нагрузку, делая ее более равномерной, чтобы избежать деформаций или повреждений конструкции всего теплообменника.

В настоящей работе рассмотрены два качественно различных варианта теплообменника-охладителя: вариант-1, в котором охлаждаемый поток движется в большом количестве продольных трубок, помещенных в общий отсек с охлаждающей водой, циркулирующей в межтрубном пространстве, и вариант-2, представляющий собой пучок труб (рассматривались трубки круглого или эллиптического сечения), в которых движется охладитель – вода, а охлаждаемый поток поперечно протекает в межтрубных зазорах.

В работе реализован ранее отработанный и экспериментально верифицированный подход численного моделирования течения и теплообмена, согласно которому во всех областях рабочего тракта (форкамере, сопле, рабочей части, диффузоре, холодильнике) программным комплексом ANSYS FLUENT (лицензия ЦАГИ № 501024) решаются осесимметричные уравнения Навье-Стокса для вязкого и теплопроводного газа с использованием модели турбулентности Spalart-Allmaras [1, 2]. Для моделирования работы в тракте АДТ первого варианта теплообменника в его объеме к уравнениям газодинамики добавлен закон

сопротивления пористой среды (закон Дарси). Свойства переноса (вязкость и теплопроводность) потока моделировались на основе молекулярно-кинетической теории газов из предположения о том, что в тракте движется смесь: N_2 , O_2 , Ar , CO_2 в пропорциях, соответствующих воздуху. Химические реакции, происходящие, в основном, в форкамере сопла, не учитывались, но учитывалась зависимость эквивалентной удельной теплоемкости смеси от температуры $C_p=f(T)$. В ходе исследования были получены поля чисел Маха, статического давления и температуры, давления и температуры торможения. На рис.1 представлена структура течения в холодильном модуле (вариант-1).

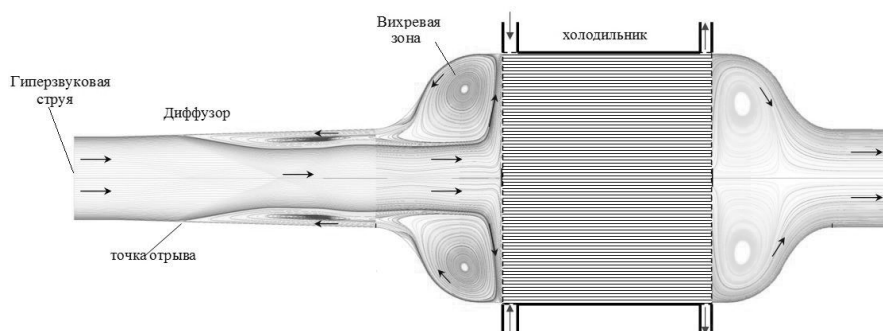


Рис. 1. Структура течения в холодильном модуле

Результаты исследования показали, что перераспределение тепловой нагрузки, которую несет центральная гиперзвуковая струя, возможно при использовании теплообменника варианта-1 без центральных трубок. Применение варианта-2 проблематично, так как центральные трубки с охлаждаемой водой испытывают очень большие тепловые нагрузки. При этом использование змеевидных трубок невозможно, так как внутри центральных трубок первого ряда могут образовываться паровые пробки, приводящие к их разрыву.

Список литературы

1. Дроздов С.М., Давлеткильдеев Р.А., Ртищева А.С. Numerical and experimental investigation of air flow and heat transfer in a complete circuit of a hypersonic wind tunnel // Материалы Международной конференции HiSST: International Conference on High-Speed Vehicle Science Technology. Москва, 2018.
2. Дроздов С.М., Давлеткильдеев Р.А., Ртищева А.С. Численное и экспериментальное исследование течения и теплообмена воздуха в полном тракте гиперзвуковой аэродинамической трубы // Ученые записки ЦАГИ, Том L, № 2, 2019. – С.24-34.

Дроздов С.М., Ртищева А.С.
Центральный аэрогидродинамический институт,
140180, Жуковский, Жуковского, 1

РАСЧЕТ ОБТЕКАНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ЗАТУПЛЕННОГО КОНУСА ПРИ ГИПЕРЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ ПОЛЕТА

При сходе с орбиты, после отработки тормозного импульса, характерная скорость полета возвращаемого космического аппарата (ВКА) на высоте $H=70$ км близка к первой космической ($v=7,42$ км/с, $M=25$). Длительный полет при таком числе Маха ($\tau > 300$ с) может привести к разрушению конструкции аппарата из-за высоких тепловых нагрузок. Поэтому необходимо выполнить расчеты обтекания и теплообмена элементов конструкции ВКА, подверженных наибольшему тепловому нагружению.

В работе рассмотрен затупленный конус с углом полураствора $\varphi \approx 7^\circ$ и двумя радиусами сферического затупления r_1 и $r_2 = \frac{2}{3}r_1$ как наиболее распространенная форма носка гиперзвукового аппарата.

Задача решалась на основе двух подходов. Согласно первому подходу, отдельно моделировались внешнее обтекание с учетом равновесного излучения поверхности конуса и затем - внутренняя теплопередача в твердотельной конструкции конуса. При втором подходе решалась сопряженная задача внешнего обтекания и внутреннего теплообмена.

С помощью пакета программ ANSYS FLUENT (лицензия ЦАГИ № 501024) численно моделировалось ламинарное течение реального воздуха, представляющего собой пятикомпонентную смесь газов: O_2 ; N_2 ; O ; N ; NO , с учетом протекания химических реакций, описанных в работе [1].

На входе в расчетную область были заданы следующие граничные условия: $M=25$; давление $p=5,22$ Па; температура $T=219,6$ К. Массовые доли компонентов воздуха: $g(O_2)=0,23$; $g(N_2)=0,77$. На выходе расчетной области задавались неотражающие условия с давлением $p=5,22$ Па. Внешняя поверхность твердотельной конструкции была принята некаталитичной, имеющей степень черноты $\varepsilon=0,8$.

На рис. 1 представлены результаты расчета обтекания и теплообмена конуса с радиусом затупления r_1 при угле атаки $\alpha=0^\circ$.

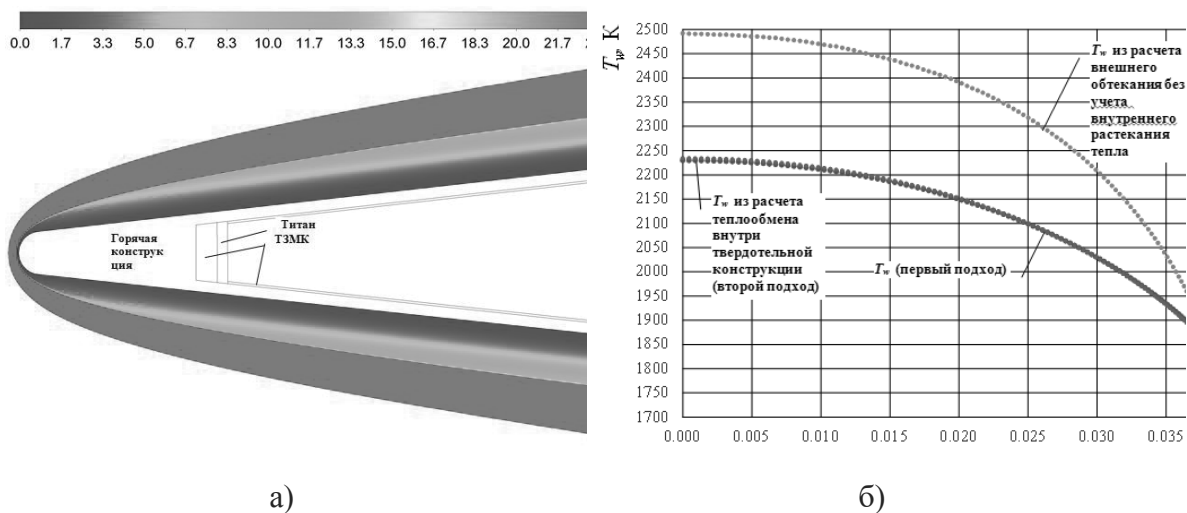


Рис. 1. Распределение параметров: чисел Маха – а; температуры поверхности конуса – б

Применение теплопроводной твердотельной конструкции способствовало снижению температуры поверхности вблизи передней критической точки с $T_{\max}=2492,1$ К до $T_{w\max}=2233,9$ К. Разница величин температуры, полученных на основании двух рассмотренных подходов, составила не более 4 К.

Для радиуса закругления r_2 было получено снижение температуры с $T_{\max}=2296,6$ К до $T_{\max}=2077,6$ К.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что для носовой части гиперзвукового летательного аппарата необходимо применять конструкции из теплопроводного материала повышенного радиуса закругления. Показано, что применение метода раздельного решения задач внешнего обтекания и внутреннего теплообмена обосновано и позволяет значительно экономить вычислительные ресурсы, особенно в трехмерном случае.

Список литературы

1. Горшков А.Б. Сравнение характеристик гиперзвукового обтекания, полученных с использованием двух программ при решении уравнений Навье-Стокса применительно к треугольному крылу // Космонавтика и ракетостроение, №5 (90), 2016. – С.66-74.

Дуников Д.О.^{1,2}, Борзенко В.И.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А
ddo@mail.ru

МЕТАЛЛОГИДРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВОДОРОДА ДЛЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОДОРОДНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Турбогенераторы с водородным охлаждением широко используются в энергетике благодаря тому, что коэффициент теплопередачи от нагретой поверхности к водороду в 13,5 раз выше, чем к воздуху. Почти две трети турбогенераторов, установленных на тепловых станциях России имеют водородное или водородно-водяное охлаждение [1].

Обеспечение чистоты водорода является одновременно и условием безопасности, и условием повышения эффективности охлаждения, поскольку по мере роста чистоты водорода, повышаются его теплоемкость и теплопроводность, и существенно снижаются плотность и вязкость. Чистота водорода в турбогенераторах с косвенным водородным охлаждением должна быть не ниже 97%, с непосредственным – не ниже 98% [2].

Повышение чистоты водорода до 99% и выше приводит к снижению вентиляционных потерь. Согласно расчетам при работе турбогенераторов серии ТВВ с давлением водорода 0,4 МПа повышение чистоты водорода на 1% дает выигрыш ~15 кВт на каждые 100 МВт мощности турбогенератора [3]. С ростом мощности и давления водорода в корпусе машины эта величина может возрасти в полтора-два раза.

Применение металлгидридов для очистки водорода основано на свойстве избирательной абсорбции водорода из газовых смесей. Ранее нами была продемонстрирована возможность применения металлгидридов для очистки водорода в системах охлаждения турбогенераторов с применением реакторов периодического действия типа РХО-3 [3]. Однако, эксперименты показали, что доля потерь водорода для такой системы составляет порядка 30%.

Нами было предложено использовать в системе очистки водорода реакторы проточного действия типа РХО-8, которые даже для бедных смесей позволяют добиваться высоких (свыше 80%) коэффициентов извлечения водорода [4]. В работе рассмотрена новая схема системы очистки водорода, основанная на фильтрации смеси через засыпку металлгидрида. Существенное влияние на эффективность работы системы оказывает проницаемость засыпки. Экспериментально показано, что проницаемость засыпки металлгидрида существенно зависит от

концентрации водорода в металле: в негидрированном состоянии проницаемость засыпки интерметаллида $\text{LaNi}_{4.8}\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{0.1}$ составляет порядка 0.16 мкм^2 , снижаясь по мере насыщения водородом более чем в 5 раз – до 0.03 мкм^2 . Для повышения проницаемости металлгидридных засыпок и улучшения тепломассопереноса предложено использовать композитные компакты из металлгидрида с высокотеплопроводными и высокопористыми материалами, такими как вспененные металлы.

Список литературы

1. Основы современной энергетики. Т. 2. Современная электроэнергетика. Под ред. Е.В. Аметистова. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 632 с.
2. ГОСТ 533+2000. Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия.
3. Борзенко В.И., Дуников Д.О., Малышенко С.П., Чубраева Л.И. Металлогидридная технология очистки водорода для водородоохлаждаемых турбогенераторов // Известия РАН. Энергетика. 2012. №3. С. 151-166.
4. Dunikov D., Borzenko V., Blinov D., Kazakov A., Lin C. Y., Wu S. Y., Chu C. Y. Biohydrogen purification using metal hydride technologies // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Т. 41. № 46. С. 21787-21794.

Duplyankin R.A.¹, Glazkov V.V.¹, Ivochkin Y.P.², Kubrikov K.G.²,

Sinkevich O.A.¹

¹ National Research University "MPEI", Russia, 111250 Moscow,
Krasnokazarmennaya, 14

² Joint Institute for High Temperature RAS, Russia, 125412 Moscow,
Izhorskaya, 13/2
ivochkin@yandex.ru

SUBCOOLED POOL FILM BOILING HEAT TRANSFER FROM SPHERE: EXPERIMENT AND MODELLING

Introduction. When trying to develop a model of film boiling upon the surface of an object immersed in subcooled liquid, the following difficulty arises. The flow of heat from the surface of the heated object is causing not only the evaporation of the liquid on the vapor film-liquid interface but also some unknown part of the heat flow is heating the liquid in the volume into which the heated object is submerged. To calculate correctly this effect is rather difficult, as virtually no data on the heat transfer coefficient from the surface of the vapor film directly into the subcooled liquid is available. In this work an attempt is

made to determine this heat transfer coefficient based upon experimental data for the frequency of bubble detachment in subcooled pool film boiling on the metal sphere.

Experimental setup. The metal sphere under study (stainless steel, 10 mm diameter) was heated by an inductor up to a temperature of 2000 K. In the experiment, the sphere was placed on a ceramic stand in a special transparent ditch inside the inductor's coil, fig. 1. To prevent the surface of the sphere from oxidizing, the ditch was filled with argon. The temperature of the sphere during the experiment was determined by optical methods. When the sphere reached a set temperature, distilled water was fed into the installation from below. The experiment was conducted at atmospheric pressure, subcooling of water ranged from 20 K to 90 K. The height of the water column over the metal sphere during the experiment was fixed and ranged from 10 to 180 mm. The process was recorded on Canon (MV500i) and Redlike (MotionScope1000) digital video cameras. The water temperature was measured by thermocouples of various types. Kistler (601A) and PCB (HSM 113A28) sensors were used to record pressure pulses. Among other parameters during the experiments were measured the shape and departure frequency of vapor bubbles from the upper forming of the sphere.

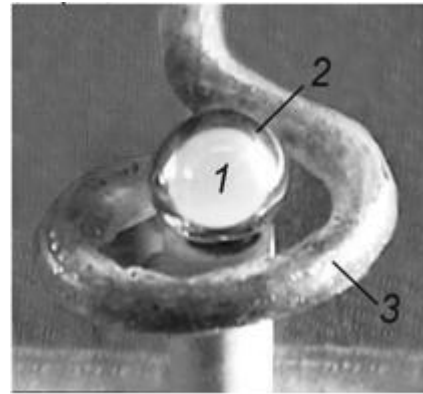


Fig.1. Experimental setup: 1 – heated metal sphere; 2 – vapor film covering sphere; 3 – high frequency inductor.

Numerical model. On the basis of balance ratios, a model to calculate the thickness of the vapor film and the speed of vapor flow within the film in film boiling was formulated. The model is conceptually close to the model developed in [1]. However, our model is able to take into account the subcooling of the liquid to the state of saturation. The resulting model was tested on experimental data for the pool film boiling of various liquids and for Leidenfrost drops. The results were compared with the experimental data [1-3]. The model includes capillary (quasi-static) detachment mechanism for low growth rates, and inertial (for high growth rates) mechanism for vapor bubble detachment from the surface of the vapor film. There is agreement with experimentally determined detachment frequency in saturated liquid [4]. However, the use of the developed model for boiling of a subcooled liquid is difficult, as there is no data on heat transfer coefficient from the surface of the vapor film directly into the subcooled liquid.

Results. In processing of the experimental data the heat transfer coefficient was initially used, calculated in assumption of developed natural convection on a solid sphere. However it was found that this assumption leads to a very significant (up to two orders) overestimation of the frequency of bubble

detachment compared to the experiment. Thus, the calculation showed that the heat exchange at the vapor-liquid interface is much more intensive and it is not determined solely by the natural convection in the liquid covering the steam film.

Using the developed model, based on the experimental data obtained, the dependence of the heat transfer coefficient on the surface of the subcooled liquid on the surface temperature of the sphere is obtained. Other dependences are also defined (for the estimated speed of vapor in the film, the thickness of the film, etc.). The abnormally high value of heat transfer coefficient could be important in many practical applications.

The experimental part of the study was carried out with financial support from the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-08-00955).

References

1. Sobac B., Rednikov A., Dorbolo S., Colinet P. Leidenfrost effect: Accurate drop shape modeling and refined scaling laws, *Physical Review E*, 90 (2014). 165-167.
2. Burton J. C., Sharpe A. L., Van der Veen R. C. A., Franco A., Nagel S. R. Geometry of the Vapor Layer Under a Leidenfrost Drop, *Physical Review Letters*, 109(7) 074301 (2012).
3. Frederking T. H. K., Chapman C., Wang S. Heat Transport and Fluid Motion During Cooldown of Single Bodies to Low Temperature, *Advan. Cryog. Eng.* (1965) 353-360.
4. Frederking T.H.K., Daniels D.J. The relation between bubble diameter and frequency of removal from a sphere during film boiling, *J. Heat Transfer Transactions of the ASME*, 88(1) (1966) 87-93.

Душин Н.С.¹, Исаев С.А.², Михеев Н.И.¹, Шакиров Р.Р.¹

¹ Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН,
420111, Казань, Лобачевского, 2/31

² ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,
196210, Санкт-Петербург, Пилотов, 38
ndushin@bk.ru

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КАНАЛА С ДВУХРЯДНЫМИ ТРАНШЕЙНЫМИ ЛУНКАМИ

В работе [1] предложена концепция нового поверхностного вихрегенератора в виде наклонного удлиненного овально-траншейного углубления. Потенциал поверхностей с такими вихрегенераторами был показан при численном моделировании обтекания одиночной лунки [1] и течения в канале с однорядным расположением лунок [2]. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления для двухрядного расположения таких углублений (лунок).

Измерения выполнены в канале высотой 10 мм, шириной 100 мм и длиной 800 мм в диапазоне чисел Рейнольдса от 1000 до 40000, вычисленному по эквивалентному диаметру и среднерасходной скорости. Скорость течения регулировалась с использованием калиброванных критических сопел. Геометрические размеры лунок и их расположение относительно направления потока показаны на рис.1.

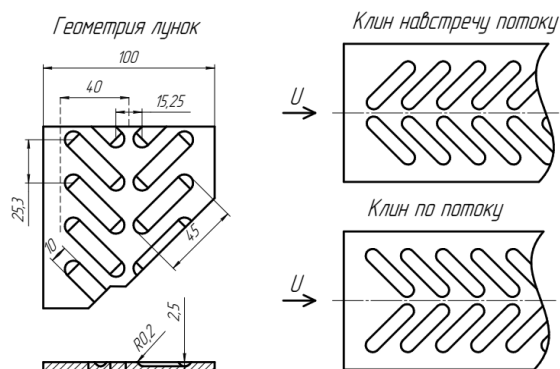


Рис. 1. Геометрия поверхности с лунками

Измерение перепада давления выполнялось на участке установившегося течения с использованием датчиков Метран-150СД и Прома-ИДМ.

Было исследовано шесть конфигураций канала, отличающихся условиями формирования потока на входе (каналы с плавным входом и острыми кромками на входе), наличием поверхностных интенсификаторов теплообмена, направлением установки поверхности с лунками (клином по потоку и клином навстречу потоку). Результаты измерений представлены на рис. 2. Установлено, что по сравнению с гладким каналом, каналы с лунками менее чувствительны к изменению условий на входе, особенно когда лунки установлены клином по потоку.

Для каналов с лунками можно отметить два интересных факта. Во-первых, сопротивление канала с лунками, установленными клином по потоку, весьма слабо изменяется в широком диапазоне исследованных чисел Рейнольдса. Во-вторых, получена неожиданно большая разница сопротивлений канала при расположении лунок клином по потоку и навстречу потоку, от 1,6 до 2,25 раз в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса. Казалось бы, при отсутствии перетекания (в среднем) через плоскость симметрии между рядами разницы в сопротивлении быть не должно. Объяснение этого результата, по-видимому, связано с тем, что генерируемые лунками вихри для этих схем расположения занимают разное взаимное пространственное положение и по-разному взаимодействуют между собой.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ (грант №19-19-00259)

Список литературы

1. Isaev S.A. et al. Vortex heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. Vol. 109. P. 40–62.
2. Isaev S.A. et al. NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // Int. J. Heat Mass Transf. 2019. Vol. 145. P. 118737.

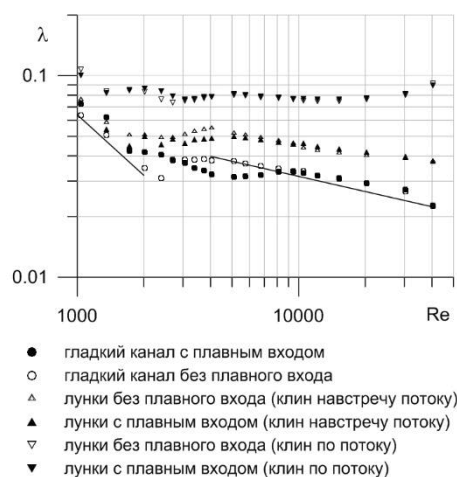


Рис. 2. Влияние лунок и условий на входе на гидравлическое сопротивление канала

Жуков В.И.^{1,2}, Брестер А.Е.¹, Павленко А.Н.², Бутько А.С.², Швецов Д.А.²

¹ Новосибирский государственный технический университет,
630073, Новосибирск, К. Маркса пр-т, 20

² Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе,
630090, Новосибирск, Академика Лаврентьева пр-т, 1
vizh@inbox.ru

ТЕПЛООБМЕН НА КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИСПАРЕНИИ/КИПЕНИИ ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Наиболее эффективными способами отвода тепла от поверхности нагрева являются процессы, связанные с использованием скрытой теплоты фазового перехода. Постоянно растущие требования к весу, габаритным размерам охлаждающих устройств и улучшению условий температурного контроля при высоких тепловых потоках приводят к необходимости разрабатывать все более эффективные методы интенсификации теплообмена при испарении и кипении. Наиболее эффективным является метод, связанный с модификацией поверхности нагрева.

В данной работе представлены экспериментальные данные по испарению/кипению н-додекана на капиллярно-пористой поверхности (рис. 1). Эксперименты проводились при высоте слоя жидкости (1.7 - 4.0) мм и в широком диапазоне давлений от 33 до $2 \cdot 10^4$ Па. Полученные результаты сравнивались с опытными данными, полученными на гладкой поверхности в работах [1, 2].

В [1] показано, что при давлении $P \geq 10^4$ Па теплообмен происходит в режиме пузырькового кипения, а при давлении $P \leq 10^3$ Па в слоях жидкости пузырьковое кипение отсутствовало, наблюдался процесс испарения с образованием структур в форме “воронок” и “кратеров”. В результате образования данных структур в тонких слоях н-додекана процесс теплообмена интенсифицируется на гладкой поверхности примерно на 70% по сравнению с пузырьковым кипением в слоях при более высоком давлении (рис. 2 (светлые символы)).

Образование структур в форме “воронок” и “кратеров” также наблюдалось на капиллярно-пористой поверхности. В режиме образования структур в форме “воронок” и “кратеров” наличие капиллярно-пористого покрытия не приводило к интенсификации



Рис. 1. Фотография капиллярно-пористого покрытия на теплоотдающей поверхности.

теплообмена при низких давлениях (рис. 2 (темные символы)) (давление 133 Па).

При пузырьковом кипении на капиллярно-пористой поверхности (10^4 Па) процесс теплообмена интенсифицировался в 2-3 раза по сравнению с данными, полученными на гладкой поверхности (рис. 2).

Анализ опытных данных показывает, что процессы испарения/кипения сопровождаются пульсациями давления, характер которых меняется в зависимости от величины теплового потока. В работе [3] показано, что с помощью метода фликкер-шумовой спектроскопии возможно извлечение полезной информации при сравнительном анализе пульсаций спектров мощности шумов измеряемых параметров (в данном случае флуктуаций давления).

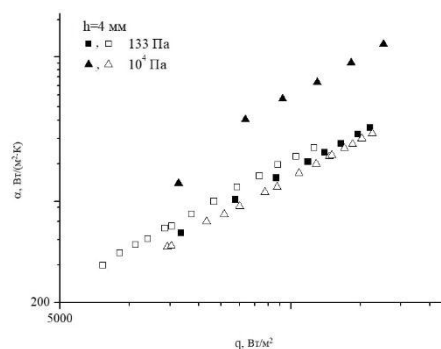


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока. Светлые символы соответствуют гладкой поверхности, а темные - капиллярно-пористому покрытию.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00180).

Список литературы

1. Жуков В.И., Павленко А. Н. Режимы с интенсификацией теплообмена при испарении в тонких горизонтальных слоях жидкости при пониженных давлениях // Письма в Журнал технической физики. 2018. Т. 44. № 12. С. 9-15.
2. Zhukov V. I., Pavlenko A. N. Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 117. P. 978-990.
3. Тимашев С.Ф., Встовский Г.В. Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе хаотических временных рядов динамических переменных и проблема отношения «сигнал шум» // Электрохимия. 2003. Т. 39. № 2. С. 156-169.

*Залкин В.И.¹, Зейгарник Ю.А.¹, Низовский В.Л.¹, Низовский Л.В.¹,
Щигель С.С.¹*

¹ Объединённый институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13 стр.2

levmobile@mail.ru

РАСПЫЛЕНИЕ ПЕРЕГРЕТОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ ВОДЫ: ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОТОНКИХ РАСПЫЛОВ И ИХ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРИМЕНЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ И ОБЪЕКТАХ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Проведено комплексное расчетно-экспериментальное исследование течения перегретой воды в распылительных соплах различного типа и дисперсионных характеристик факелов ее распыла. Анализ экспериментов, проведенных при различных видах сопел, показывает, что оптимальным вариантом распыления перегретой воды для достижения наиболее высокодисперсных факелов распыла (с преимущественно субмикронным размером капель) при T_0 на уровне 240°C и выше является распыл с применением конфузorno-диффузорных сопел [1]. Расчетный анализ течения перегретой воды в таких соплах при указанных условиях показал, что определяющим процессом при этом является быстрое («взрывное») вскипание метастабильной воды вблизи горловины сопла с последующим, также быстрым преобразованием вспененной паром жидкости в двухфазный паро-капельный поток. Месторасположение вскипания перегретой воды было подтверждено серией опытов при различной длине расширяющейся части сопел.

При больших оптических толщинах исследуемых факелов распыла применен модернизированный метод измерения интегральных индикатрис рассеяния монохроматического излучения. При этом в поток факела распыла вводились специальные световоды (миниатюрные тубусы), что позволило значительно уменьшить ослабление рассеянного излучения и влияние многократного рассеяния на его измерение. Рассмотрены также варианты изменения геометрии экспериментальных сопел и факела распыла, позволяющие уменьшить их оптическую плотность. Проведено обобщение расчетных и экспериментальных данных применительно к пузырьку критического радиуса, для которого рассмотрено соотношение энергии поверхностного натяжения к энергии, обусловленной химическим потенциалом фазового перехода. Выведенный критерий K_s зависит только от отношения давлений $R_p = P_{0sat}/P_{out}$.

Высокодисперсные распылы перегретой воды могут применяться в различных газопаровых циклах с впрыском воды в компрессор и в КС ГТУ. Такое «влажное» сжатие, когда на порядок и более

интенсифицируется испарение капель воды, как показано в [2], особенно перспективно для ГТУ малой мощности, что может повысить выходную мощность ГТУ на 12-20%, и более - с повышением степени сжатия газовых турбин. Полученные высокодисперсные впрыски воды позволяют также избежать эрозии лопаток компрессоров ГТУ при длительной работе.

Подобные впрыски перегретых жидких топлив исследуются в целях интенсификации их воспламенения, что актуально для некоторых типов ДВС и ПВРД.

Высокодисперсные распылы перегретой воды через конфузорно-диффузорные сопла перспективны также для новой противопожарной техники, продемонстрированной её разработчиками из АГПС МЧС РФ [3] с определением ОИВТ РАН высокой дисперсности получаемых распылов.

Список литературы

1. Zalkind V.I., Zeigarnik Y.A., Nizovskii V.L., Nizovskii L.V., Shchigel S.S. / Superheated water atomization: A possibility of obtaining sprays of droplets of micron diameters / High Temperature. 2018. V. 56. № 1, pp 153-155.
2. V.B. Alekseev, V.I. Zalkind, P.P. Ivanov, V.L. Nizovskiy, S.S. Schigel / Peculiarities of Thermophysical Processes of “Wet –compression” in Power units with Highly Atomized Water Injection and their Influence on Power units Operation. /High Temperature, 2019, № 4, pp 547-554.
3. Пряничников А.В., Роевко В.В., Бондарев Е.Б./ Тушение проливов нефти и нефтепродуктов метастабильными парокапельными струями воды./ Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2015№4 С.7-12.

Работа поддержана РФФИ, Грант № 19–08-00504

*Замашников В.В.*¹, *Чесноков Е.Н.*¹, *Абдуракипов С.С.*²,
*Роньшин Ф.В.*², *Семионов В.В.*², *Владимиров В.Ю.*², *Дементьев Ю.А.*²

¹ Институт химической кинетики и горения СО РАН,
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3

² Институт теплофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

s.s.abdurakipov@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

Изучение горения горючих жидкостей имеет не только фундаментальное, но и практическое значение. Известно, что при небольших скоростях пламени в жидкости под фронтом горения образуются тепловая и гидродинамическая волны, вследствие чего, жидкость прогревается, и перед пламенем образуется горючая смесь. При больших скоростях, когда в жидкости не наблюдается гидродинамическая волна, механизм образования горючей смеси перед волной горения до конца не понятен. В отличие от пламени, распространяющегося по гомогенной газовой смеси, для пламени над поверхностью жидкости необходимо дополнительное время на испарение и перемешивание паров с окислителем. Температура продуктов горения достаточно высока, поэтому при распространении пламени происходит радиационной нагрев жидкости перед пламенем. В этом случае времени для нагрева жидкости может быть достаточно. Целью настоящей работы являлся анализ возможности нагрева жидкости перед волной горения излучением от продуктов горения в условиях узкого плоского канала.

Эксперименты проводились в прямоугольном канале размером 270x42x4 мм³, на дно которого была налита горючая жидкость н-бутанол. В качестве окислительной газовой смеси использовался воздух с добавкой кислорода, подаваемый в центральную часть канала. Топливо поджигали открытым пламенем на выходе из канала. Процесс горения регистрировался цифровыми видео- и фотокамерами. После инициирования горения измерялась зависимость координаты фронта пламени от времени. Инфракрасный спектр поглощения бутанола был измерен Фурье-спектрометром. При вычислении плотности потока инфракрасного излучения пламени предполагалось, что основной вклад вносят молекулы вода и углекислого газа. Детали эксперимента описаны в работах [1, 2].

Для выяснения вклада радиационного теплообмена проведено сравнение спектра излучения пламени со спектром поглощения жидкости. Установлено, что спектр поглощения бутанола плохо перекрывается со спектром излучения нагретого газа. Основная мощность излучения сосредоточена в колебательной полосе молекулы CO₂ на 4.3 мкм, где

коэффициент поглощения жидкого бутанола близок к нулю. Настоящие исследования показали, что радиационный нагрев жидкости продуктами горения при распространения диффузионного пламени, скорее всего, не оказывает большое влияние на этот процесс.

Список литературы

1. **Zamashchikov V.V., Korzhavin A.A., Chinnov E.A.** Combustion of liquid fuel in the flat micro-and minichannels // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 102. P. 470-478.
2. **Замашчиков В.В., Коржавин А.А., Чиннов Е.А.** Исследование горения жидкого топлива в прямоугольном канале // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 4. С. 15-21.

Заноско А.И., Дедов А.В., Беляев А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
zanoskoai@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПРИ КИПЕНИИ R125 В МИЛЛИМЕТРОВОМ КАНАЛЕ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

В докладе представлена работа, посвящённая экспериментальному исследованию кризиса теплообмена в вынужденном потоке кипящего фреона R125 в канале диаметром 1 мм при высоких приведенных давлениях. В настоящее время в высокоэффективной энергетике в качестве рабочего вещества предлагается использование различных хладонов и CO₂ в сжиженном состоянии. Необходимы универсальные и апробированные методы расчета теплообмена и предельных тепловых нагрузок при кипении подобных веществ в новых энергоэффективных аппаратах. В современной технике продолжают активно развиваться и внедряться высокоэффективные теплообменные устройства с охлаждающими миниканалами, в которых в качестве теплоносителя могут использоваться различные фреоны.

Целью работы является получение систематизированного набора экспериментальных данных о критическом тепловом потоке при течении хладона в круглом миниканале в условиях высоких приведенных давлений, на основании которого будут апробированы и отобраны наиболее подходящие известные методики расчета кризиса теплообмена.

В докладе представлено описание экспериментального стенда и показаны опытные данные о критическом тепловом потоке. Для обобщения данных были отобраны наиболее известные в литературе

методы расчета. Пример обобщения данных с помощью [1, 2] показан на рис. 1.

На стенде выполнялись экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена при вынужденном течении фреона R125 в вертикальном миллиметровом канале длиной 100 мм. Гидравлический контур стенда позволяет поддерживать стабильные параметры потока на входе рабочего участка при давлениях до 2.5 МПа. Эксперименты проводились при следующих параметрах потока: массовый расход теплоносителя 500–1000 кг/м²с, давление по отношению к критическому 0.4–0.7; с помощью предварительного подогревателя на входе в рабочий участок устанавливалась различная степень насыщения жидкости, соответствующая недогретой и насыщенной жидкости. Измерения выполнялись с помощью автоматизированной системы сбора данных.

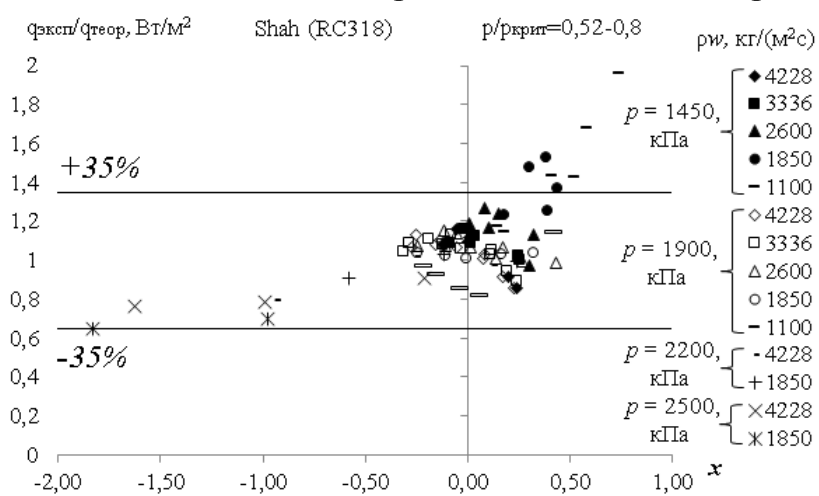


Рис. 1. Пример обобщения экспериментальных данных.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда 19-19-00410.

Список литературы

1. M.M. Shah, Improved general correlation for critical heat flux during upflow in uniformly heated vertical tubes, Int. J. Heat Fluid Flow 8 (4) (1987) 326–335.
2. M.M. Shah, A generalized graphical method for predicting CHF in uniformly heated vertical tubes, Int. J. Heat Mass Transfer 22 (1979) 557–568.

Зуева Т.С.¹, Вайсс Л.², Венсинг М.², Гаряев А.Б.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Университет Фридриха-Александра,
D-91058, Эрланген, Ам Вайхсельгартен, 8
VinokurovaTS@mpei.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СНОСЯЩЕГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СТРУЙ УГЛЕВОДОРОДОВ РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Актуальность исследования распространения струй жидких углеводородов разной температуры в сносящем воздушном потоке обусловлена необходимостью оптимизации параметров смесеобразования в двигателях внутреннего сгорания. Сносящим потоком в камере сгорания является воздушный поток, поступающий из впускного клапана, и направленный перпендикулярно к топливной струе.

На базе лаборатории кафедры Технической термодинамики Университета Фридриха-Александра (г. Эрланген, Германия) проведены исследования распространения струи нагретого изооктана в сносящем потоке воздуха. Для визуализации процесса использован теневой метода с ножом Фуко [1]. Ранее авторами уже были проведены эксперименты с использованием прямого теневого метода [2].

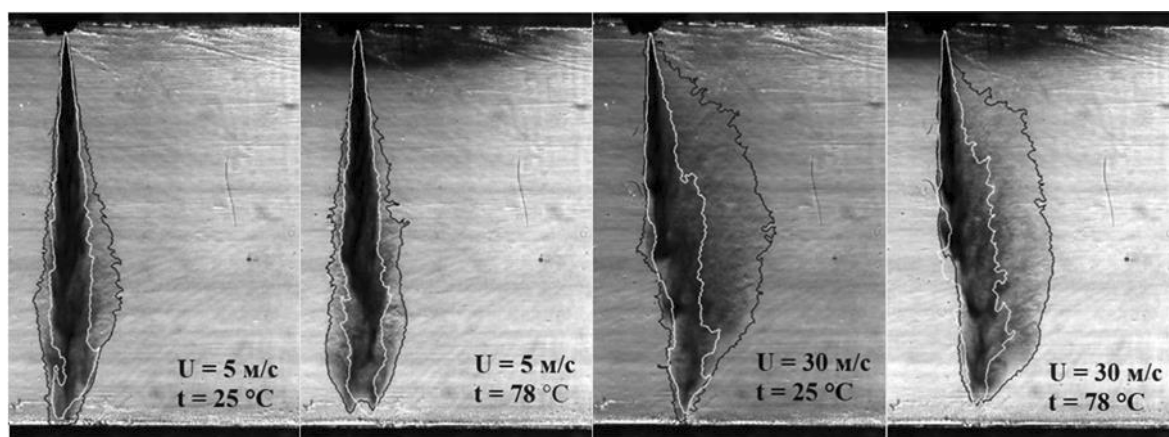


Рис. 1. Фотографии струи изооктана выполненные теньвым методом с ножом Фуко в момент $0,7 \cdot 10^{-3}$ с от начала впрыска при давлении впрыска 170 бар: U – скорость сносящего потока; t – температура изооктана

Были получены контуры паровой (черный контур на рис.1) и жидкой фазы (белый контур на рис.1). Границы контуров определялись по числу пикселей на снимках струи. Оба контура на каждой из фотографий получены путем осреднения результатов 10 впрысков. Для получения

контура жидкой фазы использовались фотографии, полученные прямым теневым методом, а для получения контура паровой фазы – теневым методом с ножом Фуко. Из рис. 1 видно, что паровая фаза существует как в горячей, так и в холодной струе. Главными причинами испарения являются разница парциальных давлений изооктана и воздуха, а также перепад давлений на сопле инжектора. Сносящий поток постоянно поставляет сухой воздух к струе, что поддерживает процесс испарения, препятствия установлению равновесия «пар-жидкость». Установлено, что с ростом скорости воздушного потока объем паровой фазы начинает заметно превышать объем жидкости. Данное обстоятельство может существенно влиять на процесс воспламенения и горения топлива.

Список литературы

1. Теневые методы /Л.А. Васильев; Под ред. В.А. Григоровой М.: Наука, 1968. 400 с.
2. Зуева Т.С., Горяев А.Б. Расчёт характеристик струи жидкого топлива в сносящем потоке газа//Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» II том Теплоэнергетика: Иваново., -2019.-с. 356-358.

Зюкин В.С., Валеева Е.П.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
ep.valueva@gmail.com

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ РАЗВИВАЮЩЕМСЯ ЛАМИНАРНОМ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Исследование процессов гидродинамики и теплообмена при пульсирующем течении в каналах является важной теоретической и прикладной задачей. Плоский канал – это предельный случай щелевого канала с малым отношением длин его сторон. Щелевые каналы применяются, например, в микроканальных теплообменных аппаратах, в которых осуществляется ламинарное течение.

С середины прошлого века оставался открытым вопрос о влиянии на теплоотдачу наложения пульсаций расхода. Сведения о противоречивом характере влияния получили объяснение лишь сравнительно недавно [1]. Среднее по периоду колебаний число Нуссельта \overline{Nu} превышает его стационарное значение при относительных амплитуд колебаний расхода $A > 1$. Расчеты в [1] проведены для гидродинамически стабилизированного

течения. В данной работе исследовано развивающееся течение жидкости. В [2] проведена классификация режимов течения по значению безразмерной частоты колебаний – числу Стокса $S = h / 2\sqrt{\omega/\nu}$ (h – ширина канала, ω – круговая частота колебаний, ν – кинематический коэффициент вязкости). Выделены следующие характерные области: квазистационарная ($S < 1$), высокочастотная ($S \gg 1$) и промежуточная. Ранее выполненные расчеты для развитого пульсирующего течения показали, что в каждой области гидродинамические и тепловые величины имеют свои особенности.

В первую очередь расчеты были проведены в квазистационарной области. Предложен метод решения задачи о пульсирующем квазистационарном течении в канале, основанный на использовании результатов расчета для стационарного течения. Решение системы стационарных уравнений движения и неразрывности на начальном участке плоского канала проведено методом конечных разностей с помощью итерационной неявной безусловно устойчивой схемы. На входе в канал задавались равномерные профили скорости и температуры. Такие же условия при $A > 1$, когда в некоторой части периода существует обратный поток жидкости, задавались на выходе из канала.

Режимными параметрами для расчета является относительная амплитуда колебаний средней по сечению скорости A и безразмерная длина канала $L = l / (hRe)$, которые изменялись в диапазонах: $A = 0.5 \div 5$ и $L = 0.5 \div 2$. В результате расчетов получены новые, ранее отсутствующие данные, по профилю скорости и длине начального гидродинамического участка для пульсирующего течения. Рассчитаны числа Пуазейля Po , Po_τ (коэффициенты пропорциональности в зависимости коэффициентов гидравлического и сопротивления трения от числа Рейнольдса $\xi^p = Po / Re$ и $\xi^\tau = Po_\tau / Re$) и число Нуссельта $(Nu = \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_w \frac{h}{(T_w - T_b)})$ при граничном условии $T_w = \text{const}$.

Показано, что сопротивление трения, гидравлическое сопротивление и число Нуссельта существенно выше, чем при стационарном течении. Вблизи входа в канал при $A = 5$ осредненное по периоду колебаний число Пуазейля $\overline{Po_\tau}$ превышает свое стационарное значение Po_s более чем в три раза. Для тех же режимных параметров отношение $\overline{Nu} = \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_w \frac{h}{(T_w - T_b)} / Nu_s \approx 2$.

Список литературы

1. Валуева Е.П., Пурдин М.С. Гидродинамика и теплообмен при пульсирующем с большими амплитудами ламинарном течении в каналах // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25. № 5. С. 735–746.

2. **Валуева Е.П., Пурдин М.С.** Гидродинамика и теплообмен пульсирующего ламинарного потока в каналах // Теплоэнергетика. 2015. № 9. С. 24–33.

Иванов Н.Г.¹, Подмаркова А.Д.¹, Засимова М.А.¹, Марков Д.²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29

² Софийский технический университет,
8 Kliment Ohridsky boulevard, Sofia, 1000, Bulgaria

ivanov_ng@spbstu.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСИ В ТЕСТОВОМ ВЕНТИЛИРУЕМОМ ПОМЕЩЕНИИ

В докладе представляются результаты численного моделирования распространения примеси от точечного источника в тестовом вентилируемом помещении. Постановка задачи соответствует условиям эксперимента [1, 2], в котором исследовалось изотермическое распространение красителя в воде ($\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 1,003 \times 10^{-3} \text{ кг/м с}$), заполняющей моделирующий помещение атриума бак высотой 0,38 м с основанием $0,3 \times 0,024 \text{ м}$ со срезанным углом. Со стороны срезанного угла друг над другом расположены пять прямоугольных приточных отверстий размером $0,01 \times 0,043 \text{ м}$, подающих чистую воду. Одно вытяжное отверстие прямоугольной формы размещено на соседней стенке под потолком. Число Рейнольдса, построенное по ширине входа и входной скорости, равно 2160. Турбулентное и молекулярное числа Шмидта равны 0,7 и 10^3 соответственно. Численные расчеты выполнены с использованием пакета ANSYS Fluent, обеспечивающим второй порядок точности при дискретизации пространственных и временных производных. Используются гексагональные сетки со сгущением к входным отверстиям (исходная сетка из 424 тыс. ячеек, измельченная – из 3,4 млн ячеек). Для моделирования распространения примеси используется модель локального источника, занимающего одну ячейку вычислительной сетки.

Нестационарный процесс распространения примеси после начала ее выделения моделируется в замороженном поле скорости, рассчитанном на основе решения стационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых полуэмпирической моделью турбулентности (RANS подход; рассматривались модели Спаларта-Аллмараса, k- ω Уилкокса, k- ω SST Менгера, стандартная k- ϵ). Шаг по времени принимается равным 0,5 с, а длина выборки составляет более 500 с, что превышает время выхода на стационарный режим. В эксперименте краситель вводился в

вентилируемое помещение чуть выше пола вдали от входных отверстий, это положение точечного источника воспроизводится в исходном варианте расчета. Оказалось, что в установившемся по окончании переходного процесса поле концентрации отчетливо выделяется область с максимальной концентрацией примеси, расположенная под входной струей. Сопоставление с экспериментальными данными позволило заключить, что RANS подход пригоден для прогнозирования распространения примеси от точечного источника, но результаты чувствительны к выбору модели турбулентности.

Помимо исходного размещения источника, соответствующего эксперименту, рассмотрены и три других положения. Влияние места выделения примеси на эффективность ее удаления из вентиляруемого помещения оценивается на основе сопоставления эффективности вентиляции, среднего значения концентрации по объему и объема изоповерхности, внутри которой концентрация выше предельного значения. Данные по средним значениям концентрации по объему позволяют сделать вывод о том, что в рассмотренном сценарии вентиляции примесь менее эффективно вымывается в случае, когда источник находится у потолка, так как он расположен в застойной зоне. Для вариантов с источниками выброса под струей и над струей эффективность удаления загрязняющего вещества оказывается высокой, так как примесь попадает в область эжекции с относительно высокими скоростями. Обсуждается возможность снижения рисков от локального выделения токсичного вещества.

Список литературы

1. **Thatcher T.L., Wilson D.J., Wood E.E., Craig M.J., Sextro R.G.** Pollutant dispersion in a large indoor space: Part 1 – Scaled experiments using a water-filled model with occupants and furniture // *Indoor Air*. 2004. Vol. 14. P. 258-271.
2. **Finlayson E.U., Gadgil A.J., Thatcher T.L., Sextro R.G.** Pollutant dispersion in a large indoor space: Part 2 – Computational fluid dynamics predictions and comparison with a scale model experiment for isothermal flow // *Indoor Air*. 2004. Vol. 14. P. 272-283.

*Ивочкин Ю.П.¹, Виноградов Д.А.¹, Кубриков К.Г.¹,
Тепляков И.О.¹, Исмаилов А.М.^{1,2}*

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская 13, стр.2

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
ivochkin@yandex.ru

К ВОПРОСУ О ПОЛУЧЕНИИ АМОΡФНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ РАСПЛАВОВ В ОХЛАДИТЕЛЕ

Аморфные металлы (АМ) обладают уникальными физико-химическими (механическими, магнитными, электрическими, коррозионными, абсорбционными и др.) свойствами. Современные способы получения аморфных металлов базируются, в основном, на сложных и дорогостоящих технологиях быстрого и сверхбыстрого (10^4 - 10^{10} К/с) охлаждения расплавов. В докладе представлены результаты экспериментально-расчетных оценок возможности получения АМ посредством нового технологически простого (относительно существующих) метода, основанного на процессе взрывной фрагментации раскаленных жидкометаллических капель при их взаимодействии с легкокипящим охладителем [1]. Подобный процесс наблюдается, например, при паровых взрывах.

Результаты анализа литературных данных по паровым взрывам свидетельствуют, что реальные осколки, образующиеся при тонкой фрагментации расплавов, имеют характерные размеры $\sim 1 - 100$ мкм. Приведенные в докладе численные оценки подтверждают, что, с учетом малых размеров и высокой гидродинамической скорости разлета образующихся частиц (десятки м/с), данный способ фрагментации жидкометаллических капель обеспечивает требуемые значения скорости охлаждения осколков дробления, необходимые для получения аморфных металлов.

Эксперименты по проверке работоспособности предложенного метода получения АМ, были выполнены двумя различными способами, в которых металлические образцы, падающие в холодную воду, плавильлись: либо в подвешенном (левитирующем) состоянии с помощью индукционного нагрева, либо в тигле электропечи сопротивления. Результаты исследований, выполненные в диапазоне изменения начальной температуры образцов $300 - 900$ °С, подтвердили возможность моделирования процесса фрагментации капель легкоплавких металлов (олово, свинец) с помощью разработанной методики. Показано, что характер протекания фрагментации (взрывная или спокойная), степень

дробления капель, а также формы и размеры образующихся осколков определяются, главным образом, состоянием (окисленностью) поверхности расплава и его температурой. Подтверждено, что минимальные радиусы образующихся частиц при тонкой фрагментации не превышают нескольких микрометров, а скорость их разлета при взрывном разрушении капли может достигать десятки метров в секунду.

Результаты специальных рентгеноструктурных исследований осколков дробления олова и свинца, образующихся в процессе тонкой фрагментации расплавов при взрывной смене режимов кипения охладителя, подтвердили их аморфную структуру. Вопрос о получении по разработанной методике аморфных структур из металлов с более высокими температурами плавления (например, сплавы никеля и лантана, применяемые в качестве металлгидридов для хранения водорода) тесно связан с проблемой непредсказуемости возникновения тонкой фрагментации расплавов при их контакте с охладителем, и требует дальнейшей более детальной экспериментально-расчетной проработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-01497). Авторы выражают благодарность сотрудникам ОИВТ РАН Т.И. Бородиной и А.Н. Казакову за помощь в проведении рентгеноструктурных исследований.

Список литературы

1. **Furuya M.** Method for producing amorphous metal, method and apparatus for producing amorphous metal fine particles, and amorphous metal fine particles // Patent No.: US 7,008,463 B2 Mar. 7, 2006.

Исаев С.А. ¹, Сон Э.Е. ², Леонтьев А.И. ³, Попов И.А. ⁴, Никущенко Д.В. ⁵

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,

Санкт-Петербург, 196210, Пилотов, 38

² Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

³ Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-Бауманская, 5-1

⁴ Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, КАИ, 420111, Казань, К. Маркса, 10

⁵ Санкт-Петербургский государственный морской технический
университет, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3
isaev3612@yandex.ru

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВИХРЕВЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ. НОВЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.

Актуальная проблема теплофизики, имеющая фундаментальное значение и широкий спектр приложений, рассматривается [1]. От уединенной овальной траншейной лункой в узких каналах [2-4] осуществлен переход к одно-и многорядным луночным рельефам при турбулентном и ламинарном режимах движения теплоносителя (как правило, воздуха) [5-9]. Акцент в исследованиях делается на анализе явления аномальной интенсификации теплообмена при интерференции пристеночного и самоорганизующихся в лунках торнадоподобных потоков, а также на ускорении течения в ядре узких каналов, достигающего до 1.4-1.5 раз.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-19-00259.

Список литературы

1. **Rashidi S., Hormozi F., Sunden B., Mahian O.** Energy saving in thermal energy systems using dimpled surface technology – A review on mechanisms and applications // *Applied Energy*. 2019. Vol. 250. P. 1491—1547.
2. **Isaev S.A., Schelchikov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A.** Tornado-like heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 109. P. 40—62.
3. **Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Popov I.** Vortex heat transfer enhancement in narrow channels with a single oval-trench dimple oriented at different angles to the flow // *J. Enhanced Heat Transfer*. 2018. Vol. 25. No.6. P. 579—604.

4. **Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Nikushchenko D., Popov I., Sudakov A.** Simulation of vortex heat transfer enhancement in the turbulent water flow in the narrow plane-parallel channel with an inclined oval-trench dimple of fixed depth and spot area // *Energies*. 2019. Vol. 12 (1296). P. 1—24.
5. **Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I.** Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // *Acta Astronautica*. 2019. Vol.163 (A). P. 202—207.
6. **Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г.** Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // *ТВТ*. 2019. Т. 57. №5. С.797—800.
7. **Isaev S.A., Gritckevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V.** Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 145 (118737). P. 1—13.
8. **Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В.** Ускорение турбулентного потока в узком облуненном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклоненных овально-траншейных лунок на стенке // *Теплофизика и аэромеханика*. 2019. Т.26. №5. 697—702.
9. **Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G.** Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 134. P. 338—358.

Карелин Д.Л.¹, Болдырев А.В.¹, Гуреев В.М.², Болдырев С.В.¹,

Харчук С.И.²

¹ Набережночелнинский институт КФУ,
Республика Татарстан, Россия, 423810, г. Набережные Челны, Мира,
68/19

² Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Казань, РФ, Карла Маркса, 10
karelindl@mail.ru

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОВИДКОСТНОЙ КОМПРЕССИОННОЙ И «ОБЫЧНОЙ» СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ПО ОТНОСИТЕЛЬНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Сущность метода сравнительного анализа заключается в представлении полученных результатов моделирования и экспериментального исследования в виде зависимостей, отводимых количеств теплоты ПЖК и «обычной» СО, затрачиваемых на это мощностей, от массового расхода G_B и температуры T_B охлаждающего воздуха, записанной в виде уравнения (1) и в графическом виде представленной на рисунке 1.

$$\left(\frac{Q_{и}}{Q_{со}}\right)_{G_B, T_B} = f\left(\frac{\sum N'_{со}}{\sum N_{со}}\right)_{G_B, x_k}, \quad (1)$$

где $Q_{и}$ - количество тепла, отводимое ПЖК СО от охлаждаемого объекта, Вт; $Q_{со}$ - количество тепла, отводимое «обычной» системой охлаждения, Вт; $\sum N'_{со}$ - суммарные затраты мощности для ПЖК СО, Вт; $\sum N_{со}$ - суммарные затраты мощности для «обычной» СО, Вт.

Из анализа результатов исследования ПЖК и «обычной» СО видно, что относительная эффективность первой системы охлаждения относительно второй значительно возрастает с повышением температуры окружающей среды. Так при максимальном массовом расходе воздуха $G_B=0,7$ кг/с и температуре охлаждающего воздуха $T'_B=20^\circ\text{C}$ (кривая 5) количество тепла $Q_{и}$ отводимого ПЖК СО от охлаждаемого объекта в 1,85 раза

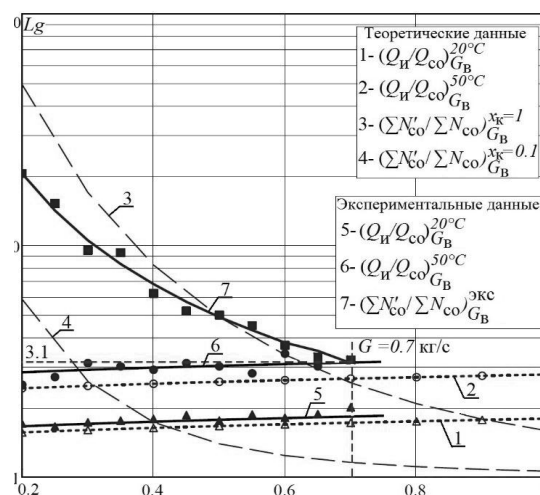


Рис. 1 – Оценка энергетической эффективности ПЖК СО (работающей на фреоне R-123) относительно «обычной» СО, в диапазоне температур окружающего воздуха от 20°C до 50°C

больше, чем Q_{CO} «обычной» СО, а при $T'_B=50^\circ\text{C}$ (кривая б) это отношение возрастает до 3,1 раза. Такой эффект достигается за счет большего температурного напора между теплоотдающей поверхностью Т-К и охлаждающим воздухом относительно теплообменного аппарата без фазового перехода используемого в «обычных» СО, а также поддержания температуры перегрева и конденсации рабочего агента в термодинамическом цикле ПЖК СО на примерно постоянном уровне, что также дополнительно повышает средний температурный напор.

Из результатов экспериментального исследования также видно, что после достижения массовым расходом охлаждающего воздуха через Т-К значения $G_B=0,7$ кг/с и температуре $T'_B=50^\circ\text{C}$ относительные затраты мощности $(\sum N'_{CO}/\sum N_{CO})_{G_B}^{\text{ЭК}}$ становятся меньше, относительного энергетического показателя $(Q_{И}/Q_{CO})_{G_B}^{T'_B}$ количества отводимого тепла, что дает возможность рекомендовать использовать ПЖК СО при более высоких значениях температуры окружающей среды и большем массовом расходе охлаждающего воздуха.

Список литературы

1. Карелин Д.Л., Гуреев В. М. Оценка эффективности парожидкостной компрессионной системы охлаждения энергетических машин // Тепловые процессы в технике. М.: «Наука и Технологии», 2016. Т.8. №9. С. 408-415.
2. Эффективные теплообменники / Г.И. Воронин, Е.В. Дубровский. М.: Машиностроение, 1973. 96 с.

Карнов С.В., Загоскин А.А., Коноплев М.И., Онохин Д.А.
Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова,
Архангельск, 163002, наб. Северной Двины, 17

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦИКЛОННЫХ КАМЕРАХ С ВНЕШНЕЙ РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ГАЗОВ

Циклонные топливосжигающие устройства обладают рядом преимуществ перед другими типами устройств аналогичного назначения (возможность достижения высоких значений теплонапряжения топочного объема, меньший объем рабочего пространства топки, эффективное улавливание золы и др.). Управление аэродинамикой циклонного потока в нагревательных печах, циклонных топках, сушилках и других устройствах с закрученным движением газов [1] можно осуществить как за счет изменения их основных безразмерных геометрических и режимных

характеристик: суммарной площади входа потока $\bar{f}_{\text{вх}} = 4f_{\text{вх}}/(\pi D_{\text{к}}^2)$, где $D_{\text{к}}$ – внутренний диаметр циклонной камеры; диаметра выходного отверстия $\bar{d}_{\text{вых}} = d_{\text{вых}}/D_{\text{к}}$; длины рабочего объема $\bar{L}_{\text{к}} = L_{\text{к}}/D_{\text{к}}$; входного числа Рейнольдса $Re_{\text{вх}} = v_{\text{вх}}D_{\text{к}}/\nu_{\text{вх}}$, так и за счет организации внешней рециркуляции газов [2] с коэффициентом рециркуляции по расходу $k_{\text{р}} = Q_{\text{рец}}/Q_{\text{вх}} = 0 \dots 0,534$.

Актуальность и новизна исследования определяется малой изученностью управления циклонным потоком при организации внешней рециркуляции топочных газов под действием радиального градиента давления между пристенной и приосевой зонами циклонной топочной камеры без изменения основных конструктивных параметров. Данный принцип был использован для повышения эффективности работы циклонных нагревательных устройств [2] и может быть положен в основу работы циклонных топков и предтопок с факельно-слоевым способом сжигания горючих отходов, например, лесной и деревообрабатывающей промышленности.

Исследование аэродинамики циклонного рециркуляционного устройства было выполнено на модели циклонной камеры внутренним диаметром $D_{\text{к}} = 201$ мм и длиной $L_{\text{к}} = 316$ мм. Безразмерная суммарная площадь входа потока $\bar{f}_{\text{вх}}$ равнялась $3,9 \cdot 10^{-2}$. Отвод воздуха из циклонной камеры производился через пережим выходного торца, безразмерный диаметр которого $\bar{d}_{\text{вых}}$ мог принимать значения от 0,2 до 0,4, отбор рециркулируемого газа – через одно или несколько радиальных патрубков на боковой поверхности рабочего объема с $\bar{f}_{\text{рец}}$ от 0 до $7,2 \cdot 10^{-2}$ и соединительные каналы с приосевой зоной камеры.

В опытах установлено, что регулированием $k_{\text{р}}$ от 0 до 0,53 можно изменять уровень безразмерной (отнесенной к $v_{\text{вх}}$) тангенциальной скорости $w_{\text{фм}}$ при $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,2$ – в 2, при $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,3$ – в 1,59 и при $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,4$ – в 1,34 раза в условиях подавления осевого обратного течения ($k_{\text{р}} \approx 0,1 \dots 0,2$). Аналитическое распределение $w_{\text{ф}}$ найдено совместным решением уравнений движения и сплошности; в качестве критерия использовано радиальное турбулентное число Рейнольдса Re_{r} . Численное моделирование аэродинамики выполнено на платформе OpenFoam с помощью модели турбулентности Лаундера-Гибсона (GL), схем дискретизации дифференциальных уравнений второго порядка точности и нестационарного алгоритма решения.

Решение тепловой задачи на боковой поверхности циклонного устройства и обобщение опытных данных по конвективному теплообмену выполнено полуэмпирическим методом, основанным на использовании интегрального соотношения для теплового пограничного слоя. Предложены уравнения подобия, хорошо согласующиеся с имеющимися экспериментальными данными авторов и других исследователей по

теплоотдаче гладкостенных циклонных камер, сепараторов – теплоуловителей и теплообменников. Аналитически установлен закон изменения числа Нуссельта на стенке камеры с ростом массовой концентрации взвеси в двухфазовых условиях циклонного течения.

Оценка аэродинамической и энергетической эффективности циклонных устройств основана на анализе затрат энергии на создание вращательного движения $\Delta \bar{p}_{кр}$ и определении безразмерного комплекса $K_3 = Nu / (Re_{вх}^n \zeta_{вх})$, где n – показатель степени в уравнении теплового подобия, $\zeta_{вх}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления циклонного устройства, рассчитанный по входным условиям.

Предложены научно обоснованные рекомендации по выбору оптимальных геометрических и режимных параметров топочных камер, обеспечивающие снижение аэродинамического сопротивления и затрат энергии на дутье, подогрев воздуха за счет теплообмена с боковой поверхностью топочного пространства.

Список литературы

1. **Сабуров Э.Н., Карпов С.В.** Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве/Под ред. Э.Н. Сабурова. М.: Экология, 1993. 368 с.
2. **Загоскин, А.А.** Физическое и математическое моделирование аэродинамики циклонных устройств с внешней саморециркуляцией газов / А.А. Загоскин, С.В.Карпов, Э.Н. Сабуров // Развитие Северо-Арктического региона: проблемы и решения: мат. межд. конф./ САФУ. Архангельск, 2014. С. 72-76.

Кирилук В.А.^{1,2}, Гребеньков С.А.¹

¹ ФГУП «ЦИАМ имени П.И. Баранова»,

Москва, 111116, Авиамоторная, 2

² МГТУ имени Н.Э. Баумана,

105005, Москва, 2-я Бауманская, 5 стр. 1

kiriluk.94@yandex.ru

РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ЛОПАСТИ

Работа посвящена проблеме корректного математического моделирования обледенения авиационной техники в полетных условиях на этапе подготовки к ее наземным испытаниям. Описан новаторский подход к решению данной задачи, представляющий расчетно-аналитическую методику, опробованную на модели вертолетной лопасти.

Математическое моделирование обледенения лопасти выполняется с целью определения конфигурации оборудования и испытываемой модели на

экспериментальной установке и выявления наиболее опасных с точки зрения обледенения полетных режимов, что позволяет ограничить объем натурных испытаний, и тем самым снизить их стоимость. Расчеты выполнялись с помощью современных программных комплексов: ANSYS CFX (расчет аэродинамического обтекания модели и расчет полей течения капель) и ANSYS FENSAP ICE (расчет массы ледяных наростов на поверхности модели) [1, 2]. В качестве расчетной геометрии выступает поперечное сечение вертолетного винта в наиболее критическом месте по радиусу (рис. 1).

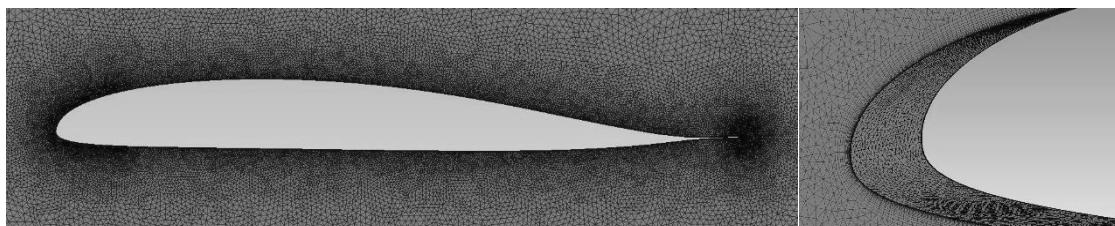


Рис. 1. Расчетная геометрия и сетка.

Расчеты выполнялись при различных режимных параметрах (скоростях, температурах, влажности набегающего потока и углах атаки) с включенной и выключенной противообледенительной системой. На заключительном этапе расчетов определяются массы ледяных наростов на поверхности вертолетного винта. По рассчитанным величинам масс льдообразований определяется перечень критических режимов, на которых в дальнейшем рекомендуется проводить испытания аэродинамического профиля. Наиболее опасным режимом является тот, при котором масса ледяного нароста максимальна. По результатам расчетов выдаются рекомендации по геометрическому расположению объекта на стенде и определяются режимные параметры, которые необходимо поддерживать на нем для моделирования рабочих режимов.

Расчетная методика не позволяет определить точных форм ледяных наростов при заданных параметрах потока, она дает возможность качественно за короткий срок оценить обледенение испытываемой модели по массам рассчитанных льдообразований. С помощью чего выбираются наиболее критические режимы работы лопасти в условиях обледенения и, тем самым, существенно сокращается количество испытаний на стенде.

Список литературы

1. Молчанов А.М., Щербаков М.А., Янышев Д.С., Куприков М.Ю., Быков Л.В. Построение сеток в задачах авиационной и космической техники. М.: МАИ, 2013. 260 с.
2. Хитрых Д. Численное моделирование процесса обледенения в ANSYS CFX // ANSYS Advantage. Электроника, МЭМС и нанотехнологии. 2009. № 12. С. 28-30.

Киселёв Н.А., Здитовец А.Г., Попович С.С., Виноградов Ю.А.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1
kiselev.nick.a@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОТДАЧИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ

Уже более полувека многие исследователи изучают процессы переноса теплоты и импульса в однофазных течениях с градиентом давления [1-2], однако некоторые особенности влияния неблагоприятного градиента давления на тепловые и динамические пограничные слои все еще не выявлены. В настоящее время градиентные течения все еще являются предметом активных дискуссий.

В данной работе представлено исследование влияния неблагоприятного градиента давления на процессы, приводящие к интенсификации теплообмена на гладких и облуненных поверхностях. Экспериментальные исследования проводились на дозвуковой аэродинамической установке НИИМ МГУ (рисунок 1), рабочий канал которой выполнен щелевым: длина $L=1190$ мм, высота $H=50$ мм и ширина $B=300$ мм. Последняя – рабочая – секция имеет длину 270 мм и оснащена подвижной верхней стенкой. Регулируя угол раскрытия (положение верхней стенки), на рабочий участок накладывается различный градиент давления.

При проведении экспериментальных исследований коэффициент сопротивления (осредненный по площади поверхности исследуемой модели) определялся с использованием плавающих элементов (рисунок 1, б) (с учетом изменения статического давления по длине элементов), двумерное поле коэффициентов теплоотдачи – методом нестационарного теплообмена с использованием тепловизора (INFRATEC 8855). Профили скорости (осредненная и пульсационная составляющие) определялись с помощью термоанемометра.

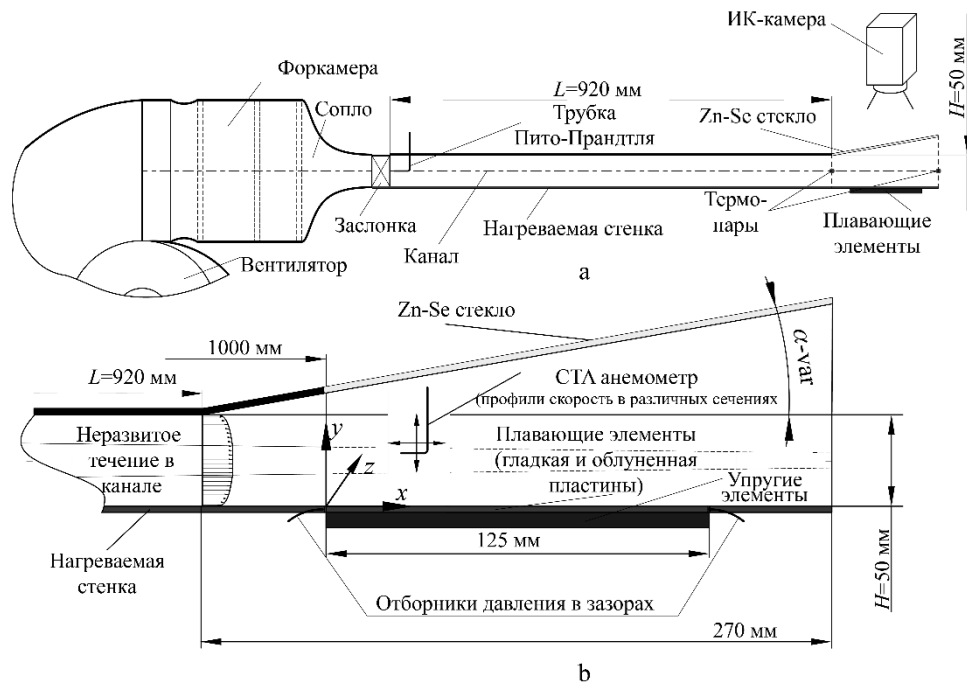


Рис. 1. Схемы установки (а) и рабочего канала (б)

В результате экспериментальных исследований получены поля скоростей (усредненная и пульсационная составляющие), зависимости коэффициентов теплоотдачи и сопротивления (теплогидравлические характеристики) гладкой и облученной поверхности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10213).

Список литературы

1. Clausert F.H. Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients. J Aeronaut Sci, 1954, 21:91–108.
2. Araya G., Castillo L. Direct numerical simulations of turbulent thermal boundary layers subjected to adverse streamwise pressure gradients. Phys Fluids, 2013, 25.

Коверда В.П., Скоков В.Н., Виноградов А.В.
Институт теплофизики УрО РАН
Екатеринбург, 620016, ул Амундсена, 107а

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ В КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

Для диагностики надежной работы энергетического оборудования при больших тепловых нагрузках требуется прогнозировать экстремальные пульсации тепловых потоков и температуры. Такие пульсации могут возникать в критических режимах тепло- массообмена с интенсивными фазовыми переходами. В отличие от масштабно-инвариантных флуктуаций вблизи термодинамической критической точки индивидуальных веществ, экстремальные флуктуации в критических режимах теплообмена, помимо свойства масштабной инвариантности (степенного распределения амплитуд), охватывают значительно более широкую область управляющих параметров, имеют спектр мощности, обратно пропорциональный частоте ($1/f$ спектр), и другие динамические свойства (резонансные явления, динамический хаос).

Экстремальные флуктуации в критических режимах теплообмена моделируются системой двух уравнений, описывающей взаимодействие флуктуаций вблизи критического перехода. Использование такой системы объясняет физическую природу $1/f$ шума и открывает новые возможности исследования больших флуктуаций со степенным распределением амплитуд. Решением системы уравнений являются эволюция флуктуаций, часть которых подчиняется классической статистике: имеет экспоненциальную релаксацию и гауссовский «хвост» распределения амплитуд, а другая часть флуктуаций не подчиняется классической статистике: имеет степенную релаксацию и степенной «хвост» распределения амплитуд. Совместное решение системы уравнений позволяет получать достоверные сведения для взаимодействия классических и неклассических флуктуаций, а устойчивость и стационарность случайного процесса оценивать по формулам классической статистики с использованием принципа максимума энтропии.

Важной задачей является уменьшение экстремальных выбросов за счет внешних воздействий на случайный процесс. К таким воздействиям относится перемешивание, шумовое и периодическое воздействия. В работе проведено изучение влияния различного шумового и периодического воздействия на случайные процессы вблизи критичности. Показано, что внешнее периодическое воздействие не только не подавляет экстремальные пульсации, но может приводить к резонансному отклику, заключающемуся в усилении периодических

пульсаций под воздействием шума.

Более тонкое влияние периодического сигнала на систему связано с динамическим хаосом, который характеризуется неустойчивыми циклами пульсаций. Он реализуется при внешнем гармоническом воздействии. Определена область хаотического поведения в координатах частоты и амплитуды гармонического воздействия. Найдены критические режимы хаотического поведения. Показано, что дополнительное воздействие белого шума на систему приводит к индуцированному шумом динамическому хаосу, когда неустойчивость циклической эволюции флуктуаций появляется под воздействием белого шума. В этом случае область хаоса охватывает более широкий диапазон изменения управляющих параметров. Спектр мощности флуктуаций в критическом режиме подчиняется зависимости $\sim f^{-5/3}$, которая характерна для колмогоровской турбулентности. Этому процессу соответствует максимум энтропии. На рисунке приведен спектр мощности, реализация и фазовая траектория флуктуаций в критическом режиме индуцированного шумом хаоса.

Полученные результаты расширяют прогнозные условия экстремальных энергетических выбросов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-08-00091-а.

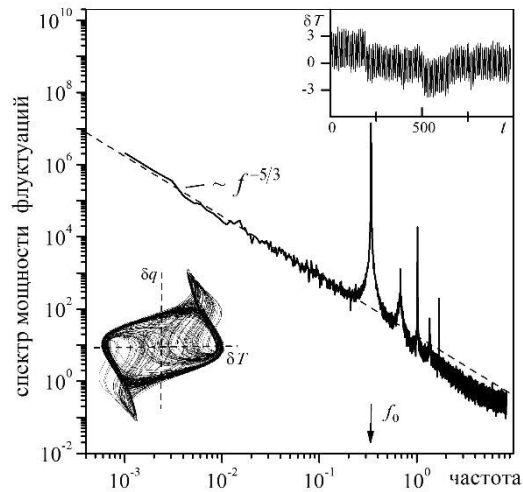


Рис. Спектр мощности флуктуаций в критическом режиме; штриховой линией показана зависимость $\sim f^{-5/3}$; f_0 – частота периодического воздействия. На верхней вставке – реализация флуктуаций. На нижней вставке – фазовая траектория флуктуаций в режиме динамического хаоса.

Козлов П.В.¹, Левашов В.Ю.^{1,2}, Быкова Н.Г.¹, Забелинский И.Е.¹

¹ НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
vy169@mail.ru

ИЗЛУЧЕНИЕ АРГОНА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Исследование излучения в ударно-нагретых газах позволяет получать информацию о величинах радиационных тепловых потоков, представляющих большой интерес для гиперзвуковой аэродинамики. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования неравновесного излучения чистого аргона, полученные на экспериментальном комплексе "Ударная труба" НИИ механики МГУ [1]. Предложена упрощенная модель для расчета интенсивности излучения атомарных линий за фронтом ударной волны. Аргоновая плазма, спектр излучения которой исследуется в настоящей работе, является удобным объектом как для тестирования радиационно-столкновительных моделей излучения горячих газов, так и для установления ведущих физических процессов в газе, связанных с ионизацией, образованием электронов, возбуждением энергетических уровней атомов и их дезактивацией в условиях высоких температур за фронтом сильных ударных волн. Отсутствие отвода энергии за счет возбуждения вращательных и колебательных степеней свободы, а также процессов диссоциации в благородных газах, позволяет изучать кинетику электронного возбуждения и ионизации и верифицировать столкновительно-излучательные модели. Представлены временные осциллограммы излучения отдельных атомарных линий и панорамного спектра, измеренных в абсолютных единицах. Основное внимание уделяется исследованию начального этапа появления излучения от момента прихода газодинамического фронта ударной волны до начала лавинообразного нарастания концентрации электронов. Пример экспериментальной осциллограммы эволюции излучения для начального давления $p_1=1$ Торр и скорости ударной волны $V_{sw} = 6$ км/с для различных длин волн представлен на Рис. 1. Сравнение результатов расчета температуры и температуры электронного газа за фронтом ударной волны, полученные на базе упрощенной модели с данными статьи [2], представлено на Рис. 2.

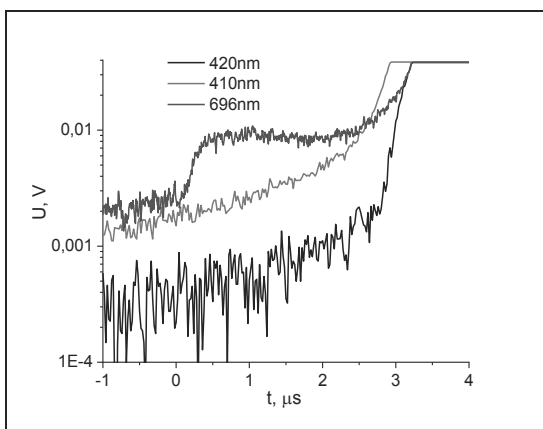


Рис. 1. Временные зависимости излучения ударно-нагретого аргона на разных длинах волн ($P_1=1$ Топ, $V_{sw}=6$ км/с).

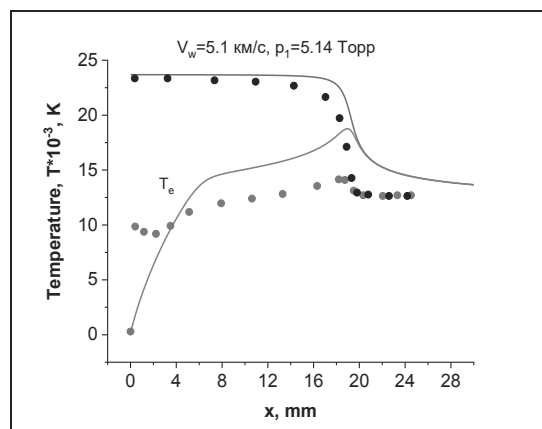


Рис. 2. Температура газа и электронного газа за фронтом ударной волны: сплошные линии – упрощенная модель, точки – данные работы [2].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00343 А

Список литературы

1. **Surzhikov Sergey, Kozlov Pavel** Nonequilibrium radiation no in shocked air. In *55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum*, volume 157, pages 1–16. Grapevine, Texas, 2017.
2. **Kapper M. G., Cambier J.** Ionizing shocks in argon. part I: Collisional-radiative model and steady-state structure // *Journal of Applied Physics*. 2011. vol. 109. N. 11. pp. 113308

Колесниченко И.В., Ельтищев В.А., Мандрыкин С.Д., Фрик П.Г.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, 614018,
Академика Королева, 1 kiv@icmm.ru

ТЕЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ, ВЫЗВАННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ СИЛАМИ, ИССЛЕДУЕМЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ

Жидкометаллические батареи активно изучались еще в 1960-х и вновь привлекли к себе внимание в связи с возрастающим интересом к возобновляемым источникам энергии и связанной с этим необходимостью масштабного расширения хранилищ электроэнергии. Жидкометаллические батареи состоят из двух жидких металлических электродов, разделенных слоем жидкости с ионной проводимостью (расплавленной соли). Их основными преимуществами являются сверхбыстрая кинетика переноса заряда на границах жидкость-жидкость, обеспечивающая чрезвычайно высокую плотность тока заряда-разряда, их потенциально низкая стоимость, обусловленная обилием электродных материалов, таких как натрий и свинец, а также, отсутствие проблем старения, что обещает беспрецедентный срок службы. В настоящее время

созданы образцы небольших лабораторных батарей, однако выходу на промышленно интересные размеры мешает целый букет гидродинамических и магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей: конвективная, электровихревая, тейлеровская и пр. [1,2].

Электровихревые течения (ЭВТ) возникают в результате взаимодействия электрического тока, протекающего через проводящую жидкую среду, и магнитного поля, создаваемого этим током [3].

Необходимым условием возникновения таких течений является не только неоднородность распределения

тока в объеме жидкости, но и отличие от нуля ротора электромагнитных сил. Классическими примерами ЭВТ являются течения вблизи локализованного подвода тока к проводящей жидкой среде, структура которых зависит от формы полости, конфигурации электродов, наличия внешних магнитных полей. Нестационарный характер ЭВТ может оказывать положительное воздействие на продукт технологического процесса, например, способствовать перемешиванию расплава металла и образованию слитка лучшего качества. В жидкометаллических батареях ЭВТ выравнивают температурные флуктуации в расплаве, тем самым снижая вероятность возникновения термогравитационной конвекции и уменьшая концентрацию формирующихся интерметаллидов. Однако при превышении некоторого значения тока, такие течения могут приводить к деформации слоя электролита, ранее отмеченной в алюминиевых реакторах, и чрезмерному его утонению, то есть к последующему короткому замыканию и выходу аппарата из строя.

В работе представлены результаты численного и экспериментального исследования ЭВТ в цилиндрических объемах. Рассмотрены ЭВТ, возникающие в цилиндрическом слое при одном центральном электроде в донной части (вторым электродом является боковая или верхняя стенка) и при нескольких донных электродах. Наложение внешнего магнитного поля приводит к появлению дополнительной азимутальной компоненты электромагнитной силы, которая создает азимутальное течение (АТ). Конкурирующее взаимодействие этих течений (АТ и ЭВТ) также рассматривается в данном исследовании с целью изучения возможностей влияния на ЭВТ.

При численном исследовании процессов в реальных батареях, математические модели трудно верифицировать из-за сложности получения экспериментальных данных в промышленных условиях. Поэтому,

основную часть результатов стараются получить на масштабных лабораторных установках при комнатной температуре на модельном жидком металле, например, галлии или ртути. В экспериментальной части

дан- ной работы используется жидкий галлиевый сплав. Это позволяет использовать отработанный метод экспериментального исследования в МГД - ультразвуковая доплеровская анемометрия (УДА) [4,5]. Метод можно применять только при умеренной температуре. Это также позволяет разработать, изучить и проверить бесконтактную индукционную методику регистрации положения свободной поверхности жидкого металла. Она реализуется с помощью набора индукционных датчиков уровня (ИДУ), показания которых сопоставляются с данными эхолокации УДА. Методику ИДУ можно будет применять на промышленных установках, поэтому необходима ее отработка и калибровка в лабораторных условиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ – Helmholtz – 18-41-06201.

Список литературы

1. N. Weber, V. Galindo, J. Priede, F. Stefani, N. Weier // *Physics of Fluids*. 2015. V. 27. N. 1. P. 014103.
2. D. Kelley, T. Weier *Fluid Mechanics of Liquid Metal Batteries* // arXiv:1710.03150, 2017.
3. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова, Э.В. Щербинин *Электровихревые течения*. // Рига: "Зинатне", 1985, 315с.
4. P. Oborin, I. Kolesnichenko Application of the ultrasonic doppler velocimeter to study the flow and solidification processes in an electrically conducting fluid // *Magnetohydrodynamics*, 2013, 49, pp.231-236.
5. G. Losev, R. Khalilov, I. Kolesnichenko UDV study of a liquid metal vortex flow // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 208, 012022.

Комов А.Т., Щербаков П.П., Захаренков А.В., Сморгоча Ю. В.,
Ильин В.В., Штелинг В.С.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Для обеспечения заданного теплового состояния элементов энергетического оборудования широко используется метод охлаждения поверхностей с помощью распыленного потока теплоносителя, создаваемого соплами различной конструкции. Этот способ охлаждения имеет два важных преимущества перед охлаждением с непрерывным потоком теплоносителя: он позволяет значительно увеличить эффективность теплопередачи и

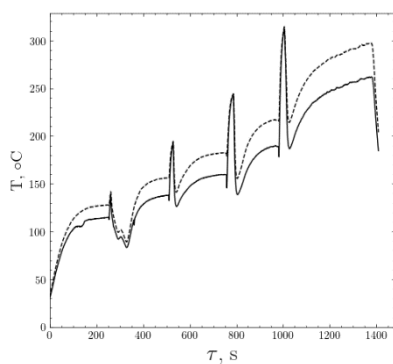


Рис. 2. Протокол эксперимента при параметрах охлаждающей жидкости $p=4,0 \cdot 10^5$ Па, $G=4,4 \cdot 10^{-3}$ кг/с, диаметр мишени 70 мм (подписана электрическая мощность ВЧ-генератора при которой достигался стационарный режим)

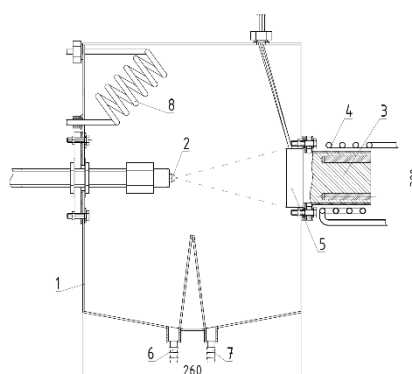


Рис. 1. Конструкция экспериментальной камеры: 1 – корпус, 2 – форсунка, 3 – нагреваемый элемент, 4 – индукционная катушка, 5 – медная мишень, 6, 7 – отборы, 8 – конденсатор.

снизить давление в системе охлаждения, что снижает риск возникновения аварийных ситуаций. Дисперсное охлаждение рассматривается, как перспективный метод высоконагруженных элементов ядерных, термоядерных установок и реакторов.

Могут быть использованы различные методы дисперсного охлаждения. Для ядерных реакторов на быстрых нейтронах, в работе [1] предлагается использовать дисперсный поток в канале. В экспериментальных термоядерных установках предлагается использовать капиллярно-пористые структуры (КПС), насыщенные жидким литием со стороны

плазмы, для защиты поверхности взаимодействующих с плазмой элементов, таких как лимитер и дивертор [2].

Особенностями работы элементов камеры являются односторонний нагрев с высокой плотностью теплового потока (достигающей 20 МВт/м²), а также необходимость поддержания температуры в диапазоне, в котором литий находится в жидком состоянии. Всем этим требованиям достаточно хорошо отвечает охлаждение диспергированным потоком теплоносителя. Для охлаждения ограничителей проводятся исследования диспергированного течения в канале, которые подтверждают высокую эффективность диспергированного охлаждения. В данной статье представлены результаты экспериментального исследования применительно к модели дивертора, которая представляет собой вертикальную плоскую поверхность.

В данной работе представлены результаты экспериментального определения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи при охлаждении высокотемпературной поверхности диспергированным потоком жидкости на экспериментальном стенде. Выполнен монтаж экспериментальной установки (рис.1), проведены наладочные эксперименты. Проведены эксперименты по исследованию эффективности термостабилизации мелкодисперсным потоком (рис. 2), по полученным данным проведен расчёт коэффициентов теплоотдачи, сделаны выводы по полученным результатам. Рассчитан тепловой баланс для нагревателя.

Список литературы

- [1] Liu Y., Cui D, Lin J, Liu J, Li C, Huang S, Xiong Z and Yin H 2018 Experimental study on steady-state heat transfer characteristics of the Nozzle-atomized dispersed flow *Applied Thermal Engineering* **140** 686–95
- [2] Mirnov S V, Belov A M, Djigailo N T *et al* 2013 Recent lithium experiments in tokamak T-11M *J. of Nuclear Materials* **438** 224-8

Королев П.В., Крюков А.П., Шишкова И.Н.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАСЧЕТУ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ НА СФЕРИЧЕСКОЙ ГРЕЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Известно, что в ряде случаев режим кипения жидкостей, характеризующихся высокой эффективностью теплопереноса, может быть не только пузырьковым, но и пленочным, т.е. таким, при котором пленка пара отделяет жидкость от греющей поверхности. Наибольшая эффективность переноса теплоты наблюдается в сверхтекучем гелии (гелии II, He-II): при заданном значении теплового потока градиент температуры минимален именно для этой жидкости. При этом пузырьковая стадия кипения в гелии II отсутствует совсем: при росте тепловой нагрузки режим теплопереноса при непосредственном контакте нагревателя с жидкостью (режим сопротивления Капицы) сменяется пленочным кипением. Расчетные исследования показали, что при постановке задачи о теплопереносе через проницаемую для потока массы межфазную поверхность пар-He-II невозможно даже точно сформулировать математическое описание, не прибегая к методам физической кинетики.

Кроме того, существует и другой класс веществ, у которых термические сопротивления относительно невелики – это жидкие металлы. Исследования закономерностей движения и теплообмена в жидких металлах, в том числе, при наличии газовых пузырей является актуальной задачей для промышленности и энергетике. Прежде всего, изучение подобного рода процессов важно для обоснования проектов реакторов на быстрых нейтронах с натриевым и свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителями. Протекание аварийных ситуаций, вызванных разрывом трубок парогенератора реактора и вскипанием теплоносителя из-за недостаточного теплоотвода от активной зоны, определяется поведением пузырей из-за наличия положительной обратной связи между мощностью активной зоны и объемом газа. Попавшие в теплоноситель частицы расплава активной зоны реактора, взаимодействуя с охлаждающим жидким металлом, могут вызвать локальный всплеск давления и возникновение ударной волны, которая затем превращается в детонационную. Отличительной особенностью жидких металлов является малая упругость насыщенных паров даже при относительно высоких температурах. По этой причине длина свободного пробега молекул в паре может быть относительно велика и сопоставима с толщиной паровой пленки на

мелких каплях расплава. Очевидно, что применение метода описания теплопереноса в приближении сплошной среды в этом случае неправомерно.

Опубликованы результаты экспериментальных исследований пленочного кипения обычных жидкостей на сферических поверхностях (см. например [1,2]), эксперименты же по пленочному кипению He-II на сферических нагревателях немногочисленны [3]. Расчетные исследования этой задачи методами молекулярно-кинетической теории авторам неизвестны, хотя теплоперенос через газ, находящийся между двумя коаксиальными сферическими непроницаемыми для потока массы поверхностями этими методами исследовался ранее [4] и относительно недавно [5]. Для определения плотности теплового потока при кипении на сфере в ситуации, когда толщина паровой пленки сопоставима с диаметром нагревателя, в настоящей работе как развитие подхода Л. Лиза [4] выводится соответствующая формула, расчеты по которой сравниваются с результатами, полученными путем прямого численного решения кинетического уравнения Больцмана.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект №19-19-00321).

Список литературы

1. **Ю.П. Ивочкин, К.Г. Кубриков, А.П. Крюков, Ю.Ю. Пузина.** Пленочное и переходное кипение недогретой воды на сферических поверхностях // Тезисы Минского международного форума по теплообмену, 23-26 мая 2016 года, г. Минск, Беларусь – Минск: ИТМО НАНБ им. А.В. Лыкова, 2016. – Т. 1, С. 335–338.
2. **Пузина Ю.Ю., Ковалев С.А., Кубриков К.Г.** Стационарное состояние паровой пленки при взаимодействии горячего шара с недогретой жидкостью // Вестник МЭИ, 2013. №4. С.41-46.
3. **Крюков А.П., Медников А.Ф.** Экспериментальное исследование кипения He-II на шаре // Журнал Прикладной Механики и Технической Физики. 2006. Т. 47. № 6. с. 836-841.49.
4. **Lester Lees.** Kinetic theory description of rarefied gas flow // Journal of the society for industrial and applied mathematics. Vol.12. No.1, March 1965. P. 278–311.
5. **Ho M.T., Graur I.** Heat transfer through rarefied gas confined between two concentric spheres // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 90. P. 58–71.

Корценштейн Н.М.¹, Ястребов А.К.²

¹АО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского»,
Москва, 119071, Ленинский проспект, 19

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
akyastrebov@mail.ru

ВЛИЯНИЕ МЕЖФАЗНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА ПРОЦЕСС ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В ЗАПЫЛЕННОМ ПАРОГАЗОВОМ ПОТОКЕ

Процесс объемной конденсации в природных явлениях и технических устройствах происходит, как правило, при наличии гетерогенных центров конденсации различной природы. Следовательно, в общем случае конденсация является гомогенно-гетерогенной. Соотношение между гомогенным и гетерогенным механизмами изменяется в широких пределах в зависимости от степени пересыщения пара и скорости создания пересыщенного состояния, концентрации, размеров и природы гетерогенных центров конденсации. При описании кинетики объемной конденсации, в общем случае, должны быть учтены три параллельно идущих процесса: образование новых капель (нуклеация), конденсационный рост капель и межфазный теплообмен.

В данной работе описание кинетики объемной конденсации в запыленном парогазовом потоке основано на том, что в потоке имеется две группы капель: микрокапли, образовавшиеся вследствие гомогенной нуклеации в объеме парогазовой смеси, и макрокапли, образовавшиеся при конденсации пара на частицах пыли. Для каждой из групп капель использовано кинетическое уравнение для функции распределения капель по размерам. Учет конечной скорости межфазного теплообмена при описании объемной конденсации в запыленном парогазовом потоке предполагает, в общем случае, вычисление температур газовой фазы, микро- и макрокапель на основе трех уравнений энергии. При этом должны применяться выражения для межфазных тепловых потоков и скорости роста капель в широком диапазоне чисел Кнудсена растущих капель с использованием методов молекулярно-кинетической теории. С учетом сложности подхода целесообразно проведение численного моделирования рассматриваемого процесса в последовательно усложняющихся постановках: однотемпературной, предполагающей равенство температур газовой фазы, микро- и макрокапель; двухтемпературной, предполагающей равенство температур только газовой фазы и микрокапель; трехтемпературной, учитывающей различие температур газовой фазы, микро- и макрокапель. Сравнение результатов

моделирования в одно-, двух- и трехтемпературном приближении позволит определить границы применимости каждого из них.

Представлены результаты моделирования одномерного стационарного течения смеси пара (D_2O), газа (N_2) и пылинок в сверхзвуковой части сопла Лавалья. Исходные данные соответствуют условиям экспериментов [1], что дало возможность проверки полученных результатов путем их сравнения с экспериментальными данными при отсутствии пыли. Для описания течения использованы уравнения газовой динамики в односкоростном приближении (размеры пылинок и капель достаточно малы). Скорость нуклеации в кинетическом уравнении для микрокапель вычислялась по формуле Френкеля – Зельдовича, скорость роста микрокапель и макрокапель определялась по формуле Фукса. Во входном сечении были заданы температура смеси и парциальные давления компонентов, скорость потока равна скорости звука. Для незапыленного потока полученные расчетные данные достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментов [1].

Список литературы

1. Pathak H., Wolk J., Strey R., Wyslouzil B. Co-condensation of nonane and D_2O in a supersonic nozzle // J. Chem. Phys. 2014. 140, 034304.

Косов В.Н.^{1,2}, Федоренко О.В.², Калимов А.Б.²

¹ Республика Казахстан, 050040, Алматы, пр. аль-Фараби, 71

² Казахский национальный педагогический университет имени Абая,
Республика Казахстан, 050010, Алматы, пр. Достык, 13

kosov_vlad_nik@list.ru

ОСОБЕННОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ НА ГРАНИЦЕ СМЕНЫ РЕЖИМОВ «ДИФФУЗИЯ – КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ГРАВИТАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ»

Концентрационная гравитационная конвекция в изотермических бинарных смесях определяется традиционным механизмом смешения [1]. Добавление в систему третьего компонента приводит к возникновению новых эффектов. Изучая скорость диффузионного выравнивания концентраций компонентов в вертикальных каналах при определенных условиях была зафиксирована гравитационная концентрационная конвекция [2,3]. Аномальность конвекции заключалась в том, что она возникла при условиях, предполагающих убывание плотности смеси с высотой. Такая ситуация требует новых исследований, в частности,

изучения формирующихся концентрационных полей в диффузионных каналах различной формы. В докладе приведены опытные данные по изучению особенностей массопереноса в многокомпонентных смесях, содержащих углеводородные и парниковые газы. Представлены численные результаты, показывающие возникновение структурированных течений на границе смены режимов «диффузия – конвекция».

Экспериментальные исследования проводились на устройствах, реализующих систему двух колб, соединенных вертикальным каналом [2]. В верхней колбе размещали бинарную смесь газов с минимальным и максимальным молекулярными весами. Газ с промежуточным молекулярным весом в нижней колбе. Давление и температура в колбах поддерживались одинаковыми. Методика проведения опытов состояла в следующем. Капилляр открывался, начиналось смешение и время от времени регистрировался состав смеси в колбах. Опытные концентрации нормировали на значения, вычисленные при диффузии по уравнениям Стефана-Максвелла [1]. Полученные таким образом безразмерные параметры α_i характеризуют соответствующий тип смешения. Если $\alpha_i \approx 1$, то имеет место диффузия. Исследование зависимости α_i от давления p показало, что в тройных газовых смесях $\text{CH}_4 + \text{R12} - \text{n-C}_4\text{H}_{10}$, $\text{CH}_4 + \text{R12} - \text{Ar}$, $\text{He} + \text{R12} - \text{Ar}$, $\text{He} + \text{CO}_2 - \text{N}_2$, при различном содержании компонента с наибольшим молекулярным весом, при определенном критическом значении p_{cr} параметр α_i превышает единицу. Возникает аномальная концентрационная гравитационная конвекция.

Кажущаяся парадоксальность возникновения конвекции в системах, где в начальный момент времени реализуются условия убывание плотности смеси с высотой объясняются различными диффузионными способностями компонентов. Как показали численные исследования в диффузионных каналах возникают области с существенно нелинейным распределения концентраций, которые приводят к нелинейному распределению плотности газовой смеси с последующим возникновением структурированных конвективных течений [4]. Проведенные расчеты позволили выявить пульсационный режим массопереноса, который связан с возникновением структурных конвективных формирований. Также проведена оценка влияния давления, исходного состава смеси и геометрических характеристик диффузионного канала на интенсивность парциального смешения компонентов на границе смены режимов «диффузия – конвекция».

Список литературы

1. Multicomponent mass transfer / R. Taylor, R. Krishna. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993. 579 p.

2. **Косов В.Н., Селезнев В.Д., Жаврин Ю.И.** Эффект разделения компонентов при изотермическом смешении тройных газовых систем в условиях свободной конвекции // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 10. С. 139-140.
3. **Дильман В.В., Липатов Д.А., Лотхов В.А., Каминский В.А.** Возникновение неустойчивости при нестационарном испарении бинарных растворов в инертный газ // ТОХТ. 2005. Т. 39. № 6. С. 600 - 606.
4. **Kossov V., Fedorenko O., Zhakebayev D.** Features of multicomponent mass transfer in gas mixtures containing hydrocarbon components // Chem. Eng. and Technol. 2019. Vol. 42. No. 2. P. 896-902.

Краснова Н.П., Еремин А.В.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Самара, 443100, Молодогвардейская, 244
krasnova-pt@yandex.ru

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ШИПОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Проектирование современного теплообменного оборудования, обладающего максимальной тепловой мощностью при минимальных габаритных размерах, является одной из важнейших задач теплотехники. К важнейшим характеристикам теплообменных устройств относят их массу, объем, компактность (поверхность теплообмена в единице объема), стоимость изготовления, гидравлическое сопротивление и др.

В настоящей работе приведены результаты исследования гидравлического сопротивления конвективного газотока газового отопительного модуля (ГОМ) [1]. Газоток представляет собой плоскопараллельный канал с шипами цилиндрической формы. Ошиповка теплообменной поверхности приводит к существенному повышению эффективности ГОМ, однако, при этом увеличивается его гидравлическое сопротивление. В общем случае, сопротивление ошипованной поверхности выражается функциональной зависимостью от скорости потока w , поперечного и продольного шагов s_1 и s_2 , диаметра шипа d , количества рядов шипов z , динамической вязкости μ и плотности жидкости ρ .

Наиболее эффективным способом интенсификации теплообмена является турбулизация потока с применением шахматной расстановки шипов, а наименьшее гидравлическое сопротивление – с применением коридорной расстановки. Сопротивление движению теплоносителя с уменьшением живого сечения канала возрастает, поэтому предлагается выполнить комбинированный способ компоновки шипов в шахматно-коридорном исполнении (см. рис. 1). Эффективность теплоотдачи у коридорных пучков выше в стесненном варианте, а сопротивление ниже в шахматном расположении с большим продольным шагом [2]. Исследования для водогрейных труб [3] показали, что гидравлическое сопротивление при такой «сдвоенной» компоновке незначительно отличается от сопротивления одиночных труб в шахматном пучке.

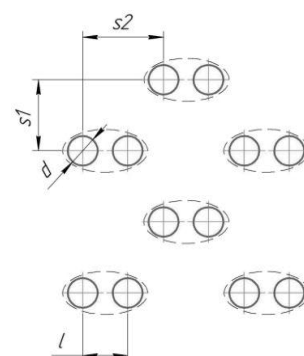


Рис. 1. Комбинированная схема расстановки шипов в канале. $s1$ – поперечный шаг, $s2$ – продольный шаг, d – диаметр шипа, l – расстояние между шипами в продольном расположении

Для определения гидравлического сопротивления газового отопительного модуля для различных вариантов расположения шипов использовалась следующая зависимость:

$$\Delta p = \left[3,2 + 0,66 \left(1,7 - \frac{s_1 - d}{s'_2 - d} \right)^{1,5} \cdot Re^{-0,27} \right] (z_2 + 1) \frac{w^2 \rho}{2},$$

где s'_2 – диагональный шаг труб, Re – критерий Рейнольдса, z_2 – число рядов шипов по глубине пучка.

С целью подтверждения полученных результатов выполнены также численные расчеты гидравлического сопротивления канала при различной компоновке шипов с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Выполненные исследования позволили определить оптимальную компоновку шипов в конвективном газоходе ГОМ, при которой отмечается опережающий рост относительного коэффициента теплоотдачи по сравнению с ростом относительного коэффициента сопротивления.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ в рамках научного проекта МК–2614.2019.8.

Список литературы

1. Патент РФ №2521698, МПК F24Н 1/10. Газовый отопительный модуль / Щелоков А.И. Краснова Н.П.; заявитель и патентообладатель Самар. гос.

техн. ун-т. - №2012139988 заявл. 18.09.2012; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19.

2. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.

3. Козлова Л.Г., Нелипович В.И., Эпик Э.Я. Теплоотдача шахматного пучка, образованного спаренными цилиндрами/Теплообмен в энергетических установках/ Киев: Наукова думка, 1978, 176с.

Кудинов В.А., Трубицын К.В., Еремин А.В., Ткачев В.К.

Самарский государственный технический университет,
443100, Самара, Молодогвардейская, 244

totig@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНО – НЕРАВНОВЕСНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ В ДВИЖУЩИХСЯ ЖИДКОСТЯХ

Используя модифицированную формулу закона Ньютона, в которой учитываются скорости и ускорения касательного напряжения и градиента скорости, получено локально – неравновесное уравнение Навье – Стокса, описывающее течение жидкости с учетом релаксационных явлений. Полученное уравнение позволяет устранить проблему бесконечной скорости передачи импульса, описываемую классическими уравнениями движения. Этот факт объясняется тем, что использование модифицированной формулы закона Ньютона позволяет избежать мгновенного изменения касательного напряжения (описываемого классической формулой) при любом изменении градиента скорости, ввиду того, что они в данном случае оказываются зависящими от времени. Анализ численного решения краевой задачи о распределении скорости в плоском канале позволил сделать вывод о том, что формирование профиля скорости во времени в условиях нелокального равновесия происходит с некоторым запаздыванием, оцениваемым коэффициентами релаксации жидкости. Было также показано, что в любой точке поперечного сечения канала происходят колебания скорости, частота и амплитуда которых определяется релаксационными свойствами жидкости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-70021.

Кудинов И.В.¹, Соболев С.Л.^{1,2}, Крюков Ю.А.¹, Михеева Г.В.¹

¹Самарский государственный технический университет,
443100, Самара, Молодогвардейская, 244

²Институт проблем химической физики РАН,
142432, Московская обл., Черноголовка, проспект ак. Семенова, 1
igor-kudinov@bk.ru

ДВУХТЕМПЕРАТУРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ НАНОПЛЁНКЕ, ОБЛУЧАЕМОЙ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Выполнено численное исследование двухтемпературной модели локально-неравновесного теплообмена в металлической наноплёнке с внутренним источником теплоты, инициируемым сверхкороткими импульсами лазерного облучения. Модель включает систему взаимосвязанных дифференциальных уравнений для электронного газа и кристаллической решётки и учитывает релаксационные явления. Внутренний источник теплоты принимался в таком виде, чтобы максимальная мощность достигалась в течение сверхкороткого диапазона начального времени на сверхкоротком участке пространственной переменной. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что максимальное влияние на температурное состояние системы оказывает коэффициент объёмной теплоотдачи w_i (при неизменных прочих параметрах). Показано, что при малых значениях w_i наблюдается большое различие в температурах электронов Θ_1 и ионов Θ_2 при незначительном градиенте каждой из этих температур в пределах толщины пластины δ . При этом в зоне действия внутреннего источника теплоты (по временной и пространственной переменным) наблюдается скачок электронной температуры Θ_1 . С уменьшением w_i время достижения стационарного состояния возрастает. С увеличением w_i величина температуры в скачке, различие в температурах электронов и ионов и время достижения стационарного состояния уменьшаются, а градиент в пределах толщины пластины для каждой из температур Θ_1 и Θ_2 возрастает. При больших значениях w_i в процессе выравнивания температур температура ионов в точке приложения источника лазерного облучения может превысить температуру электронов. Этот факт объясняется более интенсивным теплообменом в электронном газе, вследствие его более высокой теплопроводности по сравнению с ионной решеткой. Для сверхтонких металлических плёнок возникает режим, при котором температуры электронного газа и кристаллической решётки изменяются по всему объёму тела (без градиента по пространственной переменной). С уменьшением толщины пленки равновесная температура увеличивается. Данная модель может быть использована для оценки температурного состояния плазмы при её нагреве потоком лазерного облучения и для

анализа температурных полей жидкометаллической среды в водородном реакторе, нагреваемом индукционным источником теплоты. Разработанная методика, используя экспериментальные данные о температурном состоянии пластины, путем решения обратной задачи теплопроводности может применяться для идентификации мощности источника теплоты, возникающего в скин-слое и его толщины при электромагнитном облучении материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта

№ 20-38-70021. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 20-58-53017. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках соглашения № 05.607.21.0311 от 02.12.19, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60719X0311.

Кузеванов В.С.¹, Закожурников С.С.², Закожурникова Г.С.³, Гаряев А.Б.⁴

¹ Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском, Волжский, 404110, проспект Ленина, 69

² Московский финансово-юридический университет МФЮА
115191, Москва, ул. Серпуховский вал, д. 17, стр. 1

³ Волгоградский государственный технический университет
400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28

⁴ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

galya.vlz@mail.ru

МОДЕЛЬ СИНТЕЗА МЕЛКОДИСПЕРСНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКОЙ ШИХТЫ

Реакторы, где синтез мелкодисперсных карбидов организован в электротермическом кипящем (псевдоожиженном) слое (реакторы ЭТКС), обладают некоторыми преимуществами в сравнении с печами сопротивления, используемыми для массового производства карбидов. Базовым преимуществом является непосредственное получение мелкодисперсной фракции карбидосодержащих частиц с меньшими удельными затратами электрической энергии.

В работе [1] представлена модель непрерывного синтеза карбида кремния в кипящем слое. При создании модели использовано условие стационарности производства конечного продукта в псевдоожиженном реакционном слое, в частности неизменность концентраций летучих компонентов химических реакций.

В настоящей работе исследованы нестационарные процессы в реакторе ЭТКС, работающем в режиме периодической загрузки в реакционный объем компонентов химических реакций синтеза карбида кремния: мелкодисперсных углеродосодержащих частиц и частиц SiO₂ (шихты). Разработана математическая модель синтеза для нестационарных условий. Получены соотношения для расчета изменения в процессе синтеза карбида кремния не только размеров твердых (жидких) частиц – участников химических реакций, но и концентраций летучих компонентов, влияющих на скорости этих реакций в рабочем объеме реактора ЭТКС.

Проведены расчеты по выявлению влияния определяющих факторов на выход конечного продукта и анализ этих результатов. Представлено сравнение результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными [2] по выходу карбида кремния в реакторе ЭТКС с периодической загрузкой шихты.

Список литературы

1. Kuzevanov V.S., Garyaev A.B., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Workshop "Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019". Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. С. 32106.
2. Бородуля В. А., Гребеньков А. Ж., Михайлов А. А.. Особенности образования различных структурных модификаций карбида кремния при его карботермическом синтезе в реакторе электротермического кипящего слоя // Тепло- и массоперенос – 2019 – Минск, 2019.

Кузеванов В.С.¹, Подгорный С.К.²

¹Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»
Волжский филиал, Волжский, 404110, Ленина, 69

²Производственное отделение «Левобережные электрические сети»,
филиал ПАО «Россети Юг» - «Волгоградэнерго»,
Волжский, 404122, 6 Автодорога, 10
serkonpod@gmail.com

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕСКОЛЬКИХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ

Газоохлаждаемый ядерный реактор относится к востребованным реакторам ядерных энергетических установок (ЯЭУ), в частности как высокотемпературный источник тепла. Но именно высокая температура материалов активной зоны определяет одну из проблем таких ЯЭУ при

работе в длительном ресурсном режиме. Проблему обостряет наличие вероятности инцидента или аварии, при которых быстро и значительно изменяются параметры теплоносителя и/или тепловая мощность реактора и, как следствие, температурное поле в активной зоне. Важным при этом является то, что системы безопасности ЯЭУ должны проектироваться с учетом знания об уровне температуры и в таких динамических процессах.

Мероприятия, приводящие к снижению неравномерности температурного поля, уровня максимальной температуры в элементах активной зоны с сохранением высокой температуры теплоносителя, несомненно повышают надежность активной зоны. Одним из таких мероприятий является профилирование массового расхода охлаждающего теплоносителя.

В настоящей работе исследованы изменения температурного поля газоохлаждаемого реактора ЯЭУ проекта «ГТ-МГР» [1] при скачкообразном одновременном изменении тепловой мощности реактора или температуры теплоносителя на входе в активную зону, общего расхода теплоносителя и коэффициентов теплоотдачи в охлаждающих каналах.

Расчётное исследование проведено с использованием авторской теплоаэродинамической модели и метода расчета [2-3]. Рассматривались варианты организации распределения массового расхода теплоносителя в активной зоне: без профилирования, с профилированием по условию одинаковых подогревов в каналах и по условию одинаковых максимальных температур стенок охлаждающих каналов. Выявлено преимущество профилированной активной зоны по обеспечению меньшего уровня максимальной температуры и темпа роста температуры в элементах ядерного реактора.

Результаты расчетов сравниваются с данными, полученными путем CFD моделирования [4].

Список литературы

1. GT-MHR Conceptual Design Description Report. NRC project No. 716 – San Diego: General Atomics, 2002. – PP. 58-62.
2. **Кузеванов В.С., Подгорный С.К.** Профилирование активной зоны газоохлаждаемого ядерного реактора с использованием интенсификаторов теплообмена. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 4. – С. 31-42.
3. **Кузеванов В.С., Подгорный С.К.** Температурное поле в активной зоне газоохлаждаемого ядерного реактора в переходных режимах при различных условиях профилирования массового расхода. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 3. – С. 53-65.
4. **Shaw С.Т.** Using Computational Fluid Dynamics. – New Jersey: Prentice Hall, 1992. – PP. 100-137.

Кузма-Кичта Ю.А.¹, Иванов Н.С.¹, Лавриков А.В.¹, Штефанов Ю.П.²,
Прокопенко И.Ф.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² ООО «НьюФрост», Протвино, Московская область, Россия
kuzma@itf.mpei.ac.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ НАНОЧАСТИЦ НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ИСПАРИТЕЛЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРА

В регионах вечной мерзлоты при строительстве протяженных зданий используются составные термостабилизаторы. В этом случае важно уменьшить термическое сопротивление стыка и усовершенствовать капиллярно-пористую структуру для улучшения транспорта жидкости в испарителе термостабилизатора. Микропористые покрытия повышают высоту капиллярного подъема жидкости, что увеличивает площадь испарения, повышает коэффициент теплоотдачи в испарителе и снижает его термическое сопротивление[1,2].

В работе исследованы образцы покрытий из наночастиц оксида алюминия, карбида кремния и углерода. С помощью электронного микроскопа изучались фотографии исследованных покрытий из наночастиц и рельеф поверхности. Для определения транспортных свойств покрытий наночастицы оксида алюминия, карбида кремния и углерода были нанесены на пластины и были измерены высоты и скорость подъема жидкости в пористом покрытии. С увеличением характерного размера частиц капиллярные свойства покрытия, сформированного такими частицами, улучшаются и были получены зависимости от количества слоев и концентрации частиц в растворе. Установлено, что наибольшая высота подъема жидкости достигнута при концентрации наночастиц оксида алюминия 0.067 %, и она близка к оптимальной, для данных условий. При дальнейшем изменении концентрации наночастиц в большую сторону, слой становится толще и частично разрушается, что приводит к ухудшению транспортных свойств. При уменьшении концентрации наночастиц снижение высоты подъема жидкости происходит из-за неоднородности покрытия. Установлено, что увеличение характерного размера частиц ведет к росту скорости подъема жидкости по слою наночастиц на вертикально установленной никелевой пластине. Наибольшая скорость движения жидкости получена в случае покрытия из наночастиц оксида алюминия. Нанесение наночастиц в

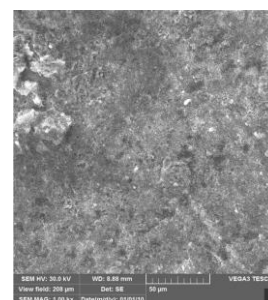


Рис. 1. Покрытие из наночастиц оксида алюминия

испаритель термостабилизатора приводит к улучшению транспорта теплоносителя от нижней образующей к верхней и снижению термического сопротивления термостабилизатора.

Список литературы

1. Yu A Kuzma-Kichta, N S Ivanov, A V Lavrikov "Reduction thermal resistance methods in the thermal stabilizer" Journal of Physics: Conference Series 1370 (2019) 012051 doi:10.1088/1742-6596/1370/1/012051
2. Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Лавриков А.В., Штефанов Ю.П., Прокопенко И.Ф. "Исследование методов уменьшения термического сопротивления составного термостабилизатора", Тепловые процессы в технике № 10 2019 Т.11, стр. 447
3. Лавриков А.В., Кузма-Кичта Ю.А., Штефанов Ю.П., Прокопенко И.Ф., Иванов Н.С., Стенина Н.А., "Формирование спиральных траншей в слое наночастиц на поверхности испарителя термостабилизатора", Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках : тезисы докладов. 7-я Всероссийская конференция с международным участием, стр. 126

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-08-01109.

*Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Киселев А.С., Кулешов Е.А.,
Кустова Е.А.*

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ В МИКРОКАНАЛЕ БЕЗ ПОКРЫТИЯ И С ПОКРЫТИЕМ ИЗ НАНОЧАСТИЦ

Применение компактных микроканальных теплообменников в технике позволяет повысить ее эффективность и снизить воздействие на окружающую среду. В работе [1] показано, что критическая тепловая нагрузка при кипении воды в микроканале с покрытием из наночастиц повышается до 50%, но уравнение для ее расчета не предложено.

В настоящей работе для расчета критической тепловой нагрузки в микроканале без покрытия и с покрытием из наночастиц применены формулы [2], полученные при исследовании кризиса теплообмена в горизонтальной трубе с односторонним нагревом. В случае канала без покрытия:

$$q_{\text{кр}0} = 9,1 \cdot 10^{-3} q_0 \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''}\right)^{0,25} \cdot Re_s^{0,26} \quad (1)$$

где $Re_s = \frac{\rho W_0}{\mu_s} D_r$; $W_0 = \frac{\rho W}{\rho'}$; $q_0 = r \sqrt{\frac{\sigma \rho''}{D_r}}$

Для микроканала с покрытием из наночастиц расчет критической тепловой нагрузки проведен без учета влияния недогрева жидкости и

$$q_{\text{кр}} = q_{\text{кр}0} \Psi_{\text{п.п}} \quad (2)$$

Влияние покрытия из наночастиц на критическую тепловую нагрузку описывается выражением (3):

$$\Psi_{\text{п.п}} = 1 + 0,44 N^{0,1} (1 - 0,25 Re_s^{0,1}) \quad (3)$$

где $N = \left(\frac{D_{\text{max}} r \rho' \Delta T_s}{4 \sigma T_s}\right) m$; m - выбирается по данным работы [1]

$$m = -16300 \frac{\delta_{\text{п.п}}}{\lambda_{\text{эф}}} + 4;$$

$\delta_{\text{п.п}}$ – толщина слоя наночастиц выбирается равной 500 нм;

D_{max} – размер частиц выбирается равным 50 нм;

N – характеризует увеличение плотности центров парообразования для поверхности с покрытием;

$\lambda_{\text{эф}}$ – рассчитывается по формуле: $\lambda_{\text{эф}} = \gamma \lambda_{\text{к}} + (1 - \gamma) \left(\frac{1 - \varepsilon}{\lambda_{\text{к}}} + \frac{\varepsilon'}{\lambda'} + \frac{\varepsilon''}{\lambda''}\right)^{-1}$

Уравнения (1) и (2) сопоставлены с опытными данными для микроканала без покрытия: [1], [3] и результатами авторов; и для микроканала с покрытием из наночастиц – данными [1]. Получено удовлетворительное согласование опытных и расчетных данных. Однако массив данных очень ограниченный и его необходимо расширить, что позволит усовершенствовать уравнения для расчета критической тепловой нагрузки. Кроме того, необходимо уточнить выбор значений $\delta_{\text{п.п}}$, D_{max} , $\lambda_{\text{эф}}$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00183

Список литературы

1. М.В. Шустов, Ю.А. Кузма-Кичта, А.В. Лавриков «Покрытие микроканала наночастицами – эффективный метод повышения критической тепловой нагрузки.» Теплоэнергетика, 2017г.

2. Дзюбенко Б.В., Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, Л.П. Холпанов. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах. ЦНИИАТОМИНФОРМ. 2008. С. 530.

3. V. V. Kuznetsov, A. S. Shamirzaev «The Influence of the Mass Flow Rate on the Critical Heat Flux during Subcooled Deionized Water Boiling in a Microchannel Cooling System», ISSN 1063-7850, Technical Physics Letters, 2018, Vol. 44, No. 10, pp. 938–941

Кузнецов В.В.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, Академика Лаврентьева, 1
vladkuz@itp.nsc.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ПРИ ФАЗОВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ В МИКРОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Перспективным направлением развития современных энергетических установок является применение сложных канальных систем с каналами малого размера, позволяющих значительно повысить интенсивность фазовых и химических превращений. Отсутствие надежных методов расчета процессов теплообмена в данных условиях в значительной степени сдерживает разработку энергоэффективных энергетических установок в таких областях, как водородная, распределенная и солнечная энергетика [1]. В данной работе рассмотрены основные закономерности фазовых и химических превращений при кипении, испарении, конденсации и химических реакциях в микроразмерных системах, предложены и экспериментально обоснованы методы расчета этих процессов применительно к высококомпактным аппаратам различного применения, микроканальным системам охлаждения и кондиционирования, микроструктурным реакторам-теплообменникам водородной энергетике и устройствам получения жидкого топлива из синтез-газа.

Рассмотрены методы моделирования процессов теплообмена при фазовых переходах в пластинчато-ребристых испарителях и конденсаторах воздухоразделительных установок и систем сжижения природного газа. Разработана математическая модель теплообмена в прямоугольных каналах малого размера, основанная на получении решений для течения жидкости в углах и на стенках каналов с последующей сшивкой решений на линии сопряжения. Установлено, что формирование сухих пятен и увеличение локального коэффициента теплоотдачи вблизи контактной линии жидкость-пар-стенка типичны для испарения в компактных двухфазных теплообменниках. Предложенная модель теплообмена хорошо согласуется с экспериментальными данными и закладывает основы расчета компактных испарителей и конденсаторов различного применения.

Для обоснования применения микроканальных систем отвода тепла от теплонапряженных зон энергетического оборудования и электронных устройств разработан новый метод расчета теплообмена при кипении и конденсации в условиях вынужденной конвекции в данных условиях, учитывающий совместно вклад подавления кипения, двухфазной конвекции и испарения пленки жидкости. Обсуждено применение

данного метода для расчета фазовых переходов в микроразмерных системах и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными в широком диапазоне массовых скоростей, приведенных давлений и тепловых потоков. Разработаны и экспериментально обоснованы методы интенсификации теплообмена при фазовых переходах и повышения критической тепловой нагрузки для кипения воды и хладонов в микроканальных системах охлаждения, выявлены закономерности теплообмена при микроструйном охлаждении зон повышенного тепловыделения.

Синтезированы многокомпонентные каталитические наноструктуры на основе родия и палладия для проведения паровой и автотермальной конверсии углеводородов и спиртов в микроструктурных реакторах-теплообменниках водородной энергетики. Изучены механизмы и разработаны методы расчета химических превращений при конверсии углеводородов в микроканалах с тонкослойным катализатором, выявлены условия высокой конверсии исходных продуктов в синтез-газ. Установлены закономерности и разработаны методы интенсификации химических превращений при низкотемпературном синтезе Фишера-Тропша в микроструктурном многофазном реакторе, направленном на получение жидких и твердых высокомолекулярных углеводородов из синтез-газа.

Исследование выполнено в рамках госзадания ИТ СО РАН, за счет гранта РНФ (проект №161910519-П) и гранта РФФИ 18-08-01282.

Список литературы

1. **Abramson A.R., Tien C.L.** Recent Developments in Microscale Thermophysical Engineering // J. Microscale Thermophys. Eng. 1999. V. 3. No 4. P. 229—244.
2. **Kuznetsov V.V.** Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // Proc. Int. Heat Transfer Conf. IHTC14. 2010. Washington, USA. IHTC14-22570.

Кузнецов Г.В.¹, Батищева К.А.¹

¹ Национальный исследовательский томский политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина, 30
bka1801@mail.ru

ИСПАРЕНИЕ МИКРОКАПЕЛЬ ВОДЫ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

В связи с динамикой потребления ресурсов, становится актуальным совершенствование технологий энергосбережения и повышение энергоэффективности промышленных теплообменных установок, в частности, за счет улучшения теплогидравлических характеристик материалов. Одним из перспективных способов улучшения характеристик используемых для производства энергетического оборудования материалов является обработка их поверхностей лазерным излучением. Применение такой технологии изменяет адгезию с жидкостью за счет увеличения шероховатости и химического состава приповерхностного слоя металлов и сплавов. В связи с этим целью данной работы являлось определить основные закономерности испарения капель дистиллированной воды с полированной и обработанной лазерным излучением поверхностей алюминиевого сплава.

Капли дистиллированной воды объемом 5 мкл испарялись на установке, схема и принцип работы которой подробно описаны в [1]. В основе работы установки лежит теневая методика, по которой геометрические размеры испаряющейся с подложки капли определялись по ее теневым изображениям, полученным с помощью видеокамеры и источника плоскопараллельного света. Теневые изображения обрабатывались в программном комплексе «Advance» (Kruss, Германия), с помощью которого были определены объемы капли, контактные углы и контактные диаметры методами «Тангенциальный 1», при использовании которого капля рассматривается как часть круга, построенного по трем точкам.

Проведя анализ результатов экспериментов по испарению капель выделен ряд особенностей, характеризующих механизм процесса испарения с поверхности образцов при температуре окружающей среды 313 К. После выдавливания капель на полированную поверхность происходил пиннинг контактной линии, занимающий 95% от времени испарения капли. Затем испарение протекало в режиме депиннинга (отрыв и отступление контактной линии).

После лазерной обработки пиннинг контактной линии увеличился до 99% (20-30 секунд) от времени испарения капли. В условиях настоящего эксперимента «stick-slip» режим, характерный для гидрофобных шероховатых подложек, не зарегистрирован из-за высокой адгезии при

длительном контакте жидкости с шероховатой поверхностью образцов. Полученный результат можно объяснить увеличением адгезии между жидкостью и поверхностью при их длительном контакте, а также разрушением воздушных подушек и заполнением жидкостью микро- и нанонеровностей.

Контактные углы уменьшались на протяжении всего времени испарения капель на полированной и обработанной лазерным излучением поверхностях и не зависели от движения контактной линии. Результаты экспериментов позволили выделить две стадии испарения капли: стадия постоянного контактного диаметра (уменьшение контактного угла при пиннинге контактной линии) и смешанная стадия (контактные диаметр и угол уменьшаются).

Большая длительность пиннинга позволяет контролировать положение капель на поверхности и расстояние между соседними каплями. Последнее является важным условием при конструировании систем на базе капельного охлаждения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90027.

Список литературы

1. Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V., Orlova E.G. и др. Unification of the textures formed on aluminum after laser treatment // APPL. 2019. V. 469. P. 974–982.

Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Исламова А.Г.

Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
Томск, 634050, проспект Ленина, 30
lafleur@tpu.ru

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ МЕТАЛЛОВ ЗА СЧЕТ НАНЕСЕНИЯ ТЕКСТУРЫ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Течения жидкостей в каналах технических устройств (системы охлаждения энергонасыщенного оборудования, химические и нефтехимические технологии, системы и устройства медико-биологического назначения) сопровождаются соответствующим взаимодействием жидкости с поверхностью этих каналов. Актуальным представляется возможность управлять такими течениями, интенсифицируя или замедляя протекание процессов теплопереноса, массообмена, химического реагирования и др. Управлять течениями можно за счет изменения свойств смачиваемости поверхности. Известно

[1], что после обработки поверхностей металлов лазерным излучением они изменяют свойства смачиваемости от супергидрофильности до гидрофобности. Однако пока нет экспериментальных данных, подтверждающих возможность управления растеканием жидкости за счет нанесения текстуры на металлические поверхности лазерным излучением.

Работа направлена на установление возможности управления растеканием жидкости на поверхностях металлов лазерным излучением. Поверхности алюминий-магниевого сплава АМг6 обрабатывались иттербиевым наносекундным лазером при фиксированной энергии в импульсе 1 мДж в режиме ТЕМ00, частоте 20 кГц, времени воздействия 200 нс. Сформированы текстуры: анизотропная (за счет перекрытия светового пятна на поверхности), и упорядоченная, состоящей из кратеров, расположенных на расстоянии три диаметра кратера друг от друга. Растекание реализовано при подаче и откачивании дистиллированной воды шприцевым насосом через отверстие с нижней стороны подложки.

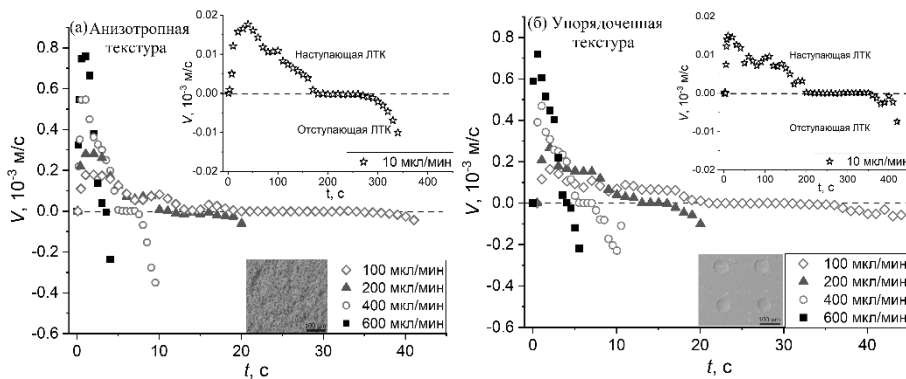


Рис. 1. Изменение скорости перемещения жидкости во времени на (а) анизотропной и (б) упорядоченной текстурах.

По результатам полученных зависимостей (Рис.1) установлено, что на анизотропной текстуре, демонстрирующей гидрофобность (статический контактный угол (СКУ) равен 131°), скорости перемещения жидкости выше, чем на поверхностях с упорядоченной текстурой (СКУ равен $82,6^\circ$), несмотря на то, что поверхность с анизотропной текстурой более шероховатая (параметры шероховатости почти в десять раз больше параметров упорядоченной текстуры [2]). Сформулирована гипотеза о том, что на скорость перемещения жидкости оказывают влияние режимы смачивания – гомогенный (полное заполнение жидкостью углублений) и гетерогенный (частичное проникновение жидкости в углубления рельефа, образуются локальные «воздушные подушки»). Более быстрое перемещение жидкости на образце с анизотропной текстурой можно объяснить тем, что на такой поверхности с гидрофобными свойствами (в условиях стабилизации свойств смачиваемости) реализуется гетерогенное смачивание, а на поверхностях с упорядоченной текстурой – гомогенное. Гетерогенный режим приводит к проскальзыванию и снижению

гидродинамического сопротивления трению потока, следовательно, скорость перемещения жидкости увеличивается.

Список литературы

1. Kietzig A.-M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P. Patterned superhydrophobic metallic surfaces // *Langmuir*. 2009. V. 25. С. 4821—4827.
2. Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V, Orlova E.G., Batishcheva K., Penok S.S. Unification of the textures formed on aluminum after laser treatment // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 469. P. 974—982.

*Кузьменков Н.В.*¹, *Королева А.П.*^{2,3}, *Французов М.С.*³

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана,

Москва, 105005, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

³ Центральный институт авиационного моторостроения
им. П.И. Баранова,

Москва, 107150, Авиамоторная, 2

nickuzmenkov@yahoo.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КРУГЛОЙ ТРУБЕ С ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ

Одним из сдерживающих факторов создания высокоэффективных теплообменных аппаратов является ограничение в массогабаритных характеристиках. Во многих случаях эту проблему можно решить с помощью применения методов интенсификации теплообмена. Применяемые методы должны быть эффективными и не допускающими роста потерь давления, многократно превышающих рост теплоотдачи. В трубчатых теплообменниках с турбулентным течением теплоносителя наиболее простым методом интенсификации является применение поверхности с искусственной шероховатостью. Основной вклад в рост теплообмена при этом вносит не развитие площади теплоотдачи, а создание в пристенной зоне отрывных зон и организованных вихревых структур [1], не вызывающих значительного роста гидравлических потерь, достигаемого при высоких ребрах.

В данной работе рассмотрена интенсификация процессов теплообмена в круглой трубе при турбулентном течении воздуха за счет дискретной искусственной шероховатости периодически расположенными выступами прямоугольной формы. В работе приведены результаты поиска эффективных параметров шероховатости, при которых достигается максимальное сокращение габаритов теплообменника, а

также анализ поведения относительных показателей теплоотдачи и гидравлического сопротивления. Рассмотрен широкий диапазон параметров выступов ($h/D=0.01\dots 0.1$, $t/D=0.05\dots 5$) и параметров течения ($Re=10^4\dots 10^6$). Решение задачи произведено численно для 546 комбинаций перечисленных параметров в программном пакете ANSYS FLUENT.

Результаты численного эксперимента показали хорошее согласование с данными, приведенными в классической работе [1] и были верифицированы на результатах расчета других численных моделей: трехслойной схемы турбулентного пограничного слоя Мигая и четырехслойной схемы Лобанова [2]. Выявлено влияние параметров на теплообмен и гидравлическое сопротивление, составлены критериальные зависимости для указанных параметров. Произведена аппроксимация по полученным данным с использованием искусственной нейронной сети с одним скрытым слоем. Установлены наиболее эффективные параметры, позволяющие добиться наибольшего сокращения массы и габаритов теплообменного аппарата с применением данного метода интенсификации.

Список литературы

1. **Калинин Э.К., Дрейцер Г.А. Ярхо С.А.** Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
2. **Лобанов И.Е.** Теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах на базе четырехслойной схемы турбулентного пограничного слоя. // Современные проблемы науки и образования. 2010. №3.

*Ларионов К.Б.^{1,2} Зенков А.В.¹, Мишаков И.В.^{2,3}, Калтаев А.З.¹,
Бауман Ю.И.^{2,3}, Громов А.А.²*

¹ Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина 30

² Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»,
Москва, 119049, Ленинский проспект, 4

³ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева 5
laryk070@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИФИЦИРУЕМОГО ЗАЖИГАНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ И КОКСА МЕДНОСОЛЕВЫМИ ДОБАВКАМИ

Каталитическое сжигание твердого топлива – современный способ термического преобразования химической энергии в тепловую, отличающийся высокой глубиной конверсии за счет интенсификации процесса горения при сравнительно низких температурах [1-2]. В работе [3] было установлено, что использование активирующих добавок солей позволяет обеспечить более широкий диапазон регулирования параметров процесса окисления, выраженный в повышении степени конверсии угля, снижения начальной температуры интенсивного окисления, энергии активации и общего времени процесса термического преобразования топлива в целом. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования интенсифицируемого зажигания каменного угля и кокса медносолевыми добавками (CuSO_4 , $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$).

В качестве исходных образцов были использованы каменный уголь шахты «Алардинская» Кемеровской области (У) и кокс (К), полученный после пиролитической обработки соответствующего топлива (У). Данные образцы были измельчены и фракционированы на ситах с размером ячеек менее 80 мкм. В качестве активирующие добавки (CuSO_4 , $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) были нанесены на образцы угля и кокса методом пропитки по влагоемкости в количестве 5 мас.% (в пересчете на сухую соль).

Исследование зажигания образцов осуществлялось с помощью экспериментального стенда, основными элементами которого являются: муфельная печь (камера сгорания), высокоскоростная видеокамера и платформа координатного механизма для ввода насыпки образца в печь массой 0,1 мг. Зажигание образцов осуществлялось при температуре 500, 600 и 700 °С. Временем задержки зажигания считалось время от момента входа держателя с топливной насыпкой в фокус камеры до начала

образования видимого свечения поверхности гранулы топлива, соответствующего началу процесса горения.

Наибольшее значение времени задержки зажигания T_i топлив наблюдалось при температуре 500 °С для образца К, которое составило 19,05 с. Для образца У значение данного параметра было равно 6,75 с. С увеличением температуры греющей среды (от 500 до 700 °С) прослеживалась экспоненциальная зависимость сокращения времени задержки зажигания (для образца У в 3,7 раза, для К в 8,8). При введении активирующих добавок, параметр T_i был сокращен в 1,5-2,2 раза в зависимости от типа рассматриваемого образца. С ростом температуры греющей среды активность используемых добавок не снижалась. Анализируя полученные значения изменения времени задержки зажигания при температуре нагрева 500 °С, можно выстроить следующий ряд активности используемых добавок: $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 > \text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 > \text{CuSO}_4$. С ростом температуры (700 °С) вклад в изменение T_i сульфата меди усиливается, и активность добавок выстраивается (по убыванию) в следующий вид: $\text{CuSO}_4 > \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 > \text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$. Усиление активности сульфата меди можно объяснить характерной температурой разложения данной добавки, которая составляет 650 °С.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках проекта № НШ-2513.2020.8

Список литературы

1. **Пармон В.Н., Симонов А.Д., Садыков В.А., Тихов С.Ф.** Каталитическое сжигание: достижения и проблемы // Физика горения и взрывы. 2015. Т. 51. № 2. С. 5-13.
2. **Симонов А.Д., Федоров И.А., Дубинин Ю.В., Языков Н.А., Яковлев В.А., Пармон В.Н.** Каталитические тепловые установки для промышленного теплоснабжения // Катализ в промышленности. 2012. № 3. С. 50-57.
3. **Larionov A.A., Gromov A.A.** Non-isothermal oxidation of coal with $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ and $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ additives // Int. J. Coal Sci. Technol. V. 6. P. 37-50.

Ле Т., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Неровнов А.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
vladimir.melikhov@erec.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫРАВНИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОГРУЖЕННОГО ДЫРЧАТОГО ЛИСТА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1500

Эпюра тепловыделений по длине и ширине горизонтального парогенератора (ПГ) ПГВ-1000 характеризуется значительной неравномерностью. Для выравнивания паровой нагрузки зеркала испарения в сепарационной схеме парогенератора ПГВ-1000 использован погруженный дырчатый лист (ПДЛ) с равномерной перфорацией пластин ПДЛ, представляющий собой выравнивающее распределительное устройство с высоким коэффициентом гидравлического сопротивления, определяемого его живым сечением и одинакового для всего ПДЛ. В парогенераторе ПГВ-1500 неравномерность паровой нагрузки возрастает. Повысить эффективность выравнивания паровой нагрузки ПГВ-1500 при исходной более высокой начальной неравномерности по сравнению с ПГВ-1000 можно с помощью переменной перфорации отдельных зон ПДЛ, обеспечивающей выравнивание паровой нагрузки за счет перетока пароводяной смеси под ПДЛ из более нагруженных зон к менее нагруженным.

Для исследования выравнивания неравномерной паровой нагрузки с помощью ПДЛ с неравномерной перфорацией была сооружена установка ПГВ (Электрогорский научно-исследовательский центр), представляющая собой модель верхней части горизонтального парогенератора и выполнены эксперименты. Анализ этих экспериментов был проведен с помощью трехмерного кода STEG (каф. АЭС, НИУ "МЭИ"), основанного на двухскоростной двухтемпературной модели течения пароводяной смеси [1]. Было установлено, что код STEG достаточно успешно воспроизводит экспериментальные данные по перепадам давления и объемным паросодержаниям для всех практически важных режимов.

В данной работе анализируется выравнивание неравномерной паровой нагрузки, возникающей в парогенераторе ПГВ-1500, с помощью ПДЛ с различной перфорацией. Были рассмотрены: 1) ПДЛ с равномерной степенью перфорации всех пластин и 2) ПДЛ с различной степенью перфорации пластин, предложенный на основе гидравлических расчетов в [2]. Расчеты показали, что данные конструкции ПДЛ имеют недостаточную выравнивающую способность. Проведенные затем поисковые варианты расчетов кодом STEG позволили определить

оптимальную конструкцию ПДЛ, обеспечивающую наилучшее выравнивание неравномерной паровой нагрузки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-01159).

Список литературы

1. Le T.T., Melikhov, V.I., Melikhov, O.I., Nerovnov A.A. and Nikonov S.M. Validation of the STEG code using PGV experiments on hydrodynamics of horizontal steam generator // Nuclear Engineering and Design. 2020. Vol. 356. 110380. P. 1—18.
2. Трунов Н.Б., Сотсков В.В., Агеев А.Г., Васильева Р.В. Приближенная методика расчета переменной перфорации погруженного дырчатого листа горизонтального парогенератора // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Обеспечение безопасности АЭС". 2006. Вып.15. С.89-99.

Левин А.А., Хан П.В.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Иркутск, 664033, Лермонтова, 130
polinakhan@gmail.com

К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПЕРЕХОДА К ВЗРЫВНОМУ КИПЕНИЮ ПОТОКА НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

Введение. Построение модели пузырькового кипения, определение его продолжительности и условий перехода в взрывному кипению в условиях нестационарного нагрева в потоке недогретой жидкости является актуальной задачей, имеющей приложения в энергетике и других областях промышленности. Широко известны подходы к определению условий, ограничивающих эффективное тепловыделение в терминах критического теплового потока (CHF). Предшествующая кризису стадия пузырькового кипения также является объектом пристального изучения, с целью построения предсказательных зависимостей для основных характеристик паровой фазы, таких как плотность нуклеации, скорость роста пузыря и частота нуклеации. Несмотря на обширные экспериментальные исследования, в настоящий момент по-прежнему остается малоизученным процесс кипения при нестационарном тепловыделении. Быстроизменяющееся поле температур в последнем случае может различаться настолько, что большая часть уже широко применяемых эмпирически зависимостей становятся непригодны [1]. В данной работе предпринята попытка получить условия перехода к взрывному кипению на основании динамики развития пузырьковой фазы.

Экспериментальная установка. На экспериментальной установке «Высокотемпературный контур», подробно описанной в статье [1], была проведена серия экспериментов по изучению влияния параметров нагрева на продолжительность различных фаз кипения. Стальной нагреватель цилиндрической формы с внешним диаметром 12 мм, толщиной 1 мм и длиной 120 мм располагался внутри канала квадратного сечения со стороной 18 мм, по которому под действием насоса в восходящем направлении перемещался поток жидкости, предварительно нагретой до температуры ниже температуры насыщения. Стенки канала оснащены прозрачными окнами, через которое производилась скоростная видеосъемка в специальных условиях освещения. Промежуток времени от начала нагрева до перехода к взрывному кипению при различных значениях недогрева и мощности, подаваемой на нагреватель, составил от нескольких десятков до пары сотен миллисекунд и измерялся по данным видеосъемки и по скачку давления в потоке. Текущее давление измерялось малоинерционным датчиком с частотой измерения 10кГц.

Математическая модель. Сопоставление видеокадров кипения с графиком давления показало, что момент резкого увеличения темпа роста давления в канале соответствует моменту заполнения поверхности пузырьками. Как показали предыдущие исследования нестационарного вскипания недогретого потока воды [2], определяющим параметром для таких характеристик пузырькового кипения, как средняя плотность центров нуклеации N_a , средняя частота нуклеации f и максимальный диаметр пузырька D_m является температура поверхности нагревателя. Таким образом, успешное определение теплового баланса поверхности в течении стадии нестационарного пузырькового кипения позволяет вывести соотношение для доли поверхности нагревателя занятой паровой фазой. Приравнивая ее единице, получаем выражение для температуры поверхности, при которой ожидается переход к взрывному кипению. Проведено сопоставление этих данных с результатами измерения давления и температуры. Заметим, что при выделяемой мощности, много большей критического теплового потока, который может быть отведён от поверхности нагревателя, зависимость температуры нагревателя от времени может быть оценена аналитически. Это позволяет использовать данную модель для предсказания времени перехода к взрывному кипению в тех случаях, когда известна только начальная температура потока и мощность нагрева.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-29-10019).

Список литературы

1. Levin A. A., Khan P. V. Experimental observation of the maximum bubble diameter in non-stationary temperature field of subcooled boiling water flow // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2018. V. 124. P. 876–883.
2. Levin A., Khan P. Characteristics of nucleate boiling under conditions of pulsed heat release at the heater surface // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 149. P.1215-1222.

Лепешкин А.Р.^{1,2}

¹ «МАИ» Национальный исследовательский университет,
Москва, 125993, Волоколамское шоссе, 4

² ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,
111116, Москва, Авиамоторная, 2
lepeshkin.ar@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ И ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

Известно несколько эмиссионных эффектов, заключающихся в испускании электронов телами под воздействием различных внутренних и внешних факторов: термоэмиссионная, фотоэлектронная, вторичная электронная, автоэлектронная, взрывная электронная эмиссии.

Ранее было проведено исследование теплового состояния деталей из разных стальных сплавов [1].

В данной работе предложен метод исследования нового вида электронной эмиссии и теплового состояния деталей при воздействии механических колебаний. С его помощью проведены исследования. Разработано устройство для определения указанных характеристик, которое представляет собой конструкцию с ультразвуковым преобразователем и стержнем (волноводом) с электронагревателем. Внутри средней части корпуса устройства расположен преобразователь, работающий на частоте 20 кГц с интенсивностью 50 Вт и на конце конструкции - стальной стержень. Методика исследований предусматривала закрепление на середине стержня переменного сечения (в виде конуса) электронагревателя с теплоизоляцией, состоящего из нескольких витков хромелевого провода. Кончик стержня выполнен в виде плоской расширяющейся части. В точке кончика стержня исследовалась температура при передаче тепла от электронагревателя. Для питания электронагревателя использовался стабилизированный источник питания. В первом эксперименте проведены исследования эмиссии электронов, которая возникала под воздействием высокочастотных ультразвуковых (УЗ) механических колебаний. Для этого на конце кончика стержня была установлена первая медная пластина и параллельно ей вторая медная пластина. Воздушный зазор между

пластинами изменялся при исследованиях. Для измерения ЭДС и тока электронной эмиссии вторая пластина через соединительный кабель подключалась к чувствительному анализатору сигналов и спектра МІС. Получены значения тока электронной эмиссии (рассчитанные по измеренным значениям ЭДС) при увеличении зазора между пластинами от 0.1 до 1.0 мм и более при воздействии УЗ колебаний. Во втором эксперименте на указанном стержне была закреплена лопатка турбины с электронагревателем. Параллельно концевому сечению лопатки с воздушным зазором была установлена никелевая пластина, подключенная к анализатору МІС. Получены также значения тока электронной эмиссии (рассчитанные по измеренным значениям ЭДС) при увеличении зазора между пластинами от 0.1 до 1.0 мм и более при нормальной температуре и разных температурах и воздействии механических ультразвуковых колебаний. В третьем эксперименте проведены сравнительные исследования теплового состояния лопатки при воздействии УЗ колебаний и электронной эмиссии (при этом электроны эмиссии уносили часть тепла с лопатки) и без них. Анализ исследований показал, что под действием указанной эмиссии температура лопатки снижается на 20-30 °С и более. При снижении давления воздуха от 1.0 до 0.1 атм. в исследованиях ток эмиссии увеличился в 2 раза. Общее направление исследований по влиянию механических колебаний на электронную эмиссию и тепловое состояние деталей было начато в 2009 г (приоритет от 1990 г.). Полученные результаты имеют важное значение для учета электронной эмиссии с вращающихся рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей и других турбомашин при воздействии механических колебаний и указанной и термоэлектронной эмиссии при высоких температурах для более точного расчета теплового состояния лопаток в условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Lepeshkin A.R., Shcherbakov P.P. Investigation of thermal conductivity of metal materials on view of influence of ultrasonic waves // Journal of Physics: Conf. Series. 2017. V. 891. No. 012342

Лепешкин А.Р.^{1,2}, Воробьев С.В.²

¹ «МАИ» Национальный исследовательский университет,
Москва, 125993, Волоколамское шоссе, 4

² ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,

111116, Москва, Авиамоторная, 2

lepeshkin.ar@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТОВ И ТЕПЛОВИЗОРА

В настоящее время актуальна разработка и применение энергосберегающих методов нагрева. К одному из таких новых методов нагрева относится нагрев деталей с использованием сильных постоянных магнитов с улучшенными характеристиками.

В данной работе исследуется возможность нового метода нагрева модельных дисков, вращающегося в электромагнитном поле, созданном с применением сильных постоянных магнитов и возможность новой методики бесконтактных измерений с использованием тепловизора для регистрации со скоростью 50 кадров в секунду распределения температуры модельного диска на разных частотах вращения. Часть работы с использованием тепловизора выполнена при частичной поддержке РФФИ грант № 12-08-00332.

При вращении детали в поле магнита в ней наводится ЭДС и, таким образом, появляется тепловая энергия (мощность внутренних источников тепла при определенных условиях в зависимости от формы магнита). Однако, ранее нагрев вращающихся дисков с помощью постоянных магнитов, в том числе, и на разгонных и специальных стендах не рассматривался и не оценивался. Также не исследованы вопросы комбинированного нагрева вращающихся дисков с применением постоянных магнитов.

Разработка метода нагрева для получения тепловой энергии в дисках за счет вращения (выделения мощности внутренних источников тепла) в магнитном поле, созданном постоянными магнитами является актуальной задачей. При термоциклических испытаниях на разгонных стендах максимальная частота вращения малоразмерных дисков может составлять 8000 - 50000 об/мин и более. Технология изготовления современных постоянных магнитов совершенствуется и достигла определенного прогресса и в настоящее время для нагрева вращающихся малоразмерных дисков можно применить постоянные магниты из редкоземельных сплавов – неодим-железо-бор и самарий-кобальтовых сплавов, производство которых началось сравнительно недавно. Они намного сильнее обычных ферритовых магнитов и магнитов из других магнитных материалов. Это позволило использовать их в промышленности, в частности, они нашли широкое применение в электродвигателях и

генераторах энергетических установок (ветроустановок) для получения электрической или механической энергии.

Исследования теплового состояния двух модельных дисков (из нержавеющей стали) с разной толщиной, вращающихся в поле постоянных магнитов, проводились на разгонном стенде и на мини-установке с небольшим электромотором с частотой вращения до 9000 об/мин. Первый диск был препарирован термопарами на трех радиусах и установлен на разгонном стенде со ртутным токосъёмником. Второй диск установлен на мини-установке, которая была подготовлена для использования тепловизора. Исследования проводились на разных частотах вращения на разгонном стенде в вакуумной камере с давлением воздуха 0.1 атм. и на мини-установке в условиях атмосферного воздуха с регулированием зазора от нескольких мм до 10 мм между вращающимся диском и постоянными магнитами. По результатам исследований на разгонном стенде была достигнута температура диска 350 °С на 8000 об/мин., а на мини-установке была подтверждена работоспособность (и достаточная точность измерений) нескоростного тепловизора по регистрации распределения температуры вращающегося диска до 9000 об/мин.

Предложены новый метод нагрева вращающихся дисков с использованием сильных постоянных магнитов и новая методика бесконтактных измерений и регистрации распределения температуры вращающегося диска с использованием тепловизора. Разработанные методы можно использовать для нагрева вращающихся дисков, изделий и заготовок в машиностроении и энергетике.

Лепешкин А.Р.^{1,2}, Воробьев С.В.², Вербанов И.С.², Петров Н.М.¹

¹ «МАИ» Национальный исследовательский университет,
Москва, 125993, Волоколамское шоссе, 4

² ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,
111116, Москва, Авиамоторная, 2
lepeshkin.ar@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТА КРЫЛА ПРИ ОБЛЕДЕНЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВИЗОРА

Тепловизионная техника широко применяется при исследованиях и испытаниях в авиационной технике и машиностроении [1, 2].

Рассмотрена методика применения тепловизора при исследовании теплового состояния элемента крыла самолета и противообледенительной системы с имитацией условий полета на климатическом газодинамическом стенде. В термобарокамере (ТБК) создавались условия,

максимально приближенные к натурным условиям обледенения в полете. Для обводнения воздушного потока применялись гидропневматические форсунки, установленные на пилонах в трубопроводе. Размер и температура переохлажденных капель реализовывались путем установки сопел различного диаметра, а также изменения давления и температуры подаваемой воды в зависимости от характеристик потока [3, 5]. Во время работы системы горячий воздух подавался под экран в передней кромке крыла. При проведении испытаний осуществлялось измерение распределения температуры по поверхности исследуемого элемента с помощью модернизированной коротковолновой тепловизионной системы АГА-782. Температура поверхности определяется по градуировочной кривой используемого тепловизора, представляющей собой зависимость сигнала уровня излучения от температуры абсолютно черного тела. Температурная ошибка зависит от излучательной способности объекта, спектрального диапазона измерения и температуры. Важно определить численное значение коэффициента излучения, так как различие в коэффициентах излучения на 1 % эквивалентно разности температур 1К [4]. Значения коэффициентов излучения и отражения зависят от состояния поверхности, формы, структуры, распределения льда и водяной пленки, которые изменяются во время эксперимента. По результатам проведенных измерений получено распределение во времени температуры и теплового состояния элемента крыла после включения противообледенительной системы. С помощью установленных в термокамере видеокамер можно увидеть разрушение и унос ледяных наростов. Эксперименты показали, что применение тепловизионной техники позволяет определять места вероятного обмерзания и нарастания льда. Наиболее эффективно проводить испытания и диагностику противообледенительных систем различных типов совместно с фото- и видеонаблюдением. Это позволяет также получать полную тепловую картину изменения во времени объекта без установки дополнительных термопар, предупреждать нестандартные и аварийные ситуации, связанные с перегревом во время проведения эксперимента. Кроме того, в работе предлагается использовать ультразвуковые преобразователи с целью возбуждения механических колебаний и повышения теплопроводности в деталях для повышения эффективности работы противообледенительных систем. Разработанные в результате выполненной работы методики могут быть использованы в исследовательских работах по изучению обледенения, а также в эксплуатации и при диагностике элементов летательных аппаратов и двигателя.

Список литературы

1. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. М.: Инфра-М, 2019. 282 с.
2. Лепешкин А.Р. и др. Теплофизические измерения при термоциклировании лопаток газотурбинных двигателей с керамическими покрытиями // ТВТ. 2010. Т. 48. №5. С. 734-740.
3. Основы расчета, конструирования и испытаний противообледенительных систем авиационных двигателей / А.Н. Антонов, Н.К. Аксенов, А.В. Горячев, С.В. Чиванов. М.: ЦИАМ, 2001. 268 с.
4. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
5. Юхневич Г.В. Инфракрасная спектроскопия воды. М.: Наука, 1973. 207 с.

Лепешкин А.Р.^{1,2}, *Вербанов И.С.*², *Ильинская О.И.*¹, *Фетисов М.В.*¹,
*Петров Н.М.*¹

¹ «МАИ» Национальный исследовательский университет,
125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4

² ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,
111116, Москва, Авиамоторная, 2

³ АО «ОДК»,
105118, Москва, просп. Буденного, 16
lepeshkin.ar@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ

Проведение испытаний теплообменников и их элементов возможно на различных видах испытательного оборудования, имитирующего условия их работы в газовом потоке газотурбинного двигателя (ГТД). Это могут быть газодинамические установки, установки с высокочастотным (ВЧ) индукционным нагревом [1, 2], установки с электронагревом и с радиационным нагревом. Газодинамический стенд позволяет производить испытание с максимальным приближением к реальным условиям, однако, стоимость таких испытаний очень высока и на этапе прочностной доводки применение их нецелесообразно. ВЧ нагрев при достаточно высокой частоте удовлетворительно имитирует поверхностный нагрев в газовом потоке. Малая стоимость испытаний с ВЧ нагревом позволяет производить всесторонние исследования конструкций с целью определения их термоциклической долговечности с учетом различных факторов: толщины материала пластин, способов сборки и сварки и т.п.

Для испытаний использована установка ВЧГ-10/0,44, которая включает в себя ВЧ генератор с индукционной системой, нагружающее устройство с захватами, системы управления, системы измерений и вспомогательное устройство. Имеющееся оборудование после изготовления необходимой оснастки удалось использовать для моделирования теплового состояния и исследования термоциклической долговечности теплообменника. Для измерения температуры секция теплообменника была препарирована хромель-алюмелевыми термопарами. Для крепления секции относительно индуктора использовались доработанные захваты. В процессе работы проведены следующие исследования: разработана методика термоциклических испытаний секции теплообменника, проведен анализ условий работы теплообменника и выявлены наиболее термонапряженные участки, выбраны оптимальные размеры конструкции индуктора, определены способы и границы эффективного управления температурным градиентом в перемычках теплообменника, проведенные исследования показали возможность использования ВЧ нагрева при испытании секции теплообменника на термоциклическую долговечность.

В процессе испытаний охлаждение секции теплообменника при термоциклировании происходило с помощью охлаждающего воздуха, подаваемого после режима выдержки на максимальной температуре и выключении нагрева. При термоциклировании было установлено, что максимальный перепад по нагреваемому сечению достигает 150 °С в конце максимального температурного режима. На основе проведенных испытаний определены результаты по термоциклической долговечности секций теплообменников с точечной сваркой.

Список литературы

1. **Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р.** Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. М.: Инфра-М, 2019. 282 с.
2. **Лепешкин А.Р., Ильинская О.И., Кувалдин А.Б., Лепешкин С.А.** Исследование нагрева вращающихся дисков турбин в электромагнитном поле, созданном с использованием специальных индукторов и сильных постоянных магнитов // Известия РАН. Энергетика. 2020. № 2. С. 112-122

Листратов Я.И.¹, Сардов П.А.^{1,2}, Беляев И.А.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
sardov.pa@yandex.ru

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ФОРМ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПРИ ВСТРЕЧНОЙ КОНВЕКЦИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Одной из важнейших проблем создания и развития энергетических реакторов новых типов всегда оставались вопросы теплофизики: выбор и освоение теплоносителей, изучение специфики их гидродинамики и теплообмена. В случае применения жидких металлов в условиях работы термоядерного реактора на течение жидкого металла будет оказано совместное влияние термогравитационной конвекции и магнитного поля. Известно, что магнитное поле оказывает существенное влияние на структуру потока [1] и это влияние может иметь сложный характер. Предполагаемые МГД-конфигурации, близкие к условиям термоядерных и гибридных реакторов [2], экспериментально изучались объединённой научной группой НИУ «МЭИ» - ОИВТ РАН [3], с использованием ртути в качестве модельного теплоносителя.

В рамках данной работы, было проведено комплексное исследование с использованием метода прямого численного моделирования (DNS – Direct Numerical Simulation), а результаты сопоставлялись с данными полученным экспериментально. DNS код, подробно описанный в [4], обеспечивает решение системы уравнений магнитной гидродинамики с помощью вычислительной схемы, основанной на методе конечных разностей. Магнитное поле и обогрев моделировались максимально приближенно к конфигурации эксперимента. Число Прандтля принималось равным 0.025, число Рейнольдса – 11000, числа Грасгофа фиксировались в диапазоне – $4 \cdot 10^7$ – $8.2 \cdot 10^7$, а числа Гартмана – 50-800.

Обнаруженные экспериментально, нестационарные эффекты теплообмена, характеризующиеся низкочастотными

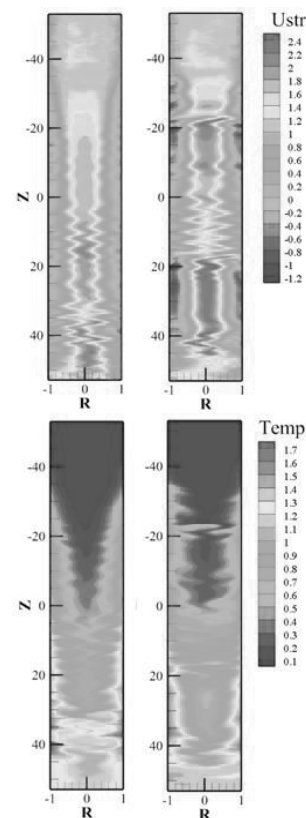


Рис.1. Продольные мгновенные поля скорости и температуры.

Re=11000, Ha=400,
слева – Gr=4E7,
справа – Gr=8E7.

высокоамплитудными пульсациями как скорости, так и температуры, были воспроизведены и подтверждены численно. Однако, технические ограничения при постановке эксперимента не позволили оценить влияние свободной конвекции, которое проявляется в образовании возвратных течений вблизи стенок. Из Рис. 1 видно, что в потоке образуется пара квазидвумерных струй противоположных направлений: по ходу потока в центре трубы и против потока возле обогреваемых стенок. Подавление возмущений сильным магнитным полем, в зависимости от значений чисел Gr , Na и Re , либо стабилизирует нагретые вблизи стенок струи, либо задерживает разрушение пограничного слоя до обретения им высоких скоростей, что приводит к возмущениям высокой амплитуды. Понимание сложной природы МГД-течений необходимо для проектирования надежных и эффективных жидкометаллических систем необходимых для реализации перспективных проектов энергетических реакторов.

Работа выполнена при поддержке Мега Гранта МИНОБР №14.Z50.31.0042.

Список литературы

1. Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. / Генин Л.Г., Свиридов В.Г. М.: Изд-во "МЭИ", 2001. 199 с.
2. **Abdou M. et al.** Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO // FED. 2015. Т. 100. Р. 2-43.
3. **Батенин В. М. и др.** Развитие экспериментальной базы исследований МГД-теплообмена перспективных ядерных энергоустановок // ТВТ, 2015, Т. 53, с. 904-907.
4. **Zikanov O., Listratov Y., Sviridov V.** Natural convection in horizontal pipe flow with a strong transverse magnetic field // J. Fluid Mech. 2013. Т. 720, Р. 486-516.

Луцик В.Г., Макарова М.С., Решмин А. И.

Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
Москва 119192, Мичуринский проспект, 1
mariia.makarova@gmail.com

ПЛАСТИНЧАТЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК С ДИФФУЗОРНЫМИ КАНАЛАМИ

Повышение эффективности теплообменных аппаратов за счет интенсификации процессов теплообмена является актуальной задачей энергосбережения. К настоящему времени предложено большое количество разнообразных способов интенсификации теплообмена, обзору и анализу которых посвящена обширная литература (см., например, [1]). При этом практически все известные способы

интенсификации теплообмена связаны с увеличением мощности на прокачку теплоносителя, что является недостатком этих способов. В пластинчатых теплообменниках, которые согласно [2] нашли широкое применение, используются пластины с различного типа гофрированной поверхностью, которые приводят к интенсификации теплообмена и увеличению поверхности теплообмена [2]. При этом коэффициенты трения в пластинчатых теплообменниках с гофрированными пластинами намного выше, чем в гладких каналах, при одинаковом числе Рейнольдса.

Целью настоящей работы является рассмотрение возможности интенсификации теплообмена в пластинчатых теплообменниках с гладкими диффузорными каналами. Основанием для использования диффузорных каналов в пластинчатом теплообменнике послужило проведенное в [3] численное исследование течения и теплообмена в безотрывном диффузоре, которое показало, что основные характеристики теплообмена – число Нуссельта и фактор аналогии Рейнольдса – в диффузоре оказываются значительно выше, чем в канале постоянного сечения при том же числе Рейнольдса.

Численное моделирование теплообмена в пластинчатом теплообменнике с диффузорными каналами с малыми углами раскрытия проведено, как и в [3], с использованием трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности, дополненной уравнением переноса для турбулентного потока тепла [4]. Проведенное исследование показало, что число Стантона на всей длине, а коэффициент теплоотдачи на большей части длины в теплообменнике с диффузорными каналами превосходят соответствующие величины для теплообменника с каналами постоянного сечения. Полученные в расчетах величины интенсивности турбулентности и напряжения сдвига существенно возрастают в диффузоре, что приводит к интенсификации теплообмена в теплообменнике с диффузорными каналами. Показано также, что в теплообменнике с диффузорными каналами за счет интенсификации теплообмена количество переданного тепла от «горячего» теплоносителя к «холодному» возрастает по сравнению с теплообменником с каналами постоянного сечения. Следствием этого является большая разность температур в «холодном» и «горячем» потоках в теплообменнике с диффузорными каналами по сравнению с теплообменником с каналами постоянного сечения. Потери статического давления в диффузорных каналах при малых углах раскрытия меньше потерь статического давления в каналах постоянного сечения при одинаковых числах Рейнольдса.

Таким образом, предлагаемое в работе использование в пластинчатых теплообменниках безотрывных диффузорных каналов с гладкой поверхностью, обеспечивающей минимальные гидравлические потери, позволит обеспечить интенсификацию теплообмена в диффузоре

практически без роста коэффициента трения, что характеризует принципиальное отличие рассмотренного способа интенсификации теплообмена от других известных способов, где увеличение теплоотдачи достигается ценой значительного роста гидравлических потерь.

Список литературы

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З., Мякочин А.С. Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
2. Справочник по теплообменникам в 2-х томах. Перевод с англ. М.: Энергоатомиздат. 1987.
3. Лущик В.Г., Решмин А.И. Интенсификация теплообмена в плоском безотрывном диффузоре // ТВТ. 2018. Т.56. № 4. С. 589–596.
4. Лущик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Уравнение переноса для турбулентного потока тепла. Расчет теплообмена в трубе // Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. № 6. С. 42.

Лэ Т.Т.¹, Мелихов В.И.¹, Мелихов О.И.¹, Якуш С.Е.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
119526, Москва, пр-т. Вернадского, 101, корп. 1
gogirik92@gmail.com

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОСТИ ПОСЛЕ КОЛЛАПСА ПУЗЫРЬКА СУЩЕСТВЕННОГО ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

В экспериментах по исследованию термического взаимодействия высокотемпературного расплава с водой [1] в условиях стратификации материалов (слой расплава под слоем воды) были зарегистрированы сильные паровые взрывы с коэффициентами конверсии до 3%. В качестве основной причины образования области, в которой перед взрывом расплав и воды находятся в перемешанном состоянии, что необходимо для реализации парового взрыва, в работе [1] была выдвинута гипотеза, что паровые пузырьки, образующиеся на границе раздела, быстро схлопываются в недогретой воде, и генерируемая при этом кумулятивная струйка воды воздействует на расплав, вызывая встречные всплески расплава, приводящие к динамически существующей области перемешивания, в которой могут реализоваться паровые взрывы.

Для проверки этой идеи в настоящей работе было выполнено численное исследование динамических процессов, сопровождающих конденсацию пузырька. Для описания процессов использовались модель

теплопроводного сжимаемого пара и модель теплопроводной несжимаемой жидкости. Существенной особенностью исследуемого процесса был высокий (несколько сотен градусов) начальный перегрев пара, обусловленный нагревом пара высокотемпературным расплавом; недогрев воды составлял 25 градусов. В расчетах были зафиксированы интенсивные волновые процессы в паровом пузырьке, длительность которых составляла около трети всего времени конденсации пузырька, которые оказывали заметное влияние на процесс конденсации. Отличительной особенностью изучаемого явления было быстрое падение давления в пузырьке до уровня давления насыщения, соответствующего температуре окружающей пузырек жидкости. Это связано с быстрым теплоотводом из пара на межфазную поверхность вследствие большого температурного напора. В результате выполненных расчетов была определена кинетическая энергия жидкости в момент, предшествующий коллапсу пузырька. Величина этой энергии была использована для оценки динамических характеристик жидкости после коллапса пузырька. Для этого использовалось решение задачи о точечном взрыве в несжимаемой жидкости [2].

В соответствии с решением задачи о точечном взрыве в несжимаемой жидкости после выделения в жидкости энергии (в результате коллапса пузырька) на месте взрыва начинает образовываться пустотная (вакуумная) расширяющаяся каверна. По скорости расширения каверны определяется скорость окружающей жидкости. Расчеты показали, что для условий экспериментов [1] после коллапса пузырька в этом месте происходит очень быстрое (длительностью менее 1 мс) расширение образующейся каверны, во время которого жидкость приобретает скорость порядка нескольких метров в секунду. Такое возникающее ударное течение жидкости при наличии расположенной недалеко ограждающей стенки (днище сосуда) способно вызвать встречный выброс находящегося там расплава на высоту до 5 см, что наблюдалось в [1].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-19-00289).

Список литературы

1. **Kudinov, P., Grishchenko, D., Konovalenko, A., Karbojian, A., 2017.** Premixing and steam explosion phenomena in the tests with stratified melt-coolant configuration and binary oxidic melt simulant materials. Nucl. Eng. Design. 314, 182 – 197.
2. **Sedov, L.I., 1993.** Similiarity and Dimensional Methods in Mechanics. CRC Press, 10th Edition, 498 P. ISBN-10: 0849393086.

Любов В.К.¹, Владимиров А.М.², Королева П.В.¹

¹ Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова,

163002, Россия, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17

² АО Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат,
164900, Архангельская обл., г. Новодвинск, Мельникова, 1
vk.lubov@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЖИГАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Основная часть сточных вод населенных пунктов и промышленных предприятий очищается биологическими методами, с использованием активного ила. Главный недостаток классической схемы биологической очистки стоков – образование большого количества отработанного ила, в результате трансформации части исходных загрязнений в активную биомассу. Утилизация осадков сточных вод (ОСВ) является важной технической и экологоэкономической задачей. В настоящее время в России основной способ обработки ОСВ заключается в их механическом обезвоживании и складировании на иловых картах и илонакопителях, где в течение длительного времени протекает обеззараживание и биодеградация отходов. Такой метод не отвечает современным экологическим и техническим требованиям.

Во многих странах мира процесс сжигания рассматривается в качестве одного из основных альтернативных способов уничтожения отходов, характеризующихся высокими содержаниями органических веществ. В целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) в качестве биотоплива используются отходы, образующиеся при подготовке древесного сырья и при химической переработке древесины – кора, опилки, отработанные щелока, ОСВ. Хорошо налажена технология сжигания жидких отходов в виде отработанных щелоков. Достаточно успешно используются в энергетических целях древесная кора и опилки. Наибольшие проблемы возникают при энергетической утилизации ОСВ. Для повышения энергетической ценности ОСВ на АЦБК используются декантерные центрифуги, которые позволяют получить относительную влажность ОСВ в пределах 70-79 %. Однако такая влажность позволяет сжигать ОСВ только в смеси с топливными материалами, имеющими меньшую влажность. Для полной утилизации отходов, образующихся в цикле ЦБП, в 2014 году в АО АЦБК был введен в эксплуатацию паровой котел высокого давления НУВЕХ фирмы Metso, работающий на смеси кородревесных отходов (КДО) и ОСВ.

Котлоагрегат НУВЕХ с «пузырьковым кипящим слоем», оснащен топкой с газонепроницаемой конструкцией мембранных стен. Вторая и

третья ступени пароперегревателя расположены в верхней части топки, являющейся первым вертикальным газоходом. Секции первой ступени пароперегревателя горизонтального типа расположены во втором вертикальном газоходе. Экономайзер гладкотрубного типа и воздухоподогреватели расположены в третьем вертикальном газоходе. Котел оснащен одной пусковой мазутной горелкой и двумя рабочими мазутными горелками. Смесь КДО и ОСВ подается в «кипящий слой» одним потоком со стороны фронтальной стены котла. Для очистки дымовых газов от твердых частиц котел оборудован электростатическим фильтром, состоящим из одной камеры и двух полей.

Исследование эффективности работы котлоагрегата при нагрузке 56,2-56,8 МВт было выполнено при сжигании смеси КДО и ОСВ, при этом массовая доля последних составляла 0,36. Теплотехнические характеристики топливной смеси на рабочую массу имели следующие значения: относительная влажность 63,25 %; зольность 2,36 %; а низшая теплота сгорания 5,45 МДж/кг. Подсветка мазутом не производилась. Температура «кипящего слоя» составляла 818-821 °С, а доля воздуха, идущая на его «ожигание» 47,7-48,5 %. Выполненные исследования показали, что котлоагрегат обеспечивает эффективное сжигание топливной смеси с крайне неблагоприятными теплотехническими характеристиками, при этом КПД брутто составил 85,22-85,24 %. Эмиссии загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух, имели следующие значения: $\text{NO}_x=103-108$; $\text{CO} = 8-9$; $\text{SO}_2=58-63$; твердые частицы = 1,07-1,13; $\text{HCl} = 3,77-3,95$ мг/МДж. Полученные экологические показатели полностью, и даже с большим запасом, соответствуют требованиям, установленным директивой 2010/75/ЕС и ГОСТ Р 50831-95. Ввод в эксплуатацию котлоагрегата НУВEX фирмы Metso на ТЭС-1 АО АЦБК позволил не только обеспечить полную утилизацию ОСВ, образующихся на очистных сооружениях, но и выработку пара высокого давления (10 МПа, $t_{\text{п.п}}= 540$ °С), идущего на комбинированную выработку тепловой и электрической энергии.

Мадера А.Г. ¹

¹ ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН,

Москва, 117218, Нахимовский проспект, 36, корп. 1

agmprof@mail.ru

КЛАСТЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОПРЯЖЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТЕЛ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

При проектировании технических систем (электронных, химико-технологических) необходимо располагать инструментами математического и компьютерного моделирования тепловых процессов в конструкциях, представляющих собой систему тепловыделяющих (активных) элементов, размещенных в оболочке, и находящихся в тепловом взаимодействии между собой и протекающей через них жидкостью. Развивающиеся в жидкости и активных элементах тепловые процессы взаимодействуют между собой, поэтому описывающая их математическая модель должна формироваться как сопряженная.

В силу большого количества и разнообразия активных элементов в рассматриваемых конструкциях и существенной неравномерности плотности распределения мощностей активных элементов, в качестве тепловой модели принята модель в виде системы кластеров (рис. 1), в каждом из которых температуры жидкости $T_{ak}(t)$ и температуры активных элементов $T_{ik}(t)$, принадлежащих k -му кластеру ($k = 1, 2, \dots, K$), распределены равномерно и равны их осредненным значениям. Сформированная математическая модель сопряженных тепловых процессов использует следующие допущения справедливые в

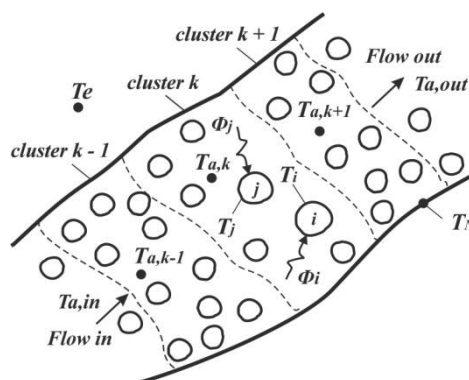


Рис. 1. Кластерная тепловая модель системы активных элементов в

жидкость несжимаема, зависимость теплофизических параметров жидкости и активных элементов от температуры в рабочем диапазоне функционирования можно пренебречь, течение жидкости в кластере одномерно, теплопроводность в жидкости пренебрежимо мала в сравнении с конвективными процессами, мощность внутренних источников тепла обусловленных вязкостью жидкости много меньше мощностей тепловыделения активных элементов. При принятых условиях математическая модель, имеет вид:

– для температуры $T_i(t)$ i – го активного элемента, $i = 1, 2, \dots, N - 1$, и оболочки (N)

$$C_i \frac{dT_i(t)}{dt} + \sum_{j=1, i \neq j}^N J_{ij}^{cond} (T_i(t), T_j(t)) + J_{i,ak}^{conv} (T_i(t), T_{ak}(t)) + \delta_{iN} \cdot J_{N,e}^{conv} (T_N(t), T_e(t)) = \Phi_i(t),$$

– для температуры жидкости $T_{ak}(t)$ в k -ом жидкостном кластере, $k = 1, 2, \dots, K$,

$$C_{ak} \frac{\partial T_{ak}(t)}{\partial t} - \sum_{j \in \{k\}} J_{j,ak}^{conv} (T_j(t), T_{ak}(t)) + c_{ak} G_a (T_{ak,out} - T_{ak,in}) = 0,$$

где $C_i = \rho_i c_i V_i$, $C_{ak} = \rho_a c_a V_{ak}$ – полная теплоемкость i -го изотермического тела и воздушной среды, ρ , c , V – плотность, удельная теплоемкость, объем; J_{ij}^{cond} – кондуктивный поток тепла между изотермическими телами i и j с температурами $T_i(t)$ и $T_j(t)$; $J_{i,ak}^{conv}$ – конвективный поток тепла от тела i в среду внутри оболочки, принадлежащих k -му кластеру; $\Phi_i(t)$ – мощность внутренних источников тепла в активном элементе i ; $\delta_{iN} = 1$, при $i = N$, $\delta_{iN} = 0$, при $i \neq N$; c_{ak} – удельная теплоемкость жидкости в k -м кластере; G_a – массовый расход жидкости с температурами на входе $T_{ak,in}$ и выходе $T_{ak,out}$ кластера.

Уравнения математической модели позволяют получить аналитические решения осредненных температур активных элементов и жидкости в каждом кластере тепловой модели, которые легко могут быть встроены в сложные программные комплексы для моделирования тепловых процессов в технических системах. Получены также уравнения для распределения температуры по течению жидкости, показано, что пренебрежение распределением температуры и замена его простым усреднением неадекватно практике функционирования и влечет за собой значительные погрешности при численном моделировании.

Майоров В.О.^{1,2}, Ястребов А.К.², Левашов В.Ю.^{1,2}

¹ НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова,
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
vyacheslav7794@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ГОМОГЕННОЙ НУКЛЕАЦИИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ КАПЕЛЬ ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

В работе рассматривается процесс разрушения одиночной капли перегретой жидкости, находящейся в неограниченной области, заполненной паром того же вещества. В объеме такой капли вследствие случайных флуктуаций возникают микроскопические паровые пузыри. Интенсивное образование зародышей паровой фазы и их последующий рост может приводить к фрагментации жидкости, что в свою очередь, существенно влияет на характер движения двухфазной среды. На практике такие процессы реализуются при истечении жидкости в область низкого давления, например, при разгерметизации сосуда высокого давления или при впрыске топлива в камеру сгорания.

В начальный момент времени капля имеет следующие параметры: радиус R_0 , давление в жидкости p_l и перегрев $\theta = T_l - T_s(p_l)$, где T_l – температура жидкости. Температура паровой области соответствует температуре по линии насыщения при давлении p_l . В такой постановке протекают следующие процессы: испарение с поверхности капли, образование паровых пузырей в объеме перегретой жидкости и их последующий рост вследствие тепло- и массопереноса на границе раздела фаз. Исследование базируется на численном решении кинетического уравнения для функции распределения паровых пузырей по размерам внутри капли. Образование зародышей паровой фазы описывается согласно классической теории нуклеации [1]. Для описания динамики роста паровых пузырей и тепло-и массопереноса на внешней границе капли используются подходы, описанные в [2]. Также математическое описание включает в себя уравнение энергии для капли, уравнение баланса компонентов двухфазной среды и уравнение состояния идеального газа.

На первом этапе были выполнены оценки объемной доли пара, при которой можно считать, что капля разрушается. В случае, когда радиус капли много больше среднего радиуса паровых пузырей критическое значение объемной доли составляет примерно 50%. Зависимости времени разрушения капли от начального перегрева θ при различных давлениях в жидкости представлены на рис.1. При

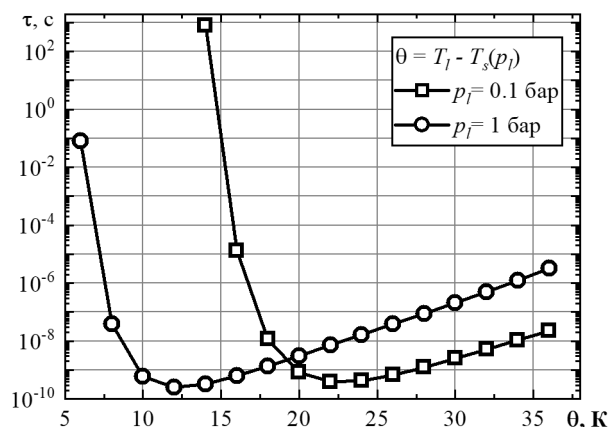


Рис. 1. Зависимости времени разрушения капли от перегрева жидкости для различных давлений

расчетах на данном этапе предполагалось, что паровая фаза возникает только в результате нуклеации, другие механизмы парообразования не учитывались. Из рисунка 1 прежде всего видно, что зависимости времени существования капли от степени перегрева немонотонные. Это объясняется тем, что с ростом перегрева скорость нуклеации возрастает, но в тоже время критический радиус пузырька уменьшается, поэтому скорость роста объемной доли пара является изменяется немонотонно. Также стоит отметить, что минимальное значение перегрева жидкости, при котором нуклеация становится заметной, увеличивается по мере снижения давления в жидкости.

Список литературы

1. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. Спр. / Под ред. Скрипова В. П. и др. М.: Атомиздат, 1980. 208 с.
2. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем: Учебное пособие для вузов – М.: Издательство МЭИ, 2000. 374 с.

Мальшев К.Ю.¹, Михайлов Е.А.¹ Тепляков И.О.²

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, д.1

² Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская, 13 стр.2
kmalyshev08102@mail.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ И ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В ПОЛУСФЕРИЧЕСКОМ СОСУДЕ В СТОКСОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Электровихревые течения (ЭВТ), возникают в проводящей среде (например, жидком металле) при пропускании через неё электрического тока переменной плотности. Жидкость приходит в движение в результате воздействия силы Ампера, возникающей в результате взаимодействия этого тока с собственным магнитным полем. ЭВТ интенсивно изучаются на протяжении ряда десятилетий многими научными коллективами в России и за рубежом [1, 2, 3], по причинам как чисто научного, так и прикладного характера, в частности, ЭВТ играют определяющую роль в электрометаллургических процессах.

В последнее время большинство гидродинамических исследований проводится численно с использованием различных вычислительных пакетов. Тем не менее, численные решения далеко не всегда дают принципиальное понимание характера процесса и его зависимости от различных управляющих параметров. В связи с этим, особый интерес представляют именно аналитические решения.

В настоящей работе рассматривается сосуд полусферической формы, с расположенным в его центре полусферическим электродом конечного размера. Внешняя граница сосуда играет роль второго электрода. Между электродами расположен жидкий металл, через который пропускается электрический ток, изотропно растекающийся от центра системы [3, 4]. Полная математическая постановка задачи в рамках стокова и электродинамического приближений приведена в [4]. Задача решается в переменных «векторный потенциал - завихренность». Для завихренности в работе [4] использованы однородные граничные условия Дирихле, что является спорным с физической точки зрения, но дает возможность получить аналитическое решение. В работе [5] дано простое представление для решения задачи с граничными условиями Дирихле, и указано, что можно получить аналогичное представление для случая постановки разностных условий Тома на сферических частях границы (являющихся, по сути, условиями твёрдой стенки). В настоящей работе мы, используя выводы работы [5], получаем и исследуем выражения для

компонент векторного поля скорости и компонент поля градиента давления, которые могут сравниваться как с вычислительным, так и с физическим экспериментом. Например, старшая мода поля скорости в безразмерных переменных имеет вид:

$$V_r(r, \theta) = (R_3 r^3 + R_1 r + R_{-1} r^{-1} + R_{-2} r^{-2} + R_{-4} r^{-4})(3 \cos^2 \theta - 1);$$

$$V_\theta(r, \theta) = (T_3 r^3 + T_1 r + T_{-1} r^{-1} + T_{-2} r^{-2} + T_{-4} r^{-4}) \sin 2\theta,$$

где r, θ - сферические координаты, T_i, R_i - коэффициенты, зависящие от отношения размеров внешнего и внутреннего электродов и типа граничных условий.

Список литературы

1. Жидкий металл под действием электромагнитных сил / Ю.М. Гельфгат, О.А. Лиелаусис, Э.В. Щербинин. Рига: Зинатне, 1976. 246 с.
2. **Хрипченко С.Ю.** Электровихревые течения в тонких слоях проводящей жидкости // Магнитная гидродинамика. 1991. №1. С.126 - 129.
3. **Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Гусева А.А., Токарев Ю.Н.** Численное и экспериментальное исследование структуры закрученного электровихревого течения // ТПТ. 2012. №8. С.345 - 352.
4. **Михайлов Е.А., Тепляков И.О.** Аналитическое решение задачи об электровихревом течении в полусфере с электродами конечного размера в стоковом приближении // Вестник Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2018. №2. С.39 – 44.
5. **Малышев К.Ю., Михайлов Е.А., Тепляков И.О.** Представление решения задачи об электровихревом течении в полусферическом контейнере в виде быстросходящегося ряда // Волны и вихри в сложных средах: 10-ая международная конференция - школа молодых ученых; 03-05 декабря 2019 г., Москва: Сборник материалов конференции

Мамаев А.В., Рязанов Р.Р., Соборнов А.Е., Котин А.В.

Нижегородский государственный технический университет имени
Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, 603950, Минина, 24
aleks_may@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЭЛЕМЕНТАХ ОБОРУДОВАНИЯ ЯРУ

В процессе эксплуатации ядерных реакторных установок (ЯРУ) конструкционные материалы элементов оборудования и трубопроводов подвержены термосиловому нагружению. Особенно опасны термоциклические нагрузки на патрубки питательной воды парогенераторов (ПГ). Температурные пульсации, характерные для процесса смешения потоков теплоносителя с различной температурой при подпитке ПГ, имеют существенный размах (до 135 °С). При этом возникают области высоких переменных напряжений в металле тройникового узла подпитки, что приводит к накоплению усталостных повреждений с последующим развитием дефектов и, в конечном итоге, раннему исчерпанию ресурса.

Анализ существующих методик оценки ресурсных характеристик оборудования ЯРУ позволил определить ряд проблем, связанных с низкой эффективностью и несовершенством традиционных подходов. Труднорешаемой является задача определения характеристик реального нагружения теплонапряженных участков на стадии проектирования. Испытания натуральных конструкций в штатных условиях не пригодны ввиду чрезвычайной сложности, высокой стоимости и продолжительности. В связи с чем, актуальным является подход к оценке ресурса оборудования ЯРУ, включающий использование программ моделирования теплогидравлических процессов (computational fluid dynamics, CFD) и напряженно-деформированного состояния, а также математических моделей процесса накопления усталостных повреждений в материале конструкции. Однако для адаптации и верификации методов предложенного подхода необходима представительная экспериментальная база.

В рамках данного подхода настоящая работа посвящена связанным экспериментальному и численному исследованиям нестационарного смешения турбулентных неизотермических потоков теплоносителя с градиентом температуры, характерным для процессов, возникающих в современных ЯРУ. Процесс смешения потоков теплоносителя реализован в экспериментальном участке, представляющем собой тройниковое соединение, состоящее из основной 60x5x286мм и периферийной 9x1,5мм труб и разъемных соединений. В направляющем фланце выполнен

диффузор для создания вихревой структуры в зоне смешения. Температурное поле в зоне смешения получено при помощи датчиков, установленных на внутренней поверхности основной трубы [1].

Численное исследование было выполнено с использованием вихреразрешающих моделей турбулентности WALE (Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity) и WMLES (Wall Modeled LES), позволяющих получать качественные решения для отрывных и присоединенных потоков, с использованием решателя ANSYS Fluent. Основная концепция этого подхода заключается в отдельном рассмотрении больших вихрей, которые зависят от геометрии и малых вихрей, которые считаются изотропными. На предварительном этапе выполнена адаптация сеточной модели с учетом последовательного упрощения геометрии тройникового узла. В результате построена расчетная модель с адекватным разрешением сетки и удовлетворяющая требованиям моделей турбулентности.

Произведено количественное и качественное сравнение экспериментальных и расчетных данных по статистическим характеристикам температурного поля. Подтверждена возможность применения вихреразрешающих моделей для расчета нестационарного смешения турбулентных неизотермических потоков теплоносителя.

Список литературы

1. Измерение температурного и напряженно-деформированного состояний трубного образца при воздействии локальных стохастических температурных пульсаций / Дмитриев С.М [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10. № 1. – С. 53-60.

Мансуров Р.Ш.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),

Новосибирск, 630008, Ленинградская, 113

rmansurov@inbox.ru

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМЫ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЬ-ВЕНТИЛЯТОР-ПОМЕЩЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА

Приводятся результаты обработки и анализа полученных экспериментальных данных. В качестве основного подхода рассматривается аппроксимация экспериментальных значений функцией, построенной методом наименьших квадратов. С помощью численных исследований определяется наиболее адекватный вид функциональной зависимости. Исследованы методы оптимизации для решения задачи построения экспериментальных кривых.

Наилучший результат был получен при подборе параметров логистической кривой Гомперца. Остальные проанализированные кривые давали монотонно возрастающее квадратичное отклонение. По результатам экспериментальных исследований установлено время запаздывания на входное воздействие, что характерно для инерционных динамических звеньев. Учитывая это обстоятельство, было сделано уточнение вида экспериментальной зависимости, которая имеет экспоненциальный вид с перегибом в начальный момент. За счёт введения специального вида слагаемых с дополнительными параметрами исходная кривая была приведена в соответствие с переходной характеристикой инерционного звена. После уточнения окончательный вид кривой приобрёл следующее выражение:

$$\bar{Q}^*(\bar{t}) = 1 - e^{-a\bar{t}^2} e^{-b\bar{t}} + c \left(1 - e^{-\bar{t}^3} e^{-g(\bar{t}-h)} \right) \quad (1)$$

Полученный вид аппроксимирующей кривой (1) идентифицируется пятью параметрами, для нахождения которых необходимо поставить задачу определения их методом наименьших квадратов. Для решения этой задачи был исследован метод нулевого порядка – Нелдера-Мида, называемый также методом деформируемого многогранника. Типичное поведение экспериментальных данных и восстановленной кривой (1) продемонстрировано на рис. 1 и 2 для элементов в активном и реактивном состояниях соответственно.

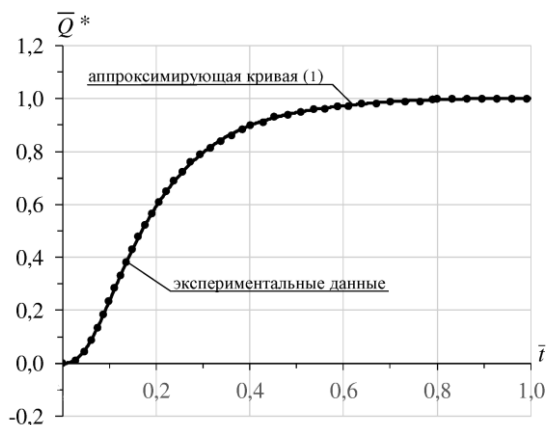


Рис. 1. Поведение экспериментальных данных для элемента системы в активном состоянии и аппроксимирующей кривой (1).

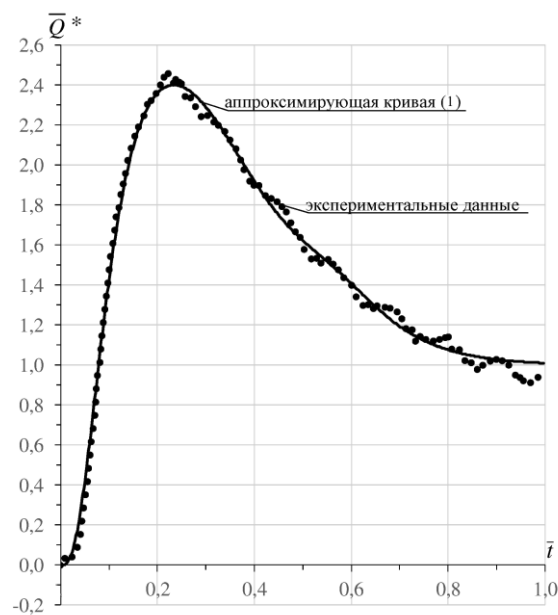


Рис. 2. Поведение экспериментальных данных для элемента системы в реактивном состоянии и аппроксимирующей кривой (1).

Полученный результат позволяет утверждать, что определённая таким образом кривая является адекватной обобщающей функцией для экспериментальных зависимостей при скачкообразном нагреве или охлаждении потока вентиляционного воздуха в элементах климатических систем.

Мильман О.О., Картуесова А.Ю., Крылов В.С., Птахин А.В.
ЗАО НПВП «Турбокон»,
Калуга, 248010, Комсомольская роща 43
anna-kartuesova@yandex.ru

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Конденсационные вакуумные установки, в частности воздушные конденсаторы с большим числом секций, являются одной из основных вспомогательных устройств на любом энергогенерирующем объекте. Правильное функционирование конденсатора имеет первостепенное значение для эффективности электростанции.

Проектирование конденсаторов осуществляется на расчетные режимы работы. Под расчетным режимом подразумевается следующее: все части конденсатора охлаждаются одинаково; расходы охлаждающей воды (воздуха) и присосы воздуха также одинаковы. Однако, в некоторых случаях имеет место отклонение от расчетного режима работы конденсатора из-за ухудшения охлаждения одной из его частей: загрязнения теплообменной поверхности, присосов воздуха и др. Особенности работы конденсаторов на таких режимах необходимо исследовать для повышения энергоэффективности [1-2].

Особый интерес вызывают проблемы, когда часть конденсатора имеет ухудшенное охлаждение, одна из которых – избыток несконденсированного пара на выходе, который поступает в эжектор. Избыток паровоздушной смеси ΔV приводит к увеличению давления на всасе эжектора P_3 и, как следствие, к смещению характеристики

конденсатора в зону более высоких давлений с увеличением P_k на величину ΔP_k (см. рис.1).

Эта проблема особенно актуальна для воздушных конденсаторов с большим числом вентиляторов.

Был создан стенд для экспериментальных исследований процессов теплообмена в условиях неравномерного охлаждения конденсатора и проведены экспериментальные

исследования на модели конденсатора из двух параллельно работающих каналов. В процессе испытаний установлено, что размещение дросселей небольшого сопротивления на линии эжектирования паровоздушной смеси повышает эффективность работы конденсатора [3].

Разработана методика расчета дросселей с оптимальным диаметром отверстия для системы с большим числом секций.

Список литературы

1. Шкловер Г.Г., Мильман О.О. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 185. – 240с.
2. Федоров В.А. Конденсаторы паротурбинных установок/ В.А. Федоров, О.О. Мильман. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 560с.
3. Milman O.O., Kartuesova A.Yu., Yan'kov G.G., Ptakhin A.V., Krylova V.S., Korlyakova M.O. Investigation of Parallel Operation of Vacuum Condenser Sections with Nonuniform Cooling. Thermal Engineering. 2019. V. 66. N. 2. pp. 77-83.

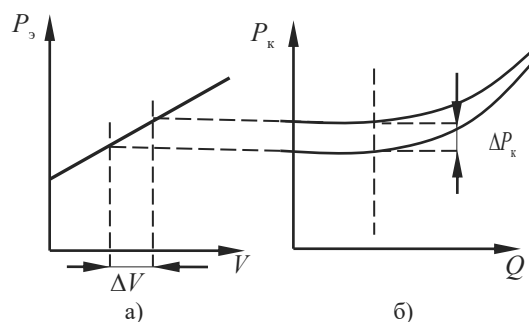


Рис. 1. Взаимодействие воздухоудаляющего устройства с конденсатором при уменьшении расхода охлаждающей воды на одной из его частей:

- а) – характеристика эжектора;
- б) – характеристика конденсатора

Мильман О.О.^{1,2}, Крылов В.С.^{1,2}, Птахин А.В.¹ Кондратьев А.В.¹

¹ЗАО «НПВП «Турбоконт», Калуга, 248010, Комсомольская роща, 43

² Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,
Калуга, 248023, Степана Разина, 26

Krylovv92@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ НАТЕКАЮЩЕГО КОНДЕНСАТА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА НА ПУЧКЕ ГЛАДКИХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ

Процесс конденсации пара на горизонтальных пучках труб широко распространен на практике и является неотъемлемой частью теплогидродинамических процессов протекающих на действующих установках ТЭС и АЭС.

В случае конденсации на пучке горизонтальных труб расход стекающего конденсата увеличивается сверху вниз вследствие натекания конденсата с вышележащих труб на нижележащие, а расход пара по пути его движения снижается. В пучке с постоянным или относительно немного уменьшающимся по высоте живым сечением между трубами скорость нисходящего потока пара постепенно снижается, а конденсат натекает с верхних труб на нижние. Вначале это приводит к уменьшению среднего коэффициента теплоотдачи (осредненных по периметру труб) при увеличении отсчитываемого сверху номера горизонтального ряда труб. Однако, начиная с некоторого ряда, в результате натекания конденсата течение пленки возмущается и ее термическое сопротивление снижается. Благодаря этому коэффициент теплоотдачи могут стабилизироваться, а при возрастающем воздействии возмущения течения пленки на нижних трубках — увеличиваться с возрастанием номера ряда. [1].

В данной работе выполнен ряд экспериментов с различными скоростями пара и значениями параметра ρw^2 на входе в рабочий участок представленного на рис.1 и различными расходами подаваемого конденсата на вход в теплообменный пучок. Измерительные трубки длиной 0,6 м, изготовленные из меди, соединены последовательно и имеют подвод и отвод охлаждающей воды. Поверхность теплообмена каждой трубки длиной 0,5 м составляет 0,041 м². Термометры сопротивления расположены в теле стенки труб и предназначены для регистрации температур поверхности

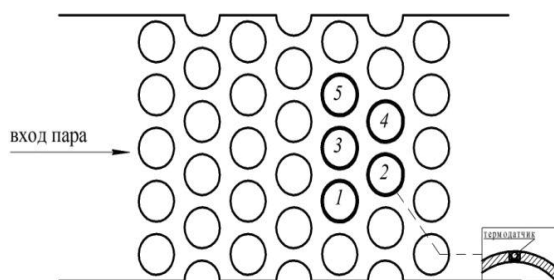


Рис. 1. Расположения трубного и измерительных трубок

теплообменных труб для определения локальных коэффициентов теплоотдачи.

Получены данные влияния натекания конденсата на теплообменную поверхность в виде зависимости $f(Gk)=\alpha/\alpha_{Nu}$. Данная зависимость представлена на рис.2. Получен ряд режимов работы конденсатора при которых происходит полное затопление нижнего ряда теплообменных трубок.

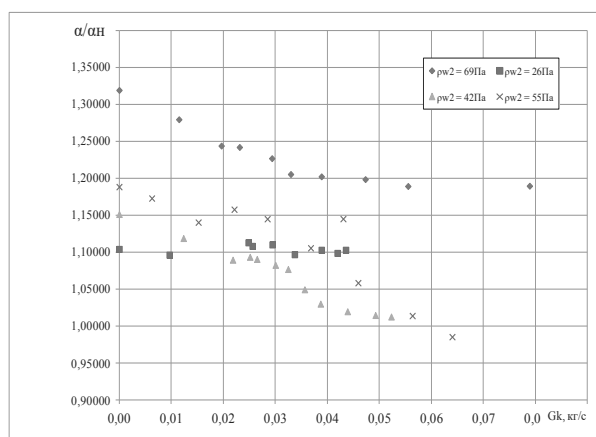


Рис. 2. Влияние натекания конденсата на горизонтальный пучок теплообменной поверхности

Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Теплопередача при конденсации и кипении 2 изд., М – Л., 1952

Мирнов С.В.^{1,2}, Комов А.Т.¹, Варава А.Н.¹, Дедов А.В.¹, Захаренков А.В.¹, Сморгачева Ю.В.¹, Тупотилов И.А.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
Троицк, 108840, Пушкиновых, 12
ZakharenkovAV@mpei.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА РАБОЧЕМ УЧАСТКЕ С ШАРОВОЙ ЗАСЫПКОЙ

Повышение уровня безопасности является одной из центральных задач при проектировании и эксплуатации ядерных энергетических установок, но в свою очередь возрастающие требования к системам безопасности приводят к существенному увеличению стоимости.

В настоящее время все более активно исследуется вопрос внедрения микротвэлов в реакторные установки нового поколения. Это наиболее перспективное решение, при использовании микротвэлов в качестве топлива, реактор можно охлаждать как однофазным, так и двухфазным теплоносителем, притом перегрев теплоносителя происходит именно в активной зоне. Микротвэльная шаровая засыпка может располагаться в кассетах различных форм и размеров, наиболее перспективным вариантов является кассета с продольно-поперечным движением охлаждающей среды. Шаровой микротвэл состоит из топливного ядра, покрытого

защитной оболочкой. Оболочки разделяют топливо и теплоноситель и обеспечивают удержание продуктов деления ядер [1].

Исследованию гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках и пористых слоях посвящено достаточно большое количество работ, однако

однако систематизированных исследований в широком диапазоне режимных параметров, вплоть до реакторных, в научной литературе представлено достаточно мало.

Целью данной работы является экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена на рабочих участках, представляющих собой цилиндрическую засыпку шаровых элементов.

В 2010 году на кафедре ОФиЯС был собран и введен в эксплуатацию экспериментальный стенд ТВС-МЭИ. Для проведения исследований по гидродинамике и теплообмену в шаровых засыпках была выполнена модернизация гидравлического контура, с целью установки в нем рабочего участка – масштабированной модели шаровой засыпки.

Проведены экспериментальные исследования по определению потерь давления и коэффициента гидравлического сопротивления цилиндрической шаровой засыпки при следующих режимных параметрах теплоносителя: $p = (1,0 \div 5,0)$ МПа, $G = (0,05 \div 0,5)$ кг/с. Также были выполнены эксперименты по теплообмену, их целью было определить возможности нагрева данного рабочего участка выбранным методом. Разработана технология монтажа, вывода и герметизации термопар (ТП) на рабочем участке.

В ходе обработки были выявлены и построены зависимости потерь давления от массовой скорости теплоносителя, а также гидравлического сопротивления засыпки шаровых элементов от числа Рейнольдса, она представлена на рис. 1.

Разработанные конструкция рабочего участка и методики позволяют проводить дальнейшие исследования при более широком диапазоне режимных параметрах, в том числе при высоких давлениях, соответствующих эксплуатационным установок ВВЭР-1000.

Работа поддержана РНФ (соглашение № 16-19-10457-П).

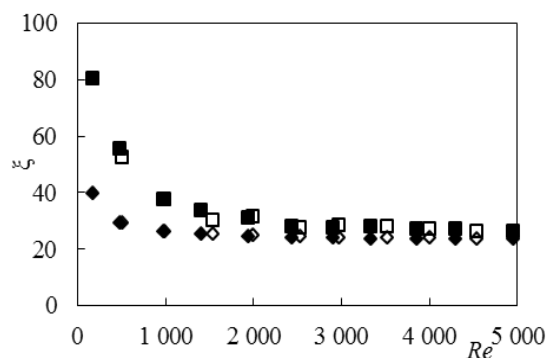


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления шаровой засыпки от числа Рейнольдса при 3 и 6 МПа, соответственно:
 ◆, ◊ - ξ определен по формуле Богоявленского, ■, □ - ξ определен из экспериментальных данных

Список литературы

1. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Хрулев А.А., Дегальцев Ю.Г. и др. Перспективы развития микротвэлов в ВВЭР, Атомная энергия, Т.86, №6, 1999, 443.

Миронов А.А.¹, Исаев С.А.², Скрыпник А.Н.¹, Попов И.А.¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева - КАИ, Казань, 420111, К.Маркса, 10

² Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38
skrart555@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОТДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ – ОБЗОР, ВЕРИФИКАЦИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Сегодня основное направление исследований - поиск рациональных форм интенсификаторов. В последние 15-20 лет проведены обширные исследования вихревой интенсификации теплоотдачи с использованием сферических выемок. Работы по поиску формы, обеспечивающей сопоставимый, а желательнее опережающий прирост теплоотдачи по сравнению с гидросопротивлением, вызывают огромный интерес в первую очередь у производителей и потребителей теплообменного оборудования и ставят данный вопрос перед исследователями. С развитием как вычислительной техники и специализированных пакетов прикладных программ огромные успехи достигнуты за счет использования современных вычислительных технологий. Среди перспективных форм выемок выделяют овально-траншейные выемки, наклоненные под углом α к набегающему потоку. Их конструкция сочетает в себе две разнесенные половины сферической выемки глубиной h , соединенные цилиндрической канавкой шириной b и длиной l . В работах С.А.Исаева проведены комплексные численные исследования гидродинамики и теплообмена в узких каналах высотой h_k с системами овально-траншейных выемок в широком диапазоне конструктивных параметров - относительной длины $l/b=1-7$, угла натекания - $\alpha=1-89^\circ$, относительной глубины выемок $h=(0,0625-0,375)b$, относительного шага $H=(2-8)b$ при фиксированном значении числа Рейнольдса $Re=10^4$. Проведенные численные исследования позволили сформулировать и запатентовать основные рациональные параметры

вихревого интенсификатора теплообмена в виде овально-траншейной выемки – выемка должна иметь относительно большое удлинение ($l/b=4,7-5,78$ или $lk/b=5,57-6,78$) и относительную глубину $h/b=0,18-0,37$, расположена под углом $\alpha=45^\circ$ по отношению к направлению потока. При выборе данной формы вихрегенератора акцент делается на формирование интенсивной моносмерчевой структуры в выемке и течения в следе за ней, которая отличается высокой стабильностью и интенсивностью по сравнению со сферическим аналогом. Однако, анализ результатов численных исследований картин растекания и полей локальных коэффициентов теплоотдачи в удлиненных овально-траншейных выемках выявил, что в области крайней по ходу течения кромки выемки возникают области с пониженными скоростями и малыми локальными коэффициентами теплоотдачи. Для решения проблемы предложена овально-дуговая выемка. Технический результат достигается за счет того, что теплообменная поверхность для интенсификации теплоотдачи при турбулентном течении теплоносителя выполнена в виде периодически нанесенных углублений. Результаты численных исследований картин растекания, представленных в научных докладах Исаева С.А., показали отсутствие застойных зон во второй половине выемок, увеличение локальных скоростей в ней и повышение локальных коэффициентов теплоотдачи.

В работе приведены результаты экспериментального исследования нового типа интенсификаторов в виде овально-траншейных и овально-дуговых выемок.

Выявленные эффекты интенсификации теплоотдачи и повышения гидросопротивления позволили оценить теплогидравлическую эффективность E каналов с выемками $h/b=0,25$; $lk/b=7$ и выявить, что при многорядном расположении выемок максимальное значение $E=1,11$ наблюдается в каналах с системами овально-дуговых выемок при турбулентном режиме течения. Это показывает перспективность использования данных интенсификаторов для снижения весогабаритных характеристик авиационных теплообменников

без изменения мощности на прокачку теплоносителя. Для каналов с овально-траншейными и сферическими выемками при рассматриваемых условиях значения данного фактора составили 0,97 и 0,68, соответственно.

Научные исследования проводились при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по выполнению обязательств по Соглашению 075-03-2020-051-3 от 09.06.2020. .

Митрофанова О.В.^{1,2}, Байрамуков А.Ш.²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
1153409, Москва, Каширское шоссе, 31

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

КРИЗИС ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА И ЕГО ПРОЯВЛЕНИЕ В РАЗЛИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Явления, связанные с изменением внутренней вихревой структуры потока, широко известны в феноменологической гидродинамике. К ним можно отнести случаи структуризации течений с образованием так называемых вторичных течений - вихрей Тейлора, Тейлора-Гертлера, Дина, генерацию детерминированной вихревой структурой потока в акустических течениях и др. . Характерной чертой этих явлений является их кризисное проявление, т.е. наличие экспериментально выявленных критических условий (критических чисел), при которых происходит структурная перестройка поля течения с образованием устойчивых вихревых структур.

В настоящей работе для теоретического описания кризиса закрученного потока, являющегося одним из ярких проявлений кризиса термодинамической устойчивости, связанного с образованием упорядоченных вихревых структур и переходом динамической системы к энергетически более выгодному состоянию, используется подход, развитый академиком И.И. Новиковым в монографии [1] на основе ранее сделанного открытия [2]. Суть этого открытия заключается в определении кризиса закрученного течения как режима течения, при котором расходная скорость закрученного потока жидкости достигает своего предельного значения, равного скорости распространения длинных центробежных волн. В работе [3], впервые было обосновано, что открытие [2] применимо и к замкнутым циркуляционным трактам.

В настоящей работе показано, что кризис закрученного течения может иметь место в различных энергетических, двигательных, химико-технологических аппаратах и других технических устройствах, связанных с использованием высокоскоростных закрученных течений жидкостей или газов. В ряде случаев реализация кризисного режима закрученного потока, обеспечивающего появление зоны рециркуляционного (возвратного) течения является необходимым условием для достижения достаточной эффективности протекания самого физического или технологического процесса, например, в камерах сгорания авиационных и ракетных двигателей, циклонах, сепараторах, горелочных устройствах, стабилизаторах пламени и др. Вместе с тем отмечается, что характерной чертой таких устройств является наличие больших потерь давления, требующихся для организации закрученного течения [4].

Проведенные экспериментально-теоретические исследования, показали, что сложная геометрия различных элементов теплогидравлического тракта ядерных энергетических установок (ЯЭУ), включающего в себя коллекторную систему, парогенераторы и систему компенсации давления, может являться не только определяющим фактором в формировании крупномасштабных вихревых структур и генерации закрутки потока, но и в ряде случаев приводить к кризису закрученного течения.

В представленной работе проявление кризиса закрученного потока подробно рассмотрено на примере моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в парогенерирующих каналах ледокольной парогенерирующей установки. Результаты вычислительных экспериментов показали, что реализация режима, соответствующего кризису закрученного течения, приводит не только к резкому повышению гидравлических потерь и снижению теплогидравлической эффективности работы установки, но и к генерации акустических колебаний, усилению вибраций и появлению опасных резонансных эффектов, ведущих к развитию прочностных дефектов и аварийным ситуациям.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований - грант РФФИ 19-08-00223-а и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.a03.21.0005).

Список литературы

1. Новиков И.И. Термодинамика спинодалей и фазовых переходов. М.: Наука. 2000. 165 с.
2. Новиков И.И., Скобелкин В.И., Абрамович Г.Н., Клячко Л.А. Закономерность расхода жидкости в закрученном потоке. Открытие № 389 внесено в Гос. реестр открытий 18.10.1990 г.
3. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерных энергетических установок. Изд.2-е. М.: ЛЕНАНД, 2019. - 352 с.
4. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки / Пер. с англ. М.: Мир 1987. 588 с.

*Митрофанова О.В.^{1,2}, Байрамуков А.Ш.², Ивлев О.А.², Поздеева И.Г.^{1,2},
Старовойтов Н.А.^{1,2}, Уртенев Д.С.², Федоринов А.В.²*

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское ш., 31

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт»,
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРАКТА ТРАНСПОРТНЫХ ЯЭУ

В настоящей работе приведены результаты комплексного исследования особенностей гидродинамики и теплообмена в трубных системах различных элементов теплогидравлического тракта судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Для выполнения вычислительных экспериментов был проведен расчетно-теоретический анализ по выбору моделей турбулентности, их апробация на типовых элементах криволинейных трубопроводов и сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными.

В процессе проведения численных расчетов варьировались как геометрия исследуемых объектов, так и условия однозначности в постановке решаемых задач. Первый блок задач включал в себя исследование особенностей гидродинамики в трубопроводах системы компенсации давления. Переход от простой геометрии, представляющей собой трубопроводы с двумя и пятью изгибами, к более сложным элементам, имитирующим участки реальных трубных систем, позволил выделить проблемные участки с целью дальнейшей их оптимизации. В ходе проведения работы было обнаружено, что макровихревые структуры и закрутка потока могут выступать в роли источников возбуждения вибраций трубопровода. Частота последних по условиям надежности должна удовлетворять условиям отстройки частот. Для проверки выполнения данного условия были сделаны оценки собственных частот колебаний теплоносителя и элементов трубопроводов системы компенсации давления по методике, предложенной авторами работы [1].

Второй блок задач включал в себя анализ особенностей гидродинамики в каналах парогенераторов судовых ЯЭУ, выявление способов повышения теплоэнергетической эффективности, объяснение причин возникновения статической и динамической неустойчивости работы парогенерирующих каналов, оценку термического КПД и поиск решений по его увеличению. В результате численного решения задач гидродинамики были выявлены участки змеевикового канала парогенератора, на которых могут возникать эффекты «запирания» потока, теоретическое обоснование которых впервые приведено в работе академика И.И. Новикова [2]. В работе [3]

было показано, что эффект запираания потока в замкнутых контурах циркуляции возникает при наличии закрученного течения и выполнения условия равенства среднерасходной скорости и скорости распространения длинных центробежных волн. Результаты, полученные в настоящем исследовании, подтверждают данный факт на примерах возникновения зон рециркуляционного течения в сложных криволинейных каналах парогенерирующих установок.

В данной работе показано, что предложенный анализ по выбору критерия оценки теплогидравлической эффективности работы судовых ЯЭУ и определению целевой функции оптимизации позволит уменьшить сопротивление дроссельных устройств, использование которых обусловлено статической неустойчивостью потока рабочего тела, а также избавиться от динамической неустойчивости за счет исключения геометрии, приводящей к возникновению кризиса закрученного потока.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований - грант РФФИ 19-08-00223-а и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.a03.21.0005).

Список литературы

1. **Проскуряков К.Н., Федоров А.И., Запорожец М.В.** Исследование акустических стоячих волн в первом контуре АЭС с ВВЭР-440 в пусковых режимах/ Проскуряков К.Н., Федоров А.И., Запорожец М.В. и др. // Глобальная ядерная безопасность, № 2, 2016. С. 59-69.
2. **Новиков И.И.** Термодинамика. Москва: Машиностроение, 1984. 592 с.
3. **Митрофанова О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.

Михеев Н.И., Душин Н.С., Душина О.А., Шакиров Р.Р.

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский
научный центр РАН,
420111, Казань, Лобачевского, 31/2
n.miheev@mail.ru

ТЕПЛООБМЕН И СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ДИСКРЕТНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ СТЕНКИ

Представлены результаты исследования, направленного на изучение эффектов внутренней нестационарности процессов при обтекании элементов дискретной шероховатости с целью целенаправленного использования этих эффектов для интенсификации теплообмена. Выявлены закономерности распределения локального коэффициента теплоотдачи при стабилизированном течении в канале с дискретной шероховатостью стенки в виде поперечных выступов квадратного сечения на участке тепловой стабилизации с подводом теплоты по закону $q=\text{const}$. Установлено, что при условии гидродинамической стабилизации потока не менее чем пятью выступами перед началом обогреваемой части канала эффект начального теплового участка практически отсутствует: уже после второго выступа на обогреваемом участке распределение локального теплообмена между выступами с хорошей точностью повторяется (рис.1). Первый локальный максимум интенсификации достигается на расстоянии 5-6 высот от передней кромки выступа, в окрестности точки присоединения потока. Далее вниз по течению интенсивность теплообмена немного снижается, а в области отрыва потока перед следующим выступом достигает абсолютного максимума. Интенсивность теплообмена в ближнем следе за выступом на 15-30% ниже первого локального максимума. Именно эта область течения наиболее перспективна для дополнительной интенсификации теплообмена за счет внутренней нестационарности процессов.

Методом SIV [1] выполнены измерения динамики векторных полей скорости потока при турбулентном течении в канале с дискретной шероховатостью стенки, на основе которых получен полный комплекс

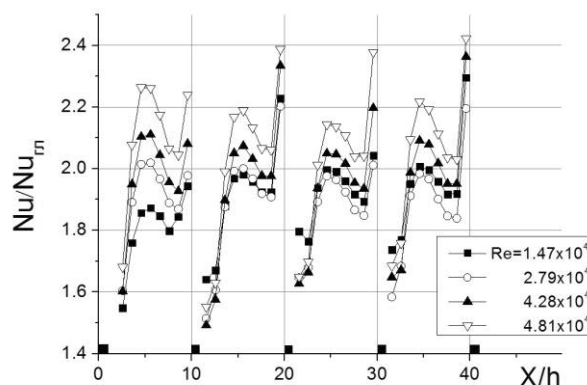


Рис. 1. Распределение локального коэффициента теплоотдачи на стенке канала с дискретной шероховатостью стенки в виде поперечных выступов квадратного сечения с относительной высотой $h/D\Gamma=0.073$ и шагом $t/h=10$

характеристик пространственного распределения турбулентности и выполнена оценка интегрального масштаба турбулентности в пристеночной области течения. Установлено, что с уменьшением относительной высоты выступов относительный интегральный масштаб турбулентности смещается в сторону более крупных масштабов. При этом спектр турбулентных пульсаций скорости потока в пристеночной области течения смещается в сторону более низких относительных частот f , нормированных по отношению скорости потока u к высоте выступа: fh/u . В случае низких выступов $h/D\Gamma < 0.02$ значительная часть энергии пульсаций сосредоточена в окрестности относительной частоты $fh/u=0.1-0.2$, наиболее благоприятной для интенсификации теплообмена в ближнем следе за выступом [2]. Динамика обтекания низких выступов стационарным потоком приближается к таковой при обтекании высоких выступов пульсирующим потоком при частотах вынужденных колебаний, оптимальных для оптимизации теплоотдачи в ближнем следе за выступом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00355). Часть результатов по структуре течения получена при поддержке РФФИ (проект 19-08-00421).

Список литературы

1. Mikheev N. I., Goltsman A. E., Saushin I. I., Dushina O. A. Estimation of turbulent energy dissipation in the boundary layer using Smoke Image Velocimetry // Experiments in Fluids 58(8), 97 (2017).
2. Давлетшин И.А., Михеев Н.И. Структура течения и теплообмен при отрыве пульсирующего потока // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 3. С. 442.

Молчанов А.М.

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»,
Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993

ЭФФЕКТИВНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЖЕСТКИХ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ХИМИЧЕСКИ И ТЕРМИЧЕСКИ НЕРАВНОВЕСНЫЕ ТЕЧЕНИЯ

В газовых течениях, в которых происходят неравновесные химические реакции и неравновесные энергетические переходы, характерные времена основных процессов могут различаться в 10^4-10^6 раз. В этом случае основная система уравнений является жесткой, и ее прямое

численное решение требует огромных компьютерных ресурсов. Как правило, для разрешения проблемы жесткости используются неявные схемы. Однако, когда система уравнений описывает сложные кинетические процессы, включающие многочисленные химические реакции и переходы между различными энергетическими модами, эта система может включать десятки и даже сотни уравнений. Использование чисто неявных методов приводит к необходимости на каждом шаге по времени в каждом узле сетки многократного обращения матриц, имеющих размерность, соответствующую числу уравнений.

В данной работе предложен эффективный неявный численный метод, в котором, с одной стороны, полностью решена проблема жесткости (схема является безусловно устойчивой), с другой стороны, уменьшено число обращений матриц, а сами матрицы факторизованы на более мелкие, и их обращение требует значительно меньше компьютерных ресурсов, чем в чисто неявной схеме.

Неявное конечно-объемное представление основной системы уравнений имеет следующий вид [1]:

$$\mathbf{A}_{i,j} \delta \mathbf{U}_{i,j}^{n+1} + \mathbf{V}_{i,j} \delta \mathbf{U}_{i,j+1}^{n+1} + \mathbf{C}_{i,j} \delta \mathbf{U}_{i,j-1}^{n+1} + \mathbf{D}_{i,j} \delta \mathbf{U}_{i+1,j}^{n+1} + \mathbf{E}_{i,j} \delta \mathbf{U}_{i-1,j}^{n+1} = \Delta \mathbf{U}_{i,j}^{n+1} \quad (1)$$

где $\Delta \mathbf{U}_{i,j}^{n+1}, \delta \mathbf{U}_{i,j}^{n+1}$ - явное и неявное приращения основного вектора \mathbf{u} ; $\mathbf{A}_{i,j}, \mathbf{V}_{i,j}, \mathbf{C}_{i,j}, \mathbf{D}_{i,j}, \mathbf{E}_{i,j}$ - матрицы, размер которых совпадает с числом уравнений в основной системе. В случае, когда решаются только уравнения неразрывности, импульса и энергии, размер этих матриц равен 4×4 (5×5 для трехмерных задач), и их обращение (а также обращение комбинаций этих матриц в векторной прогонке) легко реализуется с использованием аналитических формул. При большом числе дополнительных уравнений размерность матриц существенно возрастает, но, если положить источник в этих дополнительных уравнениях равным нулю, то матрицы $\mathbf{A}_{i,j}, \mathbf{V}_{i,j}, \mathbf{C}_{i,j}, \mathbf{D}_{i,j}, \mathbf{E}_{i,j}$, а, самое главное, матрицы, появляющиеся в промежуточных вычислениях, имеют общий блочный вид:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \mathbf{0} \\ \Phi_{21} & \mathbf{D} \end{pmatrix} \quad (2)$$

где матрицы-блоки имеют следующие размеры: Φ_{11} - 4×4 ; Φ_{21} - $N_a \times 4$; \mathbf{D} - диагональная матрица размером N_a . Здесь N_a - число дополнительных уравнений. Обращение матриц вида (2) сводится к однократному обращению матрицы Φ_{11} и тривиальным операциям перемножения матриц.

Матрица $\mathbf{A}_{i,j}$ может быть представлена в виде $\mathbf{A}_{i,j} = \mathbf{I} + \alpha \Delta t \mathbf{a}_{i,j}$, где \mathbf{I} - единичная матрица; $\mathbf{a}_{i,j}$ - матрица, учитывающая влияние вязких и невязких потоков при их неявном представлении.

При ненулевом векторе-источнике матрица $A_{i,j}$ имеет вид $A_{i,j} = I + \alpha \Delta t \mathbf{a}_{i,j} - \alpha \Delta t (\partial \mathbf{H} / \partial \mathbf{U})_{i,j}^n$, где $\partial \mathbf{H} / \partial \mathbf{U}$ - матрица Якоби. Структура этой матрицы и матриц, появляющихся в промежуточных вычислениях, уже не соответствует виду (2). В этом случае предлагается следующая факторизация уравнения (1):

$$\left[I - \alpha \Delta t \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{U}} \right)_{i,j}^n \right] (I - \alpha \Delta t \mathbf{d}_{i,j}^n)^{-1} \left[(I + \alpha \Delta t \mathbf{a}_{i,j} - \alpha \Delta t \mathbf{d}_{i,j}^n) \delta \mathbf{U}_{i,j}^{n+1} + \mathbf{B}_{i,j} \delta \mathbf{U}_{i,j+1}^{n+1} + \mathbf{C}_{i,j} \delta \mathbf{U}_{i,j-1}^{n+1} + \mathbf{D}_{i,j} \delta \mathbf{U}_{i+1,j}^{n+1} + \mathbf{E}_{i,j} \delta \mathbf{U}_{i-1,j}^{n+1} \right] = \Delta \mathbf{U}_{i,j}^{n+1} + \Delta t \mathbf{H}^n \quad (3)$$

где \mathbf{d} - диагональная часть матрицы $\partial \mathbf{H} / \partial \mathbf{U}$. В этом случае решение системы (3) сводится к однократному обращению матрицы, связанной с источником, и решению системы типа (1), в которой все матрицы имеют вид (2). Кроме того, матрица $\partial \mathbf{H} / \partial \mathbf{U}$ разбивается на блоки по физическим процессам.

Время решения системы уменьшается в несколько раз по сравнению с чисто неявным методом. Например, при 10 дополнительных уравнениях для химических компонентов, примерно в 4 раза.

Список литературы

1. **MacCormack, R.W.** A New Implicit Algorithm for Fluid Flow//AIAA Paper 97-2100. -1997. -8p.

Москаленко Н.И., Додов И.Р., Ахметшин А.Р.

Казанский государственный энергетический университет «КГЭУ»
Казань, 420066, Красносельская, 51
ahmetshin.ar@mail.ru

СПЕКТРАЛЬНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ

Анализируются результаты многолетних исследований спектральных радиационных характеристик оптически активных ингредиентов продуктов сгорания энергетических топлив и антропогенных выбросов в атмосферу, выполненных с высоким и средним спектральным разрешением на измерительных комплексах различного функционального назначения. Выполнена параметризация функций спектрального пропускания (ФСП) ингредиентов газовой фазы продуктов сгорания двухпараметрическим методом эквивалентной массы для неоднородных по давлению и температуре сред [1]. Рассматривается применение метода тонкоструктурной спектроскопии для определения ингредиентного состава продуктов сгорания топлив и антропогенных выбросов в атмосферу. Для получения ФСП при высоких температурах использован метод численного моделирования с применением высокотемпературных

атласов параметров спектральных линий. Отмечается, что селективность излучения газовой фазы продуктов сгорания в условиях структурно-неоднородной по температуре среды вносит дополнительные ошибки при решении задачи радиационного теплообмена, обусловленные проявлением эффекта температурного самообращения спектральных линий при высоких температурах.

Разработанные измерительные комплексы имеют модульную конструкцию и вспомогательное оборудование для полного метрологического обеспечения. Спектральная область измерений $0,2 \div 100$ мкм обеспечивается сменой оптических элементов, модулей приема излучения. Изменение оптического пути в средах достигается применением многоходовых оптических схем. Для регистрации спектров поглощения и излучения используются модернизированные дифракционные спектрометры ИКС-24, ИКС-31, ДФС-1, ДСЛ-3, растровый спектрометр Жерара, фурье-спектрометры ФС-01, УФС-02 разработки ЦКБ уникального приборостроения АН СССР. Для снижения шумов используется многократное сканирование спектров и математическая обработка измеренных спектров сплайном в виде полинома пятого или седьмого порядков.

Для создания высоких температур 1500-3000 К используется пламенный измерительный комплекс со встроенной оптической системой Уайта многократного прохождения пламени. Корпус высокотемпературного излучателя и зеркала охлаждаются водой. Установка работает в режимах регистрации спектров поглощения и спектров излучения пламени. В качестве топлива используется водород и метан. Другие оптически активные компоненты вводятся в пламенную зону.

Для определения параметров спектральных линий спектры высокого спектрального разрешения разделяются на отдельные контуры спектральных линий методом дифференциальных моментов с последующим их восстановлением на влияние аппаратной функции спектрометра [2].

Список литературы

1. Москаленко Н.И., Мирумянц С.О., Локтев Н.Ф., Мисбахов Р.Ш. Равновесные и неравновесные процессы излучения: высокотемпературные среды, радиационный теплообмен. Казань, изд. КГЭУ. 2014. 264 стр.
2. Москаленко Н.И. и др. Идентификация ингредиентов и определение ингредиентного состава атмосферных выбросов и продуктов сгорания методом тонкоструктурной спектроскопии//Альтернативная энергетика и экология. 2010. №2. 43-54 с.

Москаленко Н.И., Додов И.Р., Хамидуллина М.С., Сафиуллина Я.С.
 Казанский государственный энергетический университет «КГЭУ»,
 Казань, 420066, Красносельская, 51
 maryana1125@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ

Основные закономерности влияния дисперсной фазы продуктов сгорания на радиационный теплообмен в камерах сгорания энергетических агрегатов можно понять, применив теорию Ми рассеяния излучения к частицам дисперсной фазы, интервал распределения которых по размерам достаточно широк и зависит от химического состава, вида топлива и конструкции камеры сгорания [1]. В докладе рассмотрены результаты экспериментальных исследований радиационных характеристик дисперсной фазы продуктов сгорания и микроструктуры частиц сажевого золя. При моделировании предполагается, что частицы имеют сферическую форму (r - радиус частицы).

По выбранному нами моделированию [2] золь дисперсной фазы продуктов сгорания представляется суперпозицией отдельных фракций, микроструктура $N(r)$ которой описывается соотношением:

$$N(r) = \sum_{i=1}^N N_i(r) = \sum_{i=1}^N A_i r_{a_i}^{n_i} \exp[-b_i r^{c_i}]$$

A_i, a_i, b_i, c_i - параметры i -ой фракции, N - число фракций. Радиационные характеристики, спектральные коэффициенты ослабления $\sigma_{\lambda a}$, рассеяния $\sigma_{\lambda a}^S$, поглощения $\sigma_{\lambda a}^a$ нормированы на оптическую плотность. Каждая фракция золя $N_i(r)$ может задаваться своим вертикальным профилем оптической плотности $B_i(z)$ в зависимости от высоты z в топке.

Таким образом $\sigma_{\lambda a} = \sum_{i=1}^N B_i(z) \sigma_{i\lambda a}$, $\sigma_{\lambda a}^S = \sum_{i=1}^N B_i(z) \sigma_{i\lambda a}^S$, $\sigma_{\lambda a}^a = \sum_{i=1}^N B_i(z) \sigma_{i\lambda a}^a$.

Индикатриса рассеивания $f_{\lambda}(z_i, \theta) = \sum_i B_i(z) f_{i\lambda} / \sum_i B_i(z)$, где $B_i(z) = \frac{\partial \tau_i}{\partial z}$ -

вертикальный профиль оптической плотности для длины волны $\lambda = 0,55 \mu\text{м}$, $f_{i\lambda}$ - индикатриса рассеяния на длине волны λ i -ой фракции сажевого золя, вычисленные по теории Ми для гамма распределений $N_i(r)$ с модальным радиусом $r_{im} \in \{0,001; 10\}$ мкм. Радиационные характеристики для различных

распределений $N_i(r)$ в спектральной области $0,2 \div 50$ мкм представлены в виде электронной базы данных для ПЭВМ.

Список литературы

1. **Москаленко Н.И., Мирумянц С.О., Локтев Н.Ф., Мисбахов Р.Ш.** Равновесные и неравновесные процессы излучения: высокотемпературные среды, радиационный теплообмен // Казань, Изд.КГЭУ, 2014. 264 с.
2. **Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков В.Д.** Атмосферный аэрозоль.// Л.: Гидрометеиздат, 1984. 224 с.

*Надеев А.А.¹, Бараков А.В.¹, Дубанин В.Ю.¹, Муравьев А.В.¹,
Хрипунов К.Г.², Солженикин П.А.¹*

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»,
394026, Воронеж, Московский проспект, 14

² Филиал ПАО «Квадра» – «Воронежская генерация»,
394014, Воронеж, ул. Лебедева, 2
alekn85@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА, ГИДРОДИНАМИКИ И КИНЕТИКИ СУШКИ В АППАРАТЕ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

Введение. Среди всех тепломассообменных установок, применяемых в промышленности, важное место занимают аппараты с псевдоожигенным слоем. Это связано с высокой интенсивностью межфазного тепломассообмена в таких аппаратах, их небольшим гидравлическим сопротивлением, малыми габаритами и простой конструкцией. Всё вышперечисленное обусловило, в частности, наличие в промышленности широкого модельного ряда сушилок, реализующих данный технологический принцип. Поэтому разработка и исследование новых, энергоэффективных конструкций и протекающих в них процессов является актуальной задачей, имеющей теоретическое и прикладное значение.

Исследование процессов теплообмена и сушки. В данной работе исследуются процессы в сушильном аппарате с центробежным псевдоожигенным слоем. Он представляет собой установку периодического действия с вертикальной подачей сушильного агента и предназначена для сушки высоковлажных дисперсных материалов с диаметром частиц от 1 до 5 мм, не подверженных «комкованию». Её конструкция и принцип действия, а также описание лабораторного стенда и методики исследования приведены в работе [1], содержащей также

результаты предварительной серии экспериментов по сушке дисперсного материала.

При исследовании межфазного теплообмена и кинетики сушки в центробежном псевдооживленном слое с помощью соответствующих датчиков фиксировались: температура и относительная влажность воздуха на входе в аппарат ($t'_g, ^\circ\text{C}; \varphi', \%$) и на выходе из неё ($t''_g, ^\circ\text{C}; \varphi'', \%$), а также изменяющиеся в процессе сушки температура и влажность материала ($t_m, ^\circ\text{C}; w, \%$).

Параметры, характеризующие различные режимы сушки, имели следующие значения: температура сушильного агента (воздуха) на входе в рабочую камеру аппарата $t'_g = 35; 45; 55 ^\circ\text{C}$; скорость сушильного агента на входе в слой $v_g = 2,0; 2,3 \text{ м/с}$; масса силикагеля в рабочей камере $M_m = 1,0; 1,5 \text{ кг}$; начальное влагосодержание силикагеля $u_n = 0,32; 0,53; 0,82 \text{ кг/кг}$. Всего исследовано 18 режимов сушки. На основе полученных данных сделан вывод, что интенсивность сушки в исследуемом аппарате достаточно высока. Это позволяет реализовать процесс низкотемпературной сушки, что особенно важно при сушке термолабильных материалов. Также была исследована зависимость коэффициента межфазного теплообмена от времени сушки.

Исследование гидродинамики. Другой важной характеристикой аппарата является гидравлическое сопротивление газораспределительной решётки и псевдооживленного слоя, которое определяет затраты энергии на привод дутьевых установок. Для исследования данного параметра на сушильную установку были установлены датчики избыточного давления. Опыты проводились во всём диапазоне изменения расхода воздуха. По результатам исследования сделан вывод, что применяемая в установке жалюзийная газораспределительная решётка обладает небольшим гидравлическим сопротивлением и обеспечивает достаточно равномерное псевдооживление. Также была получена эмпирическая зависимость для определения гидравлического сопротивления сушилки.

Список литературы

1. Экспериментальное исследование процесса сушки силикагеля в аппарате с центробежным псевдооживленным слоем / А.А. Надеев, А.В. Бараков, В.Ю. Дубанин, А.Ю. Андреев // Вестник ВГТУ. 2018. Т. 14. № 2. С. 44—50.

Наумов И.В., Главный В.Г., Цой М.А., Шарифуллин Б.Р.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 1
naumov@itp.nsc.ru

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ НЕСМЕШИВАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ЗАМКНУТЫХ ВИХРЕВЫХ РЕАКТОРАХ

Создание перспективных технологий вихревого перемешивания является чрезвычайно актуальным направлением различных химических, биологических, фармацевтических и других производителей, использующих процессы вихревого перемешивания. Эффективное использование огромного потенциала замкнутых вихревых центробежных массо- и теплообменников, одновременно реализующих основные свойства вихревого и циркуляционного движения, в первую очередь определяется прогнозированием и пониманием режимов вихревого движения при варьировании интенсивности и величины закрутки потока. Одна из проблем использования вихревых устройств связана с потерей устойчивости осесимметричных закрученных потоков и возникновением в них разного рода сложных трехмерных нестационарных структур, существенно влияющих на процессы переноса в вихревых аппаратах [1].

Свойства потоков с сильной закруткой характеризуются наличием нескольких различных типов возмущений, когда при вариации числа Рейнольдса и параметра закрутки происходит смена режимов течения. Одним из ключевых параметров, влияющих на процессы переноса во многих инженерных приложениях, является распад вихревой структуры. Данное явление характеризуется самопроизвольной сменой структуры закрученного течения и образованием зон рециркуляции (vortex breakdown-VB) или вихревых мультиплетных структур [2, 3], что способствует дополнительному перемешиванию ингредиентов и увеличивает выход полезного продукта в химических газовых и в биологических двухжидкостных вихревых реакторах.

В докладе представлен обзор методов оптической диагностики и результатов экспериментальных исследований по управлению неустойчивостью течения и областью распада вихря, генерируемого в закрытом контейнере, выполненных в ИТ СО РАН за последние 5 лет. Рассмотрено влияние свойств применяемых жидкостей на эволюцию ячеистого течения и переход к нестационарному режиму вихревого движения в закрытом цилиндрическом вихревом реакторе. Показаны закономерности формирования ячеистой структуры ограниченного вихревого течения двухкомпонентной несмешиваемой жидкости [4, 5] при условных режимах “жидкое дно” и “жидкая вращающаяся крышка”.

Установлен ряд неочевидных интересных особенностей течения такого типа: проскальзывание на границе раздела двухфазной жидкости [6] и эффект стабилизации вихревого течения при усилении вращения вихревого потока.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00508.

Список литературы

1. Cellular Flows / Shtern V.N., New York: Cambridge University Press, 2018. 573 p.
2. **Sørensen J.N., Naumov I.V., Mikkelsen R.** Experimental investigation in three-dimensional flow instabilities in a rotating lid-driven cavity // Exp. Fluids. 2006. V.41(6). P.425-440.
3. **Sørensen J.N., Naumov I.V., Okulov V.L.** Multiple helical modes of vortex breakdown // J. Fluid Mech. 2011. V. 683. P. 430-441.
4. **Naumov I.V., Glavny V.G., Sharifullin B.R., Shtern V.N.** Formation of a thin circulation layer in a two-fluid rotating flow // Phys. Rev. Fluids, 2019. V.4. p. 054702.
5. **Naumov I.V., Sharifullin B.R., Shtern V.N.** Vortex breakdown in the lower fluid of two-fluid swirling flow // Physics of Fluids, 2020. V.32(1). p. 014101.
6. **Naumov I.V., Herrada M.A., Sharifullin B.R., Shtern V.N.** Slip at the interface of a two-fluid swirling flow // Physics of Fluids, 2018. V.30(7). P. 074101.

Нащёкин М.Д., Минко К.Б.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
nash1811@outlook.com

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОРЕБРЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОДОРОДА

При использовании многих современных способов выработки водорода на выходе получается водород, загрязненный примесями. Для производства энергии из запасенного водорода предполагается использование электрохимических генераторов (топливных элементов), предъявляющих повышенные требования к чистоте используемого водорода. Одной из перспективных технологий очистки водорода является метод, основанный на фильтрации водорода через слой из частиц металлогидрида, имеющего селективную способность поглощать водород. Подобные сплавы используются в виде порошков и имеют очень низкую теплопроводность (порядка 1 Вт/(м·К)). Таким образом, существуют проблемы, связанные с нагревом или охлаждением таких систем при сорбции или десорбции. Изменение температуры (повышение

в случае сорбции, понижение в случае десорбции) приводит к понижению скорости реакции сорбции или десорбции. Для повышения эффективности работы подобных систем необходимо использовать интенсификаторы теплообмена. Такой подход должен особенно хорошо работать в циклических системах, так как ухудшение массогабаритных характеристик для таких систем не является существенной проблемой и компенсируется повышением эффективности.

В работе [1] были проанализированы основные параметры металлгидридной системы очистки водорода.

Исследование влияния добавок на эффективную теплопроводность было выполнено в упрощенном виде без учета изменения массогабаритных характеристик, чтобы получить оценку сверху возможного эффекта их увеличения. Результаты показали, что в системах очистки водорода использование интенсификаторов тепла может значительно повысить эффективность системы.

В данной работе в качестве интенсификаторов теплообмена использовалось внутреннее оребрение системы. Ребра были установлены по всей длине реактора и равномерно распределены по окружности. Результаты верификации математической модели, использованной в данной работе, приведены в [1].

Были получены результаты для конфигураций с 8 ребрами с толщиной у основания ребра 4 мм, с 16 ребрами с толщиной у основания 2 мм, с 24 ребрами с толщиной у основания ребра 1.5 мм, с 32 ребрами с толщиной у основания ребра 1 мм. Таким образом, за счет уменьшения толщины ребер при увеличении их количества массогабаритные характеристики оставались неизменными. Во всех конфигурациях ребра имели трапецеидальную форму, а длина ребер составляла 20 мм. Для более детального исследования приведенные выше конфигурации были рассчитаны с различными материалами ребер (сталь, латунь, алюминий, медь). Использование оребрения позволило достичь существенного увеличения эффективности работы рассмотренной системы очистки водорода.

Все расчеты были выполнены с использованием CFD-кода ANES [2]. Работа выполнена при финансовой поддержке совета по грантам Президента РФ (грант МК-829.2019.8).

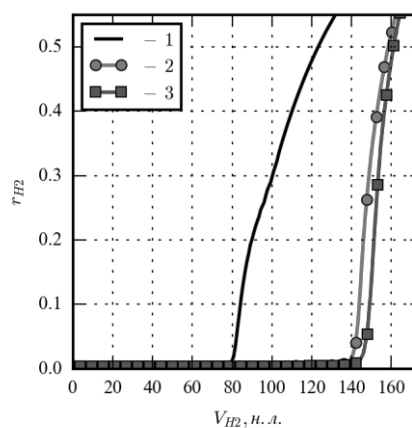


Рис. 1. Зависимость объемной доли водорода на выходе из реактора от объема поглощенного водорода: 1 — базовый режим; 2 — режим с 8 стальными ребрами; 3 — режим с 32 стальными ребрами

Список литературы

1. M.D. Nashchekin, K.B. Minko, V.I. Artemov, Numerical analysis of constructive and regime parameter effects on the efficiency of metal hydride systems for hydrogen purification // Case Stud. Therm. Eng. (2019). doi:10.1016/j.csite.2019.100485.
2. Код ANES [Электронный ресурс]. URL: <http://anes.ch12655.tmweb.ru/> (дата обращения: 15.12.2019).

Ненарокомов А.В., Семенов Д.С.

Московский авиационный институт

(Национальный исследовательский университет), Москва,

Москва, 125993, Волоколамское шоссе, 4

semenov_ds@icloud.com

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ РАДИАЦИОННО- КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЛАЗЕРНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТКАНЕЙ

Лазерная гипертермия поверхностных тканей (импульсный нагрев до 41-45°C) – метод терапевтического воздействия, применяемый в онкологии [1]. Оптимальное планирование и управление данным процессом предполагает математическое моделирование, невозможное без точного определения характеристик облучаемых тканей пациента. Традиционный подход к идентификации, предполагающий контактное измерение температуры на некоторой глубине исследуемого объекта в данном случае затруднителен. В связи с этим, возникает необходимость решения обратной задачи теплообмена.

Целью данного исследования являлась разработка подхода к решению задачи определения комплекса характеристик биологических тканей с использованием бесконтактных измерений.

Материалы и методы

Глубина проникновения излучения применяемых в терапии лазерных установок (600–1200 нм) позволяет не учитывать перенос тепла кровью, поэтому для снижения вычислительной нагрузки в данной работе рассматривается одномерная модель: на плоский образец толщиной d нормально падает импульсный тепловой поток, измерение температуры поверхности происходит бесконтактным способом [2].

Решение задачи основывается на методе итерационной регуляризации [3]: начальные приближения искомым характеристикам задаются нулевыми или по априорной информации, решается прямая краевая задача и система задач для приращения температуры; вычисляется приращение неизвестных характеристик и значение минимизируемого функционала невязки, а затем проверяется условие выхода из итерационного процесса,

характеризующее требуемую точность. Определение комплекса характеристик может представлять собой последовательность экспериментальных исследований, на каждом из этапов которого учитываются допущенные ранее погрешности.

Для апробации методики определялись коэффициент теплоотдачи α и амплитуда теплового потока лазера q_{\max} , падающего на пластину из полиэтилена низкого давления с теплопроводностью 1750 Дж/(кг·К), толщиной 3 мм. Мощность лазерной установки составляла 3 Вт, испытания проводились при температуре 24,6 °С. Режим работы лазера был выбран таким образом, чтобы температура облучаемой поверхности находилась в диапазоне 40–42 °С, что соответствует условиям терапевтического воздействия.

Результаты

Полученные в ходе эксперимента зависимости температуры поверхности и интенсивности работы лазера от времени были использованы как входные данные для разработанного программного комплекса, реализующего методику идентификации. Выбранные априорно начальные значения $\alpha = 0,1$ Вт/(м²·К) и $q_{\max} = 465$ Вт/м² позволили определить такие значения, при которых расхождение расчетных и экспериментальных данных минимально. Искомые характеристики были восстановлены за пять итераций.

Список литературы

1. Домбровский Л.А., Тимченко В.М. Лазерная гипертермия поверхностных опухолей: модели переноса излучения, сложного теплообмена и деградации биологических тканей // Тепловые процессы в технике. 2015. Vol. 7, № 1. P. 24–36.
2. Ненарокомов А.В., Семенов Д.С., Домбровский Л.А. Идентификация математических моделей теплообмена с использованием бесконтактных измерений // Тепловые процессы в технике. 2018. Vol. 10, № 7–8. P. 354–360.

Нигай Н.А., Сыродой С.В.
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина, 30
nigay_n.a@mail.ru

ОТЛИЧИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ СУШКИ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕТОК ХВОЙНЫХ И ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ

Одним из наиболее опасных и частых природных бедствий современности являются лесные пожары [1]. Положительная динамика роста среднегодовой температуры на планете существенно усугубляет ситуацию [2]. Лесные пожары приводят к значительному насыщению атмосферы диоксидом углерода (основной парниковый газ) и, как следствие, ускорению процесса глобального потепления.

Одним из способов предотвращения (или существенного уменьшения вероятности возникновения) лесных пожаров является сбор и утилизация крайне пожароопасных лесных горючих материалов (ЛГМ) [3]. Последнее может позволить существенно расширить сырьевую базу тепловых электрических станций (ТЭС) и снизить пожароопасность обширных лесных угодий. Капитальные затраты на использование ЛГМ в теплоэнергетике обусловлены только расходами на их сбор и транспорт.

Как показали эксперименты [4] наиболее приемлемый способ использования древесины — это ее прямое сжигание в топочных устройствах котельных агрегатов ТЭС. Однако стоит сказать, что неотъемлемым этапом подготовки древесного топлива к сжиганию является его дегидратация (сушка).

Цель настоящей работы — экспериментальные исследования интегральных характеристик процессов сушки ЛГМ (ветки хвойных и лиственных пород древесины) в условиях высокотемпературного нагрева.

Результаты

В качестве объекта исследований рассматривались ЛГМ на основе веток хвойных (ель, пихта) и лиственных (тополь, берёза) пород древесины. Исследования процессов сушки проводились на экспериментальной установке, которая по своей методике регистрации основных параметров и обработке результатов соответствует стенду,

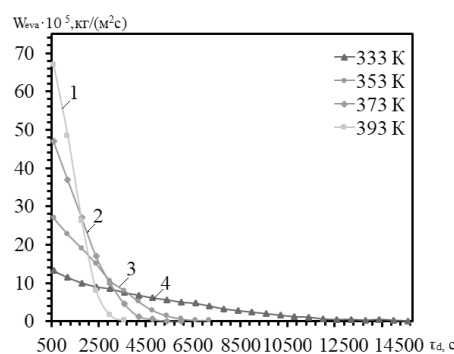


Рис. 1. Зависимости массовой скорости влагоудаления от времени сушки при различных температурах внешней среды:
1 — 393 K; 2 — 373 K;
3 — 353 K; 4 — 333 K.

приведенному в [5]. Методика проведения эксперимента ранее подробно описана в [5].

На рисунке 1 приведены зависимости массовой скорости влагоудаления (W_{eva}) от времени сушки (τ_d) при различных температурах внешней среды (T_g) в диапазоне от 333 К до 393 К. Длительность каждого опыта определялась периодом выхода массы навески m_{bio} на постоянные значения.

Экспериментально установлено, что процесс влагоудаления из веток лиственных пород древесины протекает значительно быстрее, по сравнению с хвойными. Показано, что вид древесины существенно влияет на характеристики и условия процесса дегидратации. По результатам проведенных экспериментов установлены зависимости времен полной дегидратации τ_d древесной биомассы от её вида и состояния.

Список литературы

1. **Naderpour M., Rizeei H.M., Khakzad N., Pradhan B.** Forest fire induced Natech risk assessment: A survey of geospatial technologies // Reliability Engineering and System Safety. 191 (2019) 106558.
2. **Breeze P.** Chapter 2 - The Carbon Cycle and Atmospheric Warming // Electricity Generation and the Environment. (2017) 13-21.
3. **Kauffman J.B., Ellsworth L.M., Bell D.M., Acker S., Kertis J.** Forest structure and biomass reflects the variable effects of fire and land use 15 and 29 years following fire in the western Cascades // Forest Ecology and Management. 453 (2019) 117570.
4. **Голубев В.А.** Обоснование и совершенствование способов энергетического использования растительных отходов: дисс. канд. тех наук: 01.04.14. – М., 2014. С. 107.
5. **Nigay N.A., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V.** Estimation of energy consumption for drying of forest combustible materials during their preparation for incineration in the furnaces of steam and hot water boilers // Energy sources, part A: recovery, utilization, and environmental effects. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1604910>

Овсянник А.В., Ковальчук П.А., Аршуков А.И.

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь, г. Гомель, 246746, пр-т Октября 48

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ МАСЛОФРЕОНОВЫХ СМЕСЕЙ

Исследование процессов теплообмена при кипении озонобезопасных хладагентов и их маслофреоновых смесей является важным и перспективным направлением в области работы холодильной техники и теплонасосных установок. Для расчета испарителей таких установок необходимо знать расчетные зависимости для определения

коэффициентов теплоотдачи, которые могут быть определены только экспериментальным путем [1].

Для решения этой на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» УО «Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого» была разработана комплексная экспериментальная установка кипения-конденсации жидкостей, представленная на рис.1. Работа установки регулируется в широком диапазоне тепловых нагрузок ($1...140 \text{ кВт/м}^2$) [1].

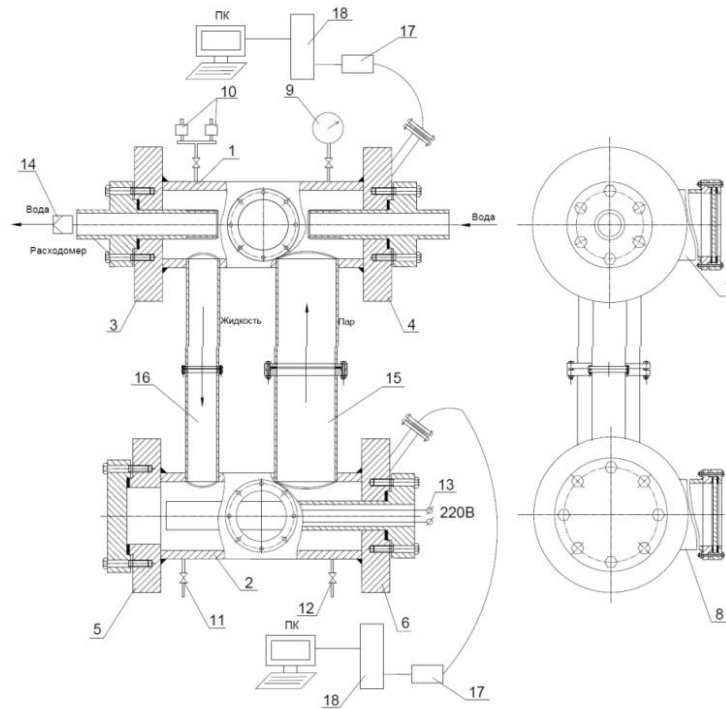


Рис. 1. Комплексный экспериментальный стенд: 1, 2 – рабочие камеры; 3, 4, 5, 6 – фланцы; 7, 8 – смотровые иллюминаторы; 9 – манометр; 10 – предохранительный клапан; 11, 12 – вентиль; 13 – нагреватель; 14 – расходомер; 15 – паровой канал; 16 – жидкостной канал; 17 – аналого-цифровой преобразователь; 18 – компьютер.

Целью и задачами исследования являлось экспериментальное исследование процессов теплообмена при развитом пузырьковом кипении озонобезопасных хладагентов и их маслофреоновых смесей на гладких и развитых теплообменных поверхностях с установлением зависимостей для определения коэффициентов теплоотдачи и влияния на них различных факторов, определяющих интенсивность теплоотдачи при фазовых переходах в аппаратах холодильных, теплонасосных установок и систем кондиционирования воздуха.

Впервые проведены экспериментальные исследования процессов теплообмена при кипении хладагентов R404a, R407c и их маслофреоновых смесей на гладких и оребренных поверхностях в широком диапазоне тепловых нагрузок ($1...140 \text{ кВт/м}^2$). На основе

полученных экспериментальных данных были построены графические зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора, плотности теплового потока, давления насыщения, концентрации масла.

Значение коэффициента теплоотдачи при концентрации масла 5% выше чем у чистого фреона. Это можно объяснить тем, что при небольшой концентрации масла растёт количество центров парообразования и следовательно это ведёт к улучшению интенсивности теплообмена. При дальнейшем увеличении концентрации масла коэффициент теплоотдачи уменьшается.

Список литературы

1. **Овсянник А.В.** Теплообмен и моделирование при кипении на теплоотдающих поверхностях. LAMBERT Academic Publishing. ISBN 978-613-9-85413-4. 2018. 348с.;
2. **Толубинский В.И.** Теплообмен при кипении. Киев. Наукова думка. 1980. 313с.;
3. **Лабунцов Д.А.** Обобщенные зависимости для критических тепловых нагрузок при кипении жидкостей в условиях свободного движения //Теплоэнергетика. 1960. № 7.С. 76-80.

Павленко А.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, просп. Акад. Лаврентьева, 1
pavl@itp.nsc.ru

КРИЗИСЫ КИПЕНИЯ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ В ОПИСАНИИ КРИТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

В докладе приведен краткий анализ существующих модельных подходов к описанию критического теплового потока при пузырьковом кипении. Целью докладчика является представление современного видения исследователей на физические механизмы кризисов кипения с учетом достигнутых на сегодняшний день новых экспериментальных и теоретических результатов. Значительное увеличение с каждым годом числа исследований, посвященных проблемам теплообмена при кипении и испарении, объясняется появлением и развитием новых высокоэффективных и комплексных методов экспериментального и теоретического исследования, значительными успехами в материаловедении, связано с решением новых крупных прикладных задач. Развитие новых современных экспериментальных методов дает возможность получать более глубокую и полную информацию об особенностях механизма теплообмена при кипении и испарении, исследовать динамику интенсивного испарения микрослоя жидкости,

нестационарного теплообмена в окрестности отдельных центров парообразования и под паровыми конгломератами в макрослое, получать данные для численного моделирования роста отдельных пузырей, изучать взаимосвязь параметров структурообразования с локальным и интегральным теплообменом, развитием кризисных явлений.

В рамках проводимого автором рассмотрения проблемы изложены некоторые соображения по возможности реализации механизма, определяющего развитие кризиса кипения, который обусловлен развитием неустойчивости Ландау на межфазной поверхности при интенсивном испарении в ансамбле микропленок жидкости [1]. Для надежного обоснования физических допущений, используемых при разработке обсуждаемых в докладе моделей, необходимы более глубокие и систематические исследования структуры двухфазного слоя у теплоотдающей поверхности, его поэтапной эволюции при приближении к критическому тепловому потоку. Показано, что в этой связи принципиально важным является вопрос о нахождении зависимостей относительной доли смоченной поверхности (с учетом нестационарного характера ее поведения) от теплового потока при различных приведенных давлениях и варьировании смачивающих свойств теплоотдающей поверхности, температуропроводности и толщины стенки нагревателя. Также необходимо выявление закономерностей структурообразования, определения характерных пространственных и временных масштабов для эволюционирующего ансамбля микропленок в макрослое у теплоотдающей поверхности. Ответы на эти ключевые вопросы дадут необходимую, но недостающую в настоящее время, информацию для построения наиболее обоснованной и полной (с точки зрения многостадийности и многообразия реализации различных физических механизмов развития переходных процессов) теории кризисов при пузырьковом кипении жидкости, для разработки наиболее эффективных методов интенсификации теплообмена при кипении с использованием микро-наноструктурирования теплоотдающей поверхности.

Список литературы

1. **Павленко А.Н.** О физике развития кризисных явлений при кипении // Теплоэнергетика. 2020. № 4-5. 12 С. Принято к печати.

*Пахаруков Ю.В.^{1,2}, Шабиев Ф.К.^{1,2}, Сафаргалиев Р.Ф.^{1,2}, Симонов А.С.²,
Ездин Б.С.³, Зарвин А.Е.³, Каляда В.В.³*

¹ Тюменский государственный университет,
Тюмень, 625003, Ленина, 25

² Тюменский индустриальный университет,
Тюмень, 625000, Володарского, 38

³ Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, 630090, Пирогова, 2
pacharukovyu@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Создание на границе раздела нефть-вода переходной области с низким поверхностным натяжением, не являющейся микроэмульсией, является актуальной задачей в нефтедобыче. Решение этой задачи позволяет разработать технологии, повышающие нефтеотдачу из нефтяного пласта призабойной зоны [1]. Известно, что низкое поверхностное натяжение на границе раздела нефть - вода связывается с образованием структуры из жидкокристаллических монослоев макромолекул [2]. Такие слои могут быть образованы из планарных наночастиц графена с размером меньше 50 nm. Задачей данной работы является исследование вытесняющей способности воды при добавлении планарных наночастиц графена, наночастиц графита или так называемых Core-shell структур (кристаллиты SiC, покрытые сверху несколькими слоями графена) на границу раздела нефть - вода. Для исследования поведения границы раздела в работе использована радиальная ячейка Хеле–Шоу, геометрические параметры которой составляли: $R_0 = 2 \text{ mm}$, $R_\infty = 120 \text{ mm}$, $b = 0.6 \text{ mm}$ [3]. Планарные наночастицы графена получены в водной графеновой суспензии при ультразвуковом диспергировании [4]. Наночастицы углерода и Core-shell структур синтезированы с использованием высокопроизводительного процесса - быстрого циклического сжатия в химическом реакторе [5]. Водные суспензии наночастиц Core-shell, а также углерода получены тем же способом [4].

В результате моделирования движения в пористой среде на ячейке Хеле-Шоу установлено, что пограничная область между углеводородом и суспензией сохраняет свой фронт, в отличие от движения

дистиллированной воды, образующей с нефтью вязкие пальцы (рис. 1,а). На примере суспензии с частицами графена показано, что движение воды становится устойчивым, вязкие пальцы не наблюдаются (рис. 1,б). На выделенном участке с

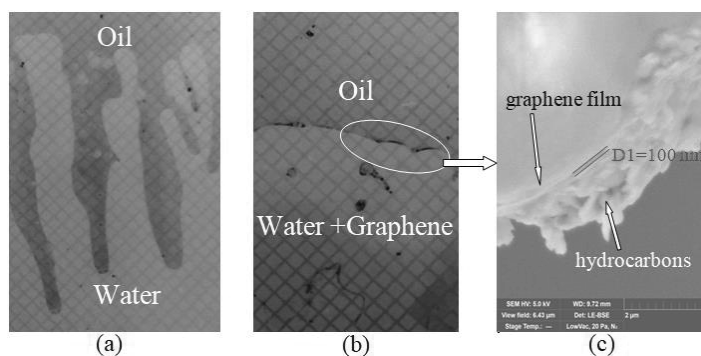


Рис. 1

помощью сканирующего электронного микроскопа можно наблюдать переходную область из наночастиц графена (рис. 1,с). Образование структурированной области на межфазной границе нефть - вода может указывать на низкое поверхностное натяжение. Следовательно, можно предположить, что наночастицы непосредственно участвуют в структурировании переходной области.

Список литературы

1. Алтунина Л.К., Кувшинов В. А. Физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов нефтяных месторождений // Успехи химии. 2007. Т. 76. № 10. С. 1034—1052.
2. Микроэмульсии. Структура и динамика / Биэ Ж., Клэн Б., Лаланн П. и др.. М.: Мир, 1990. 320 с.
3. Pakharukov Yu.V., Shabiev F.K., Safargaliev R.F. Oil displacement from a porous medium with the aid of a graphite suspension // Tech. Phys. Let. 2018. V. 44. No. 2. P. 130—132.
4. Pakharukov Yu.V., Shabiev F.K., Mavrinskii V.V., et al. Formation of a wave structure on the surface of a graphene film // JETP Let. 2019. V. 109. No. 9. P. 615—619.
5. Ezdin B.S., Yatsenko D.A., Kalyada V.V., et al. Pyrolysis of a mixture of monosilane and alkanes in a compression reactor to produce nanodispersed silicon carbide // Chem. Eng. J. 2020. V. 381. No. 122642.

Пахомов М.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск,
630090, пр. Ак. Лаврентьева, 1
pakhomov@ngs.ru; pakhomov@itp.nsc.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА КАПЕЛЬ НА ТЕПЛОМАССОБМЕН В ДВУХФАЗНОМ ОТРЫВНОМ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ПОТОКЕ

Выполнено численное моделирование влияние теплофизических свойств материала капель на распространение дисперсной фазы, турбулентность, трение на стенке и теплоперенос в газокапельном потоке за внезапным расширением трубы с использованием эйлерова подхода. При решении используются осесимметричные RANS уравнения, записанные с учетом обратного влияния частиц на процессы переноса в газе. Турбулентность газовой фазы моделировалась с применением модели переноса рейнольдсовых напряжений, модифицированной на случай присутствия частиц. Система эйлеровых уравнений для осредненных и пульсационных параметров двухфазного потока при наличии испарения капель дополняется уравнениями теплообмена и сохранения массы водяного пара на межфазной границе и уравнением для расчета текущего размера капли.

Целью данной работы является численное исследование влияния теплофизических свойств испаряющихся капель различных жидкостей на изменение турбулентности, структуру течения и теплообмен в отрывном двухфазном потоке за внезапным расширением трубы.

Представлены результаты численного исследования влияния теплофизических свойств испаряющихся капель на структуру течения, турбулентность и теплоперенос в газокапельном потоке после внезапного расширения трубы. Расчеты проведены для капель воды, этанола и ацетона в диапазоне изменения начального диаметра капель $d_1 = 1-100 \mu\text{m}$. В области ядра течения рост числа Стокса вызывает увеличение величины массовой концентрации капель, поскольку большие капли практически не попадают в зону рециркуляции и величина концентрации заметно возрастает. Первоначально рост числа Стокса дисперсной фазы приводит к увеличению концентрации дисперсной фазы в зоне отрыва. Далее по мере роста числа Стокса концентрация капель существенно снижается из-за их непопадания в область отрывного течения. В пристенной области концентрация капель значительно меньше чем в области ядра течения за счет их испарения (для малых числах Стокса) и их отсутствия в зоне рециркуляции (для больших числах Стокса). Показано, что добавление капель приводит к существенному росту теплообмена (до 50% при $M_{L1} = 0.05$) в сравнении с однофазным отрывным течением. Интенсификация теплообмена при использовании

капель этанола несколько выше соответствующего значения для водяных капель (примерно на 10–20%). При этом заметно уменьшается область существования двухфазного течения и уменьшается степень подавления турбулентности несущей фазы за счет наличия дисперсных частиц (до 10–15%) из-за более быстрого их испарения. Эффект от испарения частиц ацетона, имеющего наименьшее значение теплоты фазового перехода, на теплообмен и турбулентность несущей газовой фазы минимальный. Для случая использования капель воды в качестве охладителя длина области интенсифицированного теплообмена наибольшая, тогда как для ацетона – наименьшая. Минимальный эффект интенсификации теплообмена и подавления турбулентности несущей газовой фазы минимальны обнаружен для случая капель ацетона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект РНФ 18-19-00161).

Пискунов М.В., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический
университет,
Томск, 634050, пр. Ленина, 30
piskunovmv@tpu.ru

ВТОРИЧНОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ КАПЛИ ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С НАГРЕТОЙ СТЕНКОЙ В РЕЖИМЕ ПЛЕНОЧНОГО КИПЕНИЯ

Процессы взаимодействия капель топливных эмульсий с нагретой стенкой реализуются в камерах сгорания двигателей. Эти процессы определяются многими факторами, включая характеристики взаимодействующих капель (размер, скорость, концентрация и т.д.), физические свойства жидкости и др. В предлагаемом исследовании анализируются последствия столкновения капель топливных обратных эмульсий на основе бидистиллированной воды и н-додекана с гладкой твердой поверхностью в режиме пленочного кипения. Процесс эмульгирования выполняется с использованием поверхностно-активного вещества Span-80. Динамика взаимодействия капель с плоской гладкой поверхностью сапфирового стекла, нагретого до 350-400°C, соответствует нормальным числам Вебера в диапазоне 1700-2800 и числам капиллярности от 0,28 до 0,5. Видеоматериал, полученный посредством высокоскоростной видеорегистрации и обработанный методом калмановской фильтрации, позволил определить количественные характеристики разрушения обода и внутреннего тонкого слоя жидкости (ламеллы) растекающейся капли (размер, количество и скорость вторичных капель) н-додекана и четырех образцов эмульсий с объемной

концентрацией воды в диапазоне от 1,98 до 19,8 об.%. Анализ характеристик разрушения, а также видеоматериал, полученный посредством высокоскоростной видеорегистрации, помогли предположить механизм разрушения ламеллы, который основан на неустойчивости растекающейся капли эмульсии, возникающей вследствие конвекции Рэлея-Бенара. Такой тип конвекции приводит к локальным градиентам физических свойств по объему ламеллы растекающихся капель эмульсий. Эти градиенты визуально наблюдаются как ячеистые структуры Бенара, радиальное растяжение которых дестабилизирует ламеллу капли эмульсии (рис. 1). Дополнительно выполнены опыты с сидячими каплями эмульсий, последовательно нагреваемыми до температуры насыщения воды, для изучения внутренних конвективных процессов. Результаты опытов продемонстрировали похожие ячеистые структуры. Объемные концентрации воды в этих экспериментах были близки использованным в опытах с взаимодействием капель с поверхностью.

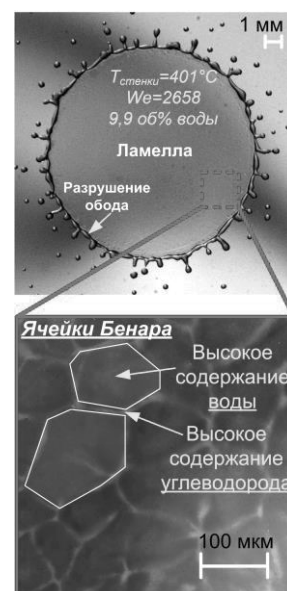


Рис. 1. Конвекция Рэлея-Бенара как причина дестабилизации ламеллы капли эмульсии, взаимодействующей с нагретой стенкой.

Установлено, что интенсивная коагуляция капель воды дисперсной фазы микроэмульсий существенно подавляется при температурах нагрева, близких к точке насыщения воды, и заменяется на конвективное испарение с формированием ячеек Бенара (рис. 1). В рассматриваемом исследовании приводятся эмпирические безразмерные выражения, отражающие, как средний диаметр по Заутеру и количество вторичных капель зависят от физических свойств многокомпонентных жидкостей, значительно отличающихся от однородных составов. Доказана необходимость одновременного учета сил вязкости и поверхностного натяжения при анализе характеристик вторичного распыления капель эмульсий, взаимодействующих с нагретой стенкой. Кроме того, выведены аналитические формулы для определения максимального диаметра растекания взаимодействующих капель эмульсий, среднего диаметра по Заутеру и количества вторичных капель. Полученные результаты экспериментов по взаимодействию капель топливных эмульсий с нагретой гладкой поверхностью безусловно будут способствовать развитию достоверных математических моделей этого процесса.

Пищуха Е.А., Бучилко Э.К., Теплицкий Ю.С.
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова
НАН Беларуси, Беларусь
Республика Беларусь, 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15
ebuchilko@gmail.com

ТРЕХСТАДИЙНОЕ СЖИГАНИЕ ТВЕРДЫХ БИОТОПЛИВ В ДВУХКАМЕРНЫХ ЦИКЛОННО-СЛОЕВЫХ ТОПКАХ

В Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси разрабатывается перспективная технология трёхстадийного сжигания местных твёрдых биотоплив в циклонно-слоевых топках, в которых совмещается слоевое сжигание топлива с вихревым дожиганием вынесенных мелких фракций и газообразных горючих продуктов в надслоевом пространстве. Основными достоинствами данной технологии сжигания являются более качественное вихревое смесеобразование летучих и продуктов неполного горения с дутьевым воздухом в компактном топочном объеме, уменьшение коэффициента избытка воздуха (1,15–1,25), снижение механического, химического недожога топлива, эмиссии монооксида углерода (СО) и оксидов азота (NO_x).

В работе представлены результаты экспериментального исследования топочных процессов в лабораторной установке (рис.1), оснащенной циклонно-слоевой топкой с кипящим (КС) слоем ($D = 0,2$ м, мощность $N_{\text{ch}} = 15\text{-}34$ кВт) при сжигании твердых биотоплив различной влажности ($W^p = 10\text{-}40\%$).

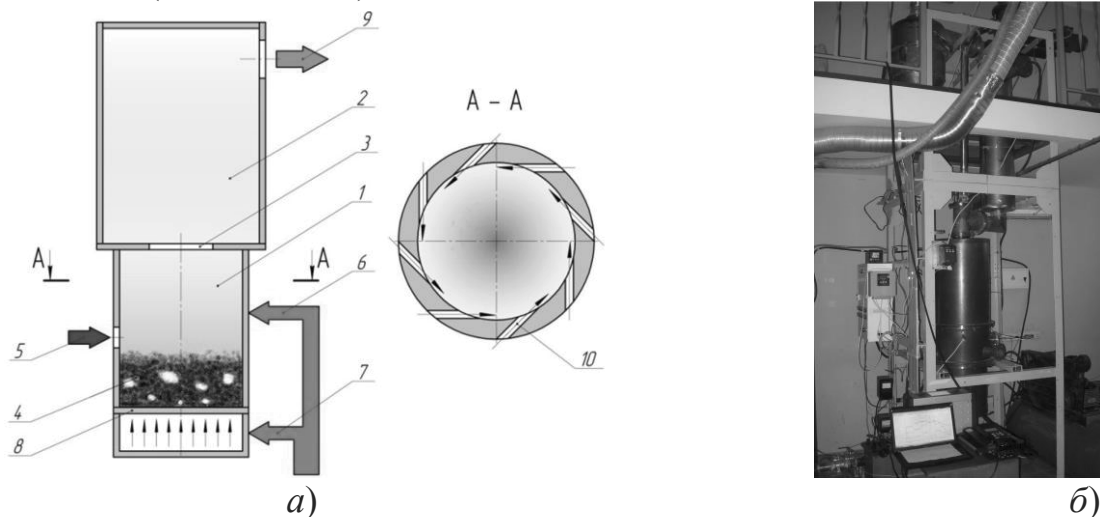


Рис. 1. Принципиальная схема циклонно-слоевой топкой (а) и общий вид экспериментальной установки с циклонно-слоевой топкой БИ-1М (б): 1 – камера сгорания (вихревая камера); 2 – камера догорания; 3 – пережим; 4 – кипящий (плотный) слой; 5 – ввод топлива; 6 – тангенциальный ввод вторичного воздуха; 7 – ввод первичного воздуха; 8 – газораспределительная решетка; 9 – отвод продуктов горения; 10 – сопла ввода вторичного воздуха

Экспериментально исследовано влияние влажности топлива на характер распределения температур и концентраций газовых компонент в циклонно-слоевой топке с кипящим слоем. Установлено, что профили температур в камере сгорания имеют неравномерный характер с максимумом в приосевой области и минимумом на периферии. Для топлив повышенной влажности ($W^p = 40\%$) профиль температуры имеет более равномерный характер из-за снижения доли холодного (30°C) тангенциального дутья и, соответственно, уменьшения охлаждения периферийной области. Установлено, что концентрации газовых компонент (O_2 , CO_2 , CO , CH_4 , H_2) в камере сгорания слабо зависят от влажности и в качественном отношении аналогичны закономерностям для сухих топлив.

Выполнены экспериментальные исследования влияния рабочей влажности биотоплива на закономерности топочного процесса и эмиссию CO и NO_x на выходе из топки. Установлено, что с уменьшением влажности топлива концентрация CO в отходящих газах снижается. Концентрация оксидов азота NO_x при уменьшении влажности, наоборот, несколько возрастает.

Выполнено численное моделирование сжигания влажных топлив в циклонно-слоевой топке с использованием стандартной «к-ε» - модели турбулентности и модели горения Магнуссена. Получено удовлетворительное соответствие результатов моделирования и экспериментальных данных, особенно для топлив повышенной влажности ($W^p = 40\%$). При снижении влажности различие между расчетными и экспериментальными значениями температур и концентраций газов в камере сгорания увеличивается. Температура на выходе топки практически не зависит от влажности топлива.

Попов С.К. (д.т.н.), Коровяковский А.В. (аспирант)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ И ПОВЫШЕНИЕ ЕЕ ЭНЕРГОЭКОНОМИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СТЕН ВАРОЧНОГО БАССЕЙНА.

Энергоэффективность любой теплотехнической установки зависит от разных факторов. Одним из самых важных параметров является видимый удельный расход топлива b , кг/(т продукта). Величина b линейно зависит от $q_{o.c.}$ – теплового потока, передаваемого теплопроводностью через ограждение печи. Достоверный расчет плотности теплового потока $q_{o.c.}$, Вт/м², представляет интерес для получения реальной величины удельного

расхода топлива. Другой немаловажный фактор связан с технико-экономическим показателем агрегата. Длительность рабочей кампании печи является важным параметром, который напрямую зависит от особенностей процессов, происходящих внутри стекловаренной печи, а также от выбора огнеупора и его характеристик. Исследуемым объектом является ванная регенеративная стекловаренная печь производительностью 250 т/сут в системе производства стеклотары, отапливаемая природным газом.

Известные эмпирические зависимости дают значительный разброс значений $\alpha_{\text{нар}}$ – коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции на наружной поверхности ограждения агрегата [1,2,3,4]. Неопределенность в выборе расчетных соотношений для $\alpha_{\text{нар}}$ затрудняет постановку теплотехнического расчета печи и получение адекватного значения расхода топлива. С целью устранения указанной неопределенности выполнено моделирование стекловаренной печи в программной среде Phoenics. Результаты исследования полей температур, плотностей тепловых потоков и $\alpha_{\text{нар}}$ описаны зависимостями числа Нуссельта Nu от числа Рэлея Ra для различных элементов ограждения печи (таблица 1).

Другая проблема, связанная с длительностью рабочей кампании агрегата, может быть изучена используя построенную в программной среде Phoenics модель стекловаренной печи, а также полученные данные по теплообмену на наружной поверхности агрегата. На внутренней поверхности огнеупора в районе границы зеркала стекломассы и отходящих газов возникает высокотемпературная коррозия, которая разрушает боковую ограждающую поверхность за малый период эксплуатации. Для повышения срока службы огнеупора наружную поверхность стекловаренной печи принудительно охлаждают в области возникновения коррозии [5]. Устройство охлаждения состоит из воздухораздающего короба, выполненного по всей длине варочной зоны печи, и дутьевого вентилятора. Рекомендации по выбору параметров обдува представлены в таблице 2, с учетом оптимального энергопотребления установки обдува, согласно [6].

В результате исследования теплообмена на наружной поверхности ванной стекловаренной печи, удалось получить значение удельного расхода газа на 6% меньше базового варианта, за счет более точного расчета теплопотерь в окружающую среду [7]. Рекомендации по выбору параметров охлаждения боковой поверхности позволяют снизить температуру в области коррозии огнеупора на 18%, что приводит к значительному увеличению длительности рабочей кампании агрегата.

Таблица 1.

Боковая стена
 $Nu = 0,488 * Ra^{0,326}$ Свод
 $Nu = 0,465 * Ra^{0,294}$ Под
 $Nu = 0,517 * Ra^{0,271}$

Таблица 2.

Параметры обдува			Без обдува		С обдувом	
Скорость обдува (V, м/с)	Ширина сопла (s, мм)	Расстояние от сопла до поверхности и печи (z, мм)	Температура в районе зеркала стекломассы (t, °С)	Тепловой поток через огнеупор (q, Вт/м ²)	Температура в районе зеркала стекломассы (t, °С)	Тепловой поток через огнеупор (q, Вт/м ²)
30	13	104	1500	3632	1500	5078

Список литературы

1. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981.
2. Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т. 1 / Под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Цветков, Ф.Ф. Задачник по тепломассообмену / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
4. Крейт, Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. – М.: Мир, 1983.
5. Дзюзер В. Я. Граничные условия теплопередачи через кладку стекловаренной печи [Текст] / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий, Е. Б. Садыков // Стекло и керамика. - 2012. - № 5. – С. 28-33.
6. Семенов Б. А. Минимизация удельных расходов воздуха в системах струйного охлаждения огнеупорных ограждений варочного бассейна стекловаренных печей [Текст] / Б. А. Семенов, Н. А. Озеров // Стекло и керамика. - 2015. - № 10. - С. 21-26.
7. Попов, С. К. Расчет теплотерь с наружной поверхности ограждения печи [Текст] / С.К. Попов, А.В. Коровяковский, Э.А. Сериков // Стекло и керамика. – 2019. – № 8. – С. 3–8.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СКАЧКА УПЛОТНЕНИЯ НА АДИАБАТНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ СТЕНКИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНОМ ПОТОКЕ

Во многих прикладных задачах (теплозащита, безмашинное энергоразделение и т.п.) снижение адиабатной температуры стенки относительно температуры торможения приводит к существенному повышению положительного эффекта [1]. Решение данной задачи возможно через использование свойств газокпельных потоков с малой массовой концентрацией (до процента) жидкой фазы. В этом случае жидкая фаза практически не влияет на свойства основного газового потока, при этом сами капли могут охлаждаться до термодинамической температуры потока.

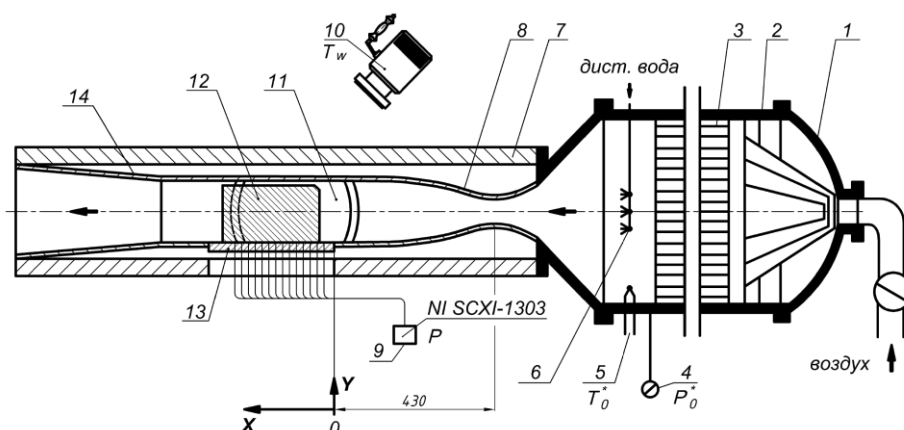


Рис. 1. Схема стенда: 1 – форкамера; 2 – сборка конусов; 3 – хонейкомб; 4, 5 – датчики для измерения давления и температуры торможения; 6 – набор центробежных форсунок; 7 – рабочий канал; 8 – плоское регулируемое сопло; 9 – датчики статического давления и термопары; 10 – ИК-камера; 11 – иллюминатор; 12, 13 – экспериментальная модель на пластине из оргстекла; 14 – диффузор.

Проведена серия экспериментальных измерений темпа охлаждения плоской модели, обтекаемой сверхзвуковым воздушно-капельным потоком на сверхзвуковом аэродинамическом стенде AP-2 [2]. Числа Маха набегающего потока $M=2.0-3.0$. Относительный массовый расход жидкости варьировался в диапазоне 0.05-0.6%. Жидкость (дистиллированная вода) распылялась через центробежные форсунки в воздушный поток в форкамере. Для гарантированного попадания водных капель на стенку модельная пластина устанавливалась в центральной

части канала вдоль направления потока (рис. 1). С целью осаждения капель на стенку был поставлен эксперимент с генератором скачка уплотнения в виде клина, установленного вертикально сбоку перед пластиной.

Работа выполняется в рамках госбюджетной темы АААА-А16-116021110200-5 НИИ механики.

Список литературы

1. **Leontiev A.I., Popovich S.S., Vinogradov U.A., Strongin M.M.** Experimental research of supersonic aerodynamic cooling effect and its application for energy separation efficiency // Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, ИТТС-16. 2018. V. 212244. 8 p.
2. **Попович С.С.** Особенности автоматизации эксперимента и обработки результатов при исследовании теплообмена в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Программная инженерия. 2018. № 1. С. 35–45.

Поярков И.В.^{1,2}

¹ Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет) «МАИ»,
Москва, 125993, Волоколамское шоссе, 4

² Московский государственный университет
пищевых производств (МГУПП),
125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11
p-igor@inbox.ru

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В БИНАРНОЙ СИСТЕМЕ АРГОН-АЗОТ

При исследовании термоэффекта в трехкомпонентных газовых смесях были зарегистрированы нерегулярные колебания температуры в диффузионном аппарате [1], положившие начало явлению массопереноса под действием не только градиента концентрации (диффузия) но и градиента температуры (термодиффузия) и/или второго градиента концентрации (диффузия в многокомпонентных системах). Дальнейшее изучение массопереноса в наиболее простой системе - трехкомпонентных газовых смесях при постоянной температуре, показали, что диффузионный процесс при определенных условиях сменяется конвективным течением, это явление в литературе получило название «double diffusive convection». Как показали исследования, смена режима смещения возможна не только в системах с устойчивой стратификацией плотности, но и в системах с отрицательным градиентом плотности [2], а так же в равновесных системах [3]. Исследований, связанных с проявлением неустойчивости механического равновесия в неизотермических условиях гораздо меньше, причем они соответствуют условию устойчивой стратификации плотности смеси. В связи с этим

представляется актуальным исследовать смену режимов «диффузия – конвекция» в самой простой смеси – бинарной. При этом для получения явления «double diffusive convection» организуются два градиента: градиент концентрации, за счет размещения более плотного компонента над менее плотным, и градиента температуры, вносящие противоположный вклад в отрицательный градиент плотности.

В настоящей работе приведены экспериментальные данные массопереноса в бинарной газовой системе $Ar - N_2$ при наличии градиента температуры, направленного против градиента плотности. Исследования проводились двухколбовым методом, широко применяемым для определения коэффициентов диффузии в широком диапазоне температур и давления [2, 3]. Тяжелый газ Ar , размещался в верхней колбе, находящейся при температуре $283,0 \pm 0,1$ К, а легкий газ N_2 – в нижней, с температурой $343,0 \pm 0,1$ К, колбы имели объем $V_g = V_n = 62,8 \cdot 10^{-6}$ м³, соединялись капилляром радиусом $r = 2,0 \cdot 10^{-3}$ м и высотой $l = 63,9 \cdot 10^{-3}$ м. В качестве сравнения были проведены исследования при температуре обеих колб равной $295,0 \pm 0,1$ К. Экспериментальные значения концентраций соотносились с вычисленными, в предположении диффузионного процесса смешения [2].

Эксперимент показал, что начиная с давления $p \approx 0,5$ МПа наблюдалось существенное отличие опытных данных от теоретические значения концентраций, чем выше давление, чем отличие больше. В этой ситуации можно говорить о наличии свободно-конвективных течений, которые возникают в гравитационно неустойчивой системе, вызванного действием двух противоположно направленных градиентов. Следует отметить, что срыв диффузионного процесса для изотермического и неизотермического смешения наступает при одном и том же давлении, а интенсивность конвективного массопереноса больше при отсутствии градиента температуры.

В заключении можно отметить, что в гравитационно неустойчивой бинарной газовой системе наблюдается как диффузионный процесс, так и массоперенос свойственный «double diffusive convection».

Список литературы

1. **Hopper H.E., Turner J.S.** Double diffusive convection // Journal of fluid mechanics, - 1981. – Vol. 106. – P.413 – 453.
2. **Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Красиков С.А.** Некоторые особенности конвективного теплопереноса в многокомпонентных газовых смесях // ИФЖ. 1996. Т. 69, № 6. С. 977-981
3. **Zhavrin Yu.I., Moldabekova M.S., Poyarkov I.V., Mukamedenkyzy V.** Experimental study of diffusion instability in three component gas mixture without density gradient // Technical physics letters. – 2011. – Vol. 37, № 8. – P. 721-723.

Приймак С.В.

ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»,
Подольск, 142103, Железнодорожная, 24

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕРМОКОНТРОЛЯ АЭС С ВВЭР

Достоверность данных о температуре теплоносителя является одним из основных факторов безопасности АЭС. Важнейшее условие ее обеспечения – адекватный учет качества теплового контакта спая термоэлектрического преобразователя с контролируемым объектом, которое характеризуется показателем его тепловой инерции. Показатель тепловой инерции определяет погрешность измерения температуры и находится в результате обработки отклика термопары на нагрев. Импульсный нагрев и обработка отклика термопары осуществляются с помощью термопарно-диагностического комплекса, испытанного на Нововоронежской АЭС и представленного в работе [1].

В работе приведены методики измерения температуры теплоносителя и ее пульсаций, а также алгоритмы расчета погрешностей [2].

На основе разработанных расчетных моделей теплофизических процессов в системе «термопара-объект» выполнены оценки:

- погрешностей измерения температуры оболочки твэла, вызванной радиационным разогревом спая, в нормальных условиях эксплуатации и при имитации аварийных ситуаций;
- коэффициентов снижения амплитуд пульсаций температуры теплоносителя, воспринимаемых горячим спаем термопары, относительно амплитуд пульсаций, воздействующих на измерительный канал.

Предложена методика экспресс-диагностики качества монтажа термопары в канал термоконтроля, основанная на регистрации излома производной по времени переходной характеристики термопары, предварительно нагретой током, в процессе ее установки в измерительную позицию

Показано, что низкочастотные пульсации температуры теплоносителя, возникающие на входе в ТВС ВВЭР-1000, без искажений могут быть зарегистрированы системой внутриреакторного контроля на выходе из ТВС.

Основу методологии составляет сочетание аналитического моделирования теплообменных процессов в системе «термодатчик-объект термоконтроля» методами математической физики, теории обобщённых функций и теории функций комплексной переменной с последующими экспериментальными исследованиями полученных модельно–расчётных соотношений.

Разработанные методики основаны на применении δ -импульсного токового зондирования термопары в измерительной позиции, поскольку

отклик на такое воздействие, описываемый фундаментальным решением уравнения теплообмена в системе «термопара-объект контроля», является наиболее информативным относительно условий теплообмена. С другой стороны, свёртка фундаментального решения уравнения с его правой частью, описывающей внешнее воздействие на термопару, является рациональным способом получения общего решения, определяющего алгоритм нахождения температурной погрешности.

Постановка задач аналитического моделирования теплообменных процессов в обобщённой форме упрощает применение преобразования Лапласа в промежуточных выкладках, что в сочетании с элементами линейной алгебры и теории вычетов обеспечивает альтернативный способ решения исходного уравнения.

Список литературы

1. Приймак С.В. Диагностика достоверности результатов реакторной термометрии на основе токового нагрева термопар. Приборы и системы. 2017, №8. 42-49.
2. Приймак С.В. Диагностика пульсаций температуры теплоносителя АЭС с ВВЭР/Атомная энергия, т.125, вып. 5, 2018 г.

Прудников А.Г., Мамаев В.К., Северинова В.В., Тарасенко А.Н.
ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,
111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ «ОДНОСТЕННАЯ» МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ВНЕШНЕГО ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИСТЕНОЧНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ «ОБНУЛЕННОГО» СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ СВЕРХДАЛЬНОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МЕТАЕМОГО РЕАКТИВНОГО АППАРАТА

Вихревая механика пограничных течений, вместо мифической тотальной турбулентности, согласно современным опытным данным, имеет дело с вихревым одноярусным пограничным слоем крупных вихрей между двумя спутными потоками, внешним набегающим и внутренним спутным потоком «пунктирного» ламинарного подслоя, имеющими единственный для каждого спутного потока определяемый физический параметр: скорость инжекции объемов своего спутного потока.

Для пристеночного «турбулентного», точнее вихревого погранслоя, первым спутным потоком является пунктирный ламинарный пристеночный подслоя, все параметры которого также определяются

аналитически, включая и все необходимые «тепломассообменные параметры и характеристики. Для сверхдальних высокоскоростных метаемых (бескрылых) реактивных аппаратов наибольший интерес представляет активный пристеночный погранслои тройного обнуления: трения, нагрева и заметности, реализуемый тангенциальным «чешуйчатым вдувом» перегретого пара горючего маршевого сверхдальнего высокоскоростного метаемого аппарата одностенной схемы, параметры которого являются предметом наибольшего интереса.

Такая вихревая модель пограничного слоя любого из шести известных естественных пассивных пограничных течений: свободного, пристеночного, струи, следа, прямого, обратного псевдоскачка, и седьмого активного «обнуленного» трения со своими «бесконстантными» (не полуэмпирическими) аналитическими решениями своих интегродифференциальных уравнений, дает аналитические зависимости классических «констант турбулентности» Прандтля-Толмина от числа Маха основного потока от параметра сдвига скоростей спутных потоков и перегрева объемов заторможенного вихревого слоя, попутно определяя такие ранее известные только как эмпирические, зависимости коэффициентов трения и теплообмена. Наибольший интерес для сверхдальних сверхскоростных метаемых аппаратов представляют решения активного пристеночного пограничного слоя обнуленного сопротивления трения, кинетического нагрева и заметности, результатом этих решений и посвящена предлагаемая работа.

Сравнение структурных параметров вихревого естественного пассивного пристеночного погранслоя обнуленного сопротивления трения показывает возможность использования его не только для решения трех задач обнуления (трения, кинетического нагрева, лазерной незаметности), но и для его использования в качестве рабочего потока гомогенной смеси соосного кормового тандемного ГПВРД, чего нельзя реализовать для пассивного пристеночного погранслоя (ППС) с числом среднего Маха слоя $M_c = 2.9$ при числе Маха полета $M_n = 6$ и можно реализовать для активного ППС нулевого трения при числе Маха активного ППС гомогенной смеси $M_c = 5.9$ сверхдальнего высокоскоростного метаемого аппарата.

Какие уравнения вихревой механики перемежающихся сред (ВМПС) при этом использовались. Классические дифференциальные уравнения механики сплошной среды (МСС) пока не имеют решений для вихревых двусредных клубков постоянной завихренности с внутренней и внешней перемежаемостью коконов двух разных сред от инжектируемых струек двух спутных потоков и тем более не имеют, пока или в принципе, решений для всего многокаскадного вихревого погранслоя. Прикладная часть ВМПС имеет такие газодинамические уравнения с известными скоростями инжекции. Полная система уравнений многосредного

вихревого погранслоя помимо газодинамической системы, имеет ее и систему уравнений появления вероятности каждого каскада. Многофункциональность одностенного слоя определяется перечнем задач, выполняемых этим слоем.

Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б., Сулейкин Е.В.

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
Москва, 129366, Бориса Галушкина 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ПАРЦИАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ЦИАНОВОДОРОДА ПРИ ПОЖАРАХ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Для разработки профилактических противопожарных мероприятий используется моделирование распространения токсичных продуктов горения в объеме рассматриваемых помещений. Математические модели расчета термогазодинамики пожара описывают процесс распространения лишь двух токсичных газов (монооксид углерода, хлороводород), не рассматривая сильный токсикант циановодород. Это связано с отсутствием количественных значений по удельному коэффициенту образования циановодорода и его парциальной плотности в рассматриваемом объеме помещения очага пожара, необходимых для моделирования распространения токсичного газа на объектах энергетики.

В работе выполнен анализ токсичного воздействия циановодорода на людей в момент проведения эвакуации при пожарах на объектах энергетики. Обоснована критическая величина парциальной плотности циановодорода, указанная в нормативных документах, на основе данных, представленных в литературных источниках. Предложен экспериментально-теоретический подход по расчету плотности циановодорода при пожарах на объектах энергетики. Предложенный подход основывается на аналитических формулах для расчета парциальной плотности HCN , в которых коэффициент пропорциональности между плотностью циановодорода и отношением удельного коэффициента образования HCN и низшей теплотой сгорания не зависит от геометрических характеристик исследуемого объекта и площади открытой поверхности горючего материала.

Разработана методика получения экспериментальных данных по удельному коэффициенту образования и парциальной плотности циановодорода на экспериментальной мелкомасштабной установке. Выполнена модификация данной установки для моделирования термогазодинамики пожара с установкой газоаналитического оборудования по измерению концентрации циановодорода.

Проведена серия экспериментов для получения экспериментальных значений вышеуказанных параметров при горении современной кабельной продукции, используемой на объектах энергетики.

Представлены экспериментальные зависимости парциальной плотности циановодорода от среднеобъемной температуры. Показано, что экспериментальная величина парциальной плотности циановодорода достигает критического значения, что обосновывает необходимость рассмотрения HCN в методике расчета времени блокирования путей эвакуации на объектах энергетики.

Разработана методика расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом при пожарах на объектах энергетики с учётом экспериментальных зависимостей парциальной плотности HCN от среднеобъемной температуры без решения уравнения закона сохранения массы циановодорода.

Пузач С.В., Мустафин В.М., Акперов Р.Г.

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
Москва, 129301, Бориса Галушкина, 4
GeneralPK@bk.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЫМООБРАЗУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОВРЕМЕННОЙ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРОВ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Проведен анализ методов проведения огневых испытаний с целью получения исходных данных для моделирования пожара. Рассмотрены математические модели расчета динамики распространения опасных факторов пожара в помещении.

Проведен сравнительный анализ методов определения дымообразующей способности веществ и материалов при их термическом разложении. Показана необходимость создания методики определения дымообразующей способности современной кабельной продукции, используемой на объектах энергетики. Удельный коэффициент дымообразования необходим для моделирования пожара в помещении и, в частности, для расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму.

Предложен новый подход к алгоритму проведения огневых испытаний на определение дымообразующей способности конденсированных веществ и материалов. Показано влияние площади образца, плотности падающего теплового потока и температуры внутри камеры сгорания на значение дымообразующей способности.

Внесены существенные изменения в конструкцию экспериментальной установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов. Установлено средство измерения оптической плотности дыма. Представлены результаты тестовых замеров плотности падающего теплового потока и температуры

нагрева воздуха внутри камеры сгорания на различной удаленности от нагревательного элемента как по вертикали, так и по горизонтали.

Получены значения коэффициента дымообразования при различных режимах горения. Показаны зависимости коэффициента дымообразования от площади образца и от удаленности от нагревательного элемента внутри камеры сгорания.

Представлены результаты серии огневых испытаний современных видов кабельной продукции, используемой на объектах энергетики. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных на различных установках со значениями, приведенными в базе данных типовой пожарной нагрузки.

Огневые испытания кабельной продукции, проведенные на данной экспериментальной установке, показали, что значения дымообразующей способности существенно отличается от значений, получаемых на стандартной установке, описанной в ГОСТ12.1.044. Проведен анализ полученных различий.

Пузина Ю.Ю., Королев П.В., Ячевский И.А., Крюков А.П.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ДВИЖЕНИЮ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ В КАНАЛЕ С МОНОДИСПЕРСНОЙ ЗАСЫПКОЙ

В сверхтекучем гелии процессы тепломассопереноса отличаются от аналогичных явлений в неквантовых жидкостях, включая криогенные, в том числе и в двухфазных системах. На протяжении нескольких лет авторский коллектив исследует поведение сверхтекучего гелия в стесненных условиях, в том числе при образовании паровых пленок, пробок в каналах и др. Одной из особенностей поведения гелия-II в канале с паром является то, что в капилляре определенной длины он движется к нагревателю [1] в отличие от обычных жидкостей [2]. Такое явление было подтверждено экспериментально [3]. При этом в некоторых случаях в опытах реализовывался колебательный режим движения мениска в капилляре. Однако реверсивное движение возможно лишь при достаточно большой длине капилляра: в экспериментах [3] длина капилляра составляла 8 м при внутреннем диаметре капилляра 250 мкм (значение реверсивной длины – 3.6 м).

Как показывает математическая модель стационарных процессов тепломассопереноса при течении гелия в канале [4], использование для создания стесненных условий пористой структуры позволяет существенно уменьшить реверсивную длину. При этом реверсивная длина не зависит от диаметра канала, а определяется структурными характеристиками пористой вставки. В связи с этим для создания стесненных условий была выбрана монодисперсная засыпка, расположенная внутри канала.

Общая схема экспериментального стенда для исследования процессов тепломассопереноса в сверхтекучем гелии, подготовка и методика проведения исследований представлены в [3, 5].

Экспериментальный участок представляет собой U-образную хлоркальциевую трубку ТХ-U-1-100, нижняя часть которой заполнена свободной засыпкой монодисперсных шариков диаметром (280 ± 5) мкм, изготовленных из сплава Pb96%Sb4% по технологии [6]. В один из концов трубки вставлен нагреватель, представляющий собой медный диск диаметром 5 мм, на поверхности которого располагается спиральный нагреватель из нихромовой проволоки диаметром 50 мкм. Этот диск запрессован в пробку из пеноплекса, которая в свою очередь вставляется в верхний патрубок U-образной трубки враспор. Вся сборка дополнительно обрабатывается герметизирующим клеем для предотвращения утечек сверхтекучего гелия.

Экспериментальный участок полностью погружается в объем сверхтекучего гелия. При подаче тепловой нагрузки в канале образуется паровая пробка, которая затем увеличивается в размерах. Пройдя некоторое расстояние от нагревателя, межфазная поверхность, отмеченная стрелкой на рис. 1, останавливается и начинает перемещаться к нагревателю. Не достигнув его, межфазная поверхность опять останавливается и начинает движение от нагревателя. Таким образом, реализуется постоянное колебательное движение сверхтекучего гелия в канале с монодисперсной засыпкой. Амплитуда колебаний составляет ~ 15 мм, а частота колебаний $\sim 0,2$ Гц.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект №19-19-00321).

Список литературы

1. **Королев П.В., Крюков А.П.** Движение сверхтекучего гелия в капилляре с паром при наличии продольного теплового потока // Вестник МЭИ. 2002. № 1. С. 43–46.



Рис. 1. Рабочий участок U-образного канала.

2. **Крюков А.П.** Движение жидкости в канале с паром при наличии продольного теплового потока // Теплофизика высоких температур. 2000. Т. 38. № 6. С. 945—949.
3. **Королев П.В., Крюков А.П., Медников А.Ф.** Экспериментальное исследование движения гелия-II в капилляре при наличии паровой полости вблизи нагревателя // Вестник МЭИ. 2006. № 4. С. 27—33.
4. **Пузина Ю.Ю., Королев П.В., Крюков А.П.** Течение гелия-II в канале с пористой вставкой при безвихревом сверхтекучем движении // Вестник МЭИ, 2017. №4. С. 8–14.
5. **P.V. Korolev, A.P. Kryukov, Yu.Yu. Puzina** Experimental Study of the Boiling of Superfluid Helium (He-II) in a Porous Body // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2017, Vol. 58, No. 4, pp. 679–686.
6. **Ankudinov V. B., Marukhin Yu. A., Ogorodnikov V. P., Ryzhkov V. A.** Technology for Production of Monodisperse Spherical Granules. // Metallurgist 2019, Volume 63, Issue 5–6, pp 651–657.

Пушкарев А.В., Пономарев Д.Е.

¹ Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана
Москва, 105005, 2-я Бауманская ул, 5, стр.1
pushkarev@bmstu.ru

ТЕПЛООБМЕН В КРИОХИРУРГИЧЕСКОМ АППАРАТЕ С ПРОТЯЖЕННЫМ АППЛИКАТОРОМ

В настоящее время фибрилляция предсердий входит в самые частые виды нарушения сердечного ритма и может быть причиной инсульта и сердечной недостаточности. Одним из методов хирургического лечения данной патологии является криохирургическая модификация операции «Лабиринт», заключающаяся в создании непроводящих линий в миокарде с помощью поверхностного замораживания. Методика применения криовоздействия в данном случае носит эмпирический характер «попробовали-получилось-повторили», что может привести к недостижению необходимых параметров воздействия. Для определения рациональных режимов воздействия проведено исследование теплообмена в протяженном аппликаторе, охлаждаемом изнутри потоком кипящего жидкого азота. Проводилось определение температур на поверхности криоаппликатора (без и под тепловой нагрузкой), времени выхода аппарата на режим при контакте с модельной средой, имитирующей биоткань (под тепловой нагрузкой), динамики роста, формы и размеров зоны замораживания. На основании полученных результатов возможно выработать базовые рекомендации для разработки методики дозированного криовоздействия с повышенной точностью [1].

Это позволит дать возможность выбора наиболее рациональных режимов воздействия для лечения фибрилляции предсердий. Исследование выполняется при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-824.2020.2).

Список литературы

1. **Shakurov A.V., Pushkarev A.V., Pushkarev V.A., Tsiganov D.I.** Prerequisites for developing new generation cryosurgical devices (review). *Sovremennye tehnologii v medicine* 2017; 9(2): 178–189, <https://doi.org/10.17691/stm2017.9.2.23>.

Разуванов Н.Г., Лучинкин Н.А.

Объединённый институт высоких температур РАН
125412, Россия, Москва, Ижорская, 13, стр. 2
LuchinkinNA@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МГД И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПОДЪЕМНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ТРУБЕ.

В качестве теплоносителя экспериментальных модулей blankets термоядерного реактора (ТЯР), рассматриваются жидкие металлы (ЖМ), главным образом это литий – свинцовая эвтектика Pb-Li. [1].

Исследование особенностей теплообмена при течении ЖМ в трубах применительно к системам охлаждения ТЯР проводятся на базе ртутного МГД стенда ОИВТ РАН [2].

В ранних исследованиях при опускном течении в обогреваемой трубе [2] обнаружено сильное влияние встречной термогравитационной конвекции (ТГК) на исследуемые характеристики теплообмена.

В настоящее время рассматривается подъемное течение ЖМ в вертикальной трубе в поперечном магнитном поле (рис.1). На стенде зондовыми методами проведены измерения полей температуры и скорости в условиях однородного (двухстороннего) и неоднородного (одностороннего) обогрева как в поперечном сечении трубы, так и по длине участка обогрева. Получены данные по полям осредненной температуры и скорости, распределениям температуры стенки, статистическим пульсационным характеристикам в диапазоне чисел Рейнольдса $7000 \div 90000$, Грасгофа Gr до $1.5 \cdot 10^8$ и числам Гартмана до 550.

При подъемном неизотермическом течении ЖМ также обнаружено существенное влияние ТГК на характеристики теплоотдачи, как в отсутствие, так и при наличии поперечного МП. Неоднородность обогрева приводит к существенным неоднородностям в распределениях температуры на стенках каналов. Наличие ТГК в магнитном поле не приводит к полному подавлению турбулентности в условиях эксперимента, а в некоторых режимах наблюдался рост пульсаций

температуры. При этом числа Нуссельта не снижались с ростом числа Гартмана, оставаясь на уровне турбулентных значений.

Проведено обобщение опытных данных по теплоотдаче, сравниваются и анализируются результаты однородного и неоднородного обогревов (рис.2).

Выполнено также численное моделирование задачи в соответствующих эксперименту условиях.

Обнаруженные в исследовании эффекты, необходимо учитывать в инженерных расчетах при конструировании ЖМ модулей blankets термоядерных реакторов.

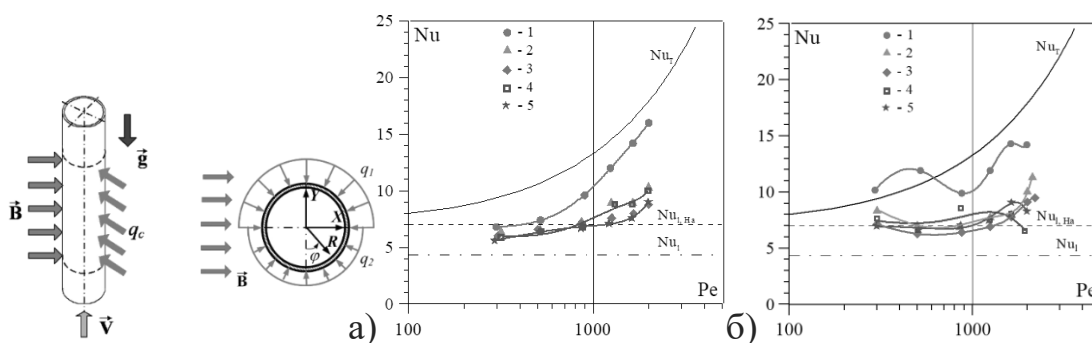


Рис 1. Конфигурация течения и обогрева ЖМ в МП

Рис 2. Зависимость $Nu(Pe)$ подъемного течения в случае однородного обогрева (а) и неоднородного (б); 1 - $Ha = 0$, 2 - 150, 3 - 350, 4 - 450, 5 - 550

Список литературы:

1. C.P.C Wong, J-F. Salavy, Y. Kim, I. Kirillov, E. Rajendra Kumar, N.B. Morley. Overview of liquid metal TBM concepts and programs. Fusion Engineering Design. 2008. //V. 83. P. 850-857.
2. И.А. Мельников, Н.Г. Разуванов, В.Г. Свиридов, Е.В. Свиридов, Шестаков А.А. Исследование теплообмена жидкого металла при течении в вертикальной трубе в поперечном магнитном поле. Теплоэнергетика, 2012.

Решетников А.В., Скоков В.Н., Капитунов О.А.

Институт теплофизики УрО РАН
Екатеринбург, 620016, Амундсена 107а
reshav@itp.uran.ru

ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ПО ИСТЕЧЕНИЮ ПЕРЕГРЕТЫХ ЖИДКОСТЕЙ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА

Интерес, проявляемый к процессу распада струй жидкости, обусловлен созданием и модернизацией различных аппаратов для распыления жидкостей. Накопление знаний по распылу различных веществ позволило создать многочисленные устройства, которые находят широкое применение, как в повседневной жизни, так и в различных отраслях техники. Во многих устройствах (струйный принтер, пожарная машина нового поколения, двигатели...) используются перегретые жидкости, которые являются альтернативой холодным жидкостям, для мелкодисперсного распыления веществ и топлив. Однако до сих пор остаются открытыми вопросы о механизмах распада и устойчивости течения струй.

Наш подход к анализу и объяснению экспериментальных данных по истечению вскипающих жидкостей основан на представлениях о метастабильных фазовых состояниях, на знании кинетики парообразования при различных степенях перегрева в метастабильной жидкости и модели взрывного вскипания [1-4]. Проведены опыты по истечению вскипающего этанола при различных скоростях вращения завихрителя: 500, 1000, 1800 и 3000 об/мин. Определена эволюция формы струи этанола с ростом температуры. В частности, найдены зависимости угла раскрытия струи вскипающего этанола от температуры при различных скоростях вращения потока. Угол раскрытия струи позволяет получить важную информацию не только о различных факторах (геометрия сопла, степень перегрева...), оказывающих влияние на процесс истечения, но также может служить инструментом для поиска переходных режимов кипения и переходов в поведении струи. Получена подробная карта поведения закрученной струи вскипающего этанола при истечении через каналы различной геометрии (круг, прямоугольник, треугольник) с варьируемыми геометрическими условиями за выходом из канала в широкой области начальных состояний вещества, включая область взрывного вскипания и окрестность термодинамической критической точки этанола. Проведено сопоставление между режимами вскипания в перегретом этаноле и формой и структурными особенностями закрученных струй вскипающего этанола. Найдены условия проявления полного развала струи перегретого этанола при различных скоростях закрутки потока. Получены новые экспериментальные данные по совместному действию закрутки потока и интенсивных фазовых

превращений на распыление жидкостей. Выделены температурные границы предпочтительного действия одного из факторов. Показана возможность эффективного управления распылом жидкости. Проведены измерения флуктуаций в закрученной струе вскипающего этанола. По полученным данным определялся спектр мощности флуктуаций и их функция распределения. Найдены $1/f$ -флуктуации в переходных режимах вскипания и в условиях нутации прецессирующей струи при малых перегревах жидкостей в отсутствии вращения и для скоростей вращения потока 500 и 1000 об/мин. Наличие $1/f$ -флуктуаций в системе означает, что значительная часть энергии флуктуаций сосредоточена в низкочастотных колебаниях, и указывает на возможность крупномасштабных катастрофических выбросов.

Поскольку режимы вскипания в сильно перегретых жидкостях имеют термодинамическую определенность, то обобщение результатов по истечению закрученной струи перегретого этанола проведено с применением методов термодинамического подобия.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 18-08-00742-а, 19-08-00091-а).

Список литературы

1. Метастабильная жидкость / В.П. Скрипов – М.: Наука 1972. 312 с.
2. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скрипов В.П. Струи вскипающих жидкостей // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 3. С. 125–132.
3. Reshetnikov A. V., Mazheiko N.A., Skokov V.N., Koverda V.P. Hydrodynamic response to explosive boiling-up in a jet of superheated water // Int. J. Heat and Mass Transf. 2015. V. 85. P. 965–970.
4. Reshetnikov A. V., Busov K. A., Mazheiko N.A., Skokov V.N. Jet of boiling-up water injected by a short slit nozzle // Int. J. Heat and Mass Transf. 2019. V. 130. P. 523–531.

Рогалев А.Н., Киндра В.О., Зонов А.С., Комаров И.И.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
kindra.vladimir@yandex.ru

РАЗРАБОТКА СХЕМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА

Перспективным направлением развития энергетической отрасли является переход на кислородно-топливные энергетические комплексы с нулевыми выбросами вредных веществ [1]. В частности, широкую известность получил цикл Аллама, ключевым элементом которого

является многопоточный регенеративный теплообменный аппарат, работающий при значительном перепаде давлений и температур рабочих сред [2]. От количества теплоты, утилизируемой в данном теплообменнике, во многом зависит уровень эффективности всего энергетического комплекса.

По результатам математического моделирования установлено, что тепловая мощность многопоточного регенератора в 2,3 раза превышает отпускаемую электрическую мощность цикла Аллама. Анализ вариантов конструктивного исполнения многопоточного теплообменника с тепловой мощностью свыше 500 МВт позволил сделать вывод о целесообразности его выполнения в виде пяти теплообменников пластинчатого типа. На основе термодинамического анализа сформулировано правило для выбора последовательности взаимодействия холодных и горячих потоков регенератора цикла Аллама, обеспечивающее достижение максимальной тепловой мощности системы, согласно которому в первую очередь необходимо охлаждать горячие потоки с минимальной температурой.

Для снижения площади дорогостоящей поверхности нагрева многопоточного высокотемпературного теплообменника расчетным способом оценивался теплогидравлический эффект от установки на пластинах различных турбулизаторов потока. С использованием метода численного моделирования в программной среде Ansys CFX проведено исследование протекающих теплообменных процессов. Выявлено, что установка поперечных ребер под углом 45° к потоку в каналах квадратного

поперечного сечения приводит к повышению числа Нуссельта примерно в 2 раза в диапазоне чисел Рейнольдса от 10^4 до 10^5 за счет интенсивного перемешивания

течений в области пристеночного слоя и ядра потока (рис. 1).

Также установлено, что оптимальный шаг размещения поперечных ребер, установленных под углом 45° к потоку в каналах квадратного поперечного сечения, равен 6 мм. В свою очередь, отклонение шага на 1 мм приводит к снижению числа Нуссельта на 1,5-3,8%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-70159\19.

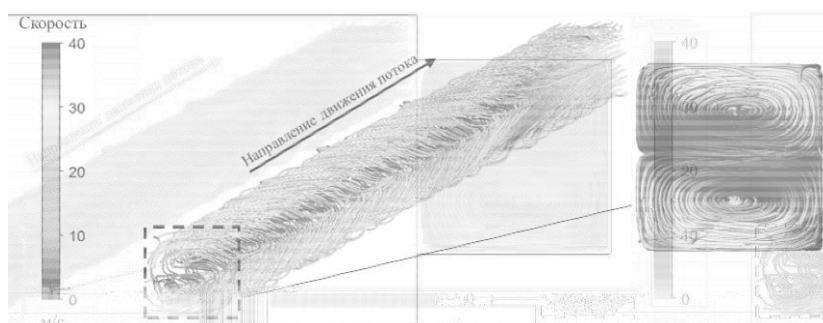


Рис. 1. Линии тока в оребренном канале квадратного поперечного сечения.

Список литературы

1. Рогалев А.Н., Рогалев Н.Д., Киндра В.О., Зонов А.С., Махмутов Б.А. Исследование экологически безопасных энергетических комплексов с кислородным сжиганием топлива // Новое в российской электроэнергетике. 2019. № 8. С. 6—25.
2. Allam R.J., Palmer M.R., Brown Jr.G., Fetvedt J., Freed D., Nomoto H., Okita N., Jones Jr.C. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide // Energy Procedia. 2013. Т. 37. С. 1135—1149.

Рогалев А.Н., Киндра В.О., Осипов С.К., Махмутов Б.А.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
kindra.vladimir@yandex.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАТЕНЯЮЩИХ РЕБЕР НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СТРУЙНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА

Перспективным направлением развития энергетической отрасли является переход с традиционных видов теплоносителей на сверхкритический диоксид углерода [1]. Углекислый газ обладает рядом преимуществ: выгодное положение критической точки, высокая плотность и низкая вязкость. При разработке систем охлаждения газовых турбин на сверхкритическом диоксиде углерода необходимо учитывать перечисленные физические особенности нового теплоносителя.

В частности, высокая плотность и низкая вязкость хладагента в совокупности определяют значительные массовые расходы через отверстия при струйном охлаждении. Установка затеняющих ребер на стенках полого пера со стороны спинки и корыта лопатки позволит достичь не только требуемого гидравлического сопротивления, но и повысить интенсивность теплообмена [2].

Объектом настоящих исследований являлась упрощенная модель дефлектора, представляющая собой две полые конструкции, соединенные между собой отверстиями для перетока хладагента (рис. 1). За отверстиями по ходу движения потока располагались ребра различных геометрических параметров и формы.

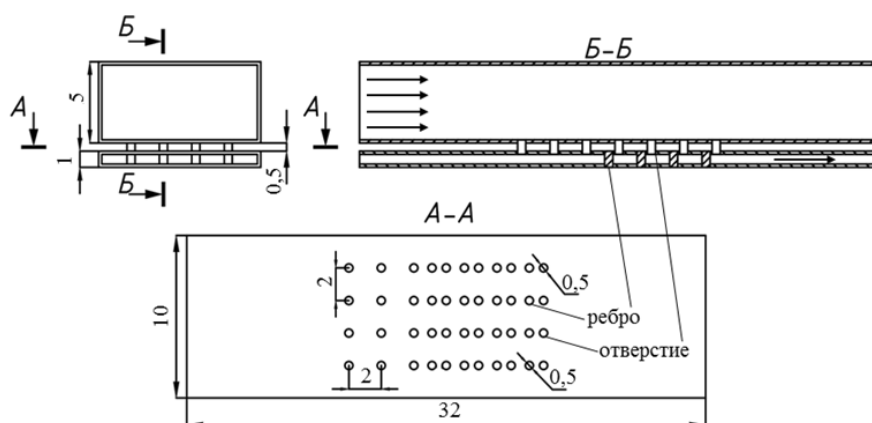


Рис. 1. Геометрические характеристики исследуемой модели охлаждаемого канала.

С использованием метода численного моделирования в программной среде Ansys CFX установлено, что переход с овальной на круглую форму поперечного сечения затеняющих ребер сопровождается ростом гидравлического сопротивления канала на 20-28% и среднего значения числа Нуссельта в канале на 8-25%. Исследование влияния места расположения цилиндрических ребер относительно отверстий струйного охлаждения позволили установить, что для достижения максимальной интенсификации теплообмена отношение расстояния между отверстием в дефлекторе и затеняющим ребром к диаметру отверстия должно равняться 0,25.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (проект № FSWF-2020-0020).

Список литературы

1. **Dostal V., Hejzlar P., Driscoll M.J.** The supercritical carbon dioxide power cycle: comparison to other advanced power cycles // Nuclear technology. 2006. Т. 154. № 3. С. 283—301.
2. Патент на изобретение РФ 2663966. Охлаждаемая лопатка соплового аппарата газовой турбины. Шевченко И.В., Рогалев Н.Д., Рогалев А.Н., Вегера А.Н. 2017.
3. **Киндра В.О., Осипов С.К., Егоров А.А., Рогалев А.Н., Шевченко И.В.** Исследование и разработка штырьково-луночного интенсификатора теплоотдачи для высокоэффективных теплообменных устройств // Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 9. С. 76—89.

Русин С.П

Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А
sprusin@yandex.ru

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ИСТИННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НЕПРОЗРАЧНОГО ОБЪЕКТА В ПРИСУТСТВИИ ПОТОКОВ ПАДАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Термодинамическая (истинная) температура является важным параметром, который определяет состояние объекта, как в природе, так и в технике. Так, например, нарушение режима функционирования энергетического оборудования, как правило, начинается с повышения температуры его эксплуатации выше допустимой. Этот параметр также важен при диагностировании и лечении различных заболеваний в медицине. Однако, не всегда возможно осуществить измерения истинной температуры контактными методами.

Бесконтактные методы с помощью термометров (пирометров) излучения используются в том случае, когда контакт с объектом измерения, либо невозможен, либо нежелателен. Например: объект движется; находится на значительном расстоянии; необходимо одновременно зарегистрировать поле температур объекта; контактный датчик не может зарегистрировать изменение температуры с требуемой точностью в силу своей инерционности; объект опасен при контакте (находится под высоким электрическим и/или магнитном напряжением, либо химически или биологически агрессивен, радиоактивен) и т.п.

В данном сообщении обсуждаются методы оценки истинной температуры в присутствии падающих потоков излучения в оптически прозрачной среде для случая, когда все тела, излучающие друг на друга, имеют одну и ту же температуру.

Рассматриваются также способы учета отражённого излучения при определении истинной температуры.

Рютин С.Б., Скрипов П.В.
Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107А
pavel-skripov@bk.ru

ТЕПЛОПЕРЕНОС ОДНО- И ДВУХКОМПОНЕНТНЫМИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ФЛЮИДАМИ В УСЛОВИЯХ МОЩНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

Принципиальной задачей производства электроэнергии в ядерной энергетике является исключение аварийных ситуаций. В полной мере это относится и к разрабатываемым энергоблокам со сверхкритическим давлением теплоносителя. В теплофизическом плане, учитывая высокие значения энергосодержания топлива и скорости развития процессов в активной зоне, задача заключается в исключении возможности «срыва» условий теплообмена в режим ухудшенной теплоотдачи (heat transfer deterioration, НТД) [1]. Режим НТД, обнаруженный более полувека назад, продолжает оставаться препятствием для применения сверхкритических флюидов (СКФ) в процессах, допускающих мощное тепловыделение. В этой связи, выяснение механизмов, ответственных за немонотонность изменения коэффициента теплоотдачи при повышении тепловой нагрузки, является фундаментальной научной задачей. Ее решение предполагает исследование переноса тепла сверхкритическими теплоносителями (в первую очередь, водой) в условиях, далеких от равновесия, и выяснение резервов их возможностей в нештатных режимах работы оборудования.

Для уточнения природы НТД, как сугубо нестационарного явления, целесообразно принять во внимание особенности теплообмена, сосредоточенного во времени и в пространстве. Речь идет о переносе тепла в пограничном слое СКФ при мощном локальном тепловыделении. В этой связи, нами были получены результаты для системы «зонд/СКФ» в рамках импульсной методики [2]. Методика основана на гибком регулировании мощности тепловыделения с контролем температуры «стенки» в микросекундном масштабе времени. Результаты дают подробную информацию о теплопереносе в условиях преобладания механизма тепловой проводимости. Этот механизм остается за кадром при осуществлении исследований в стационарном режиме и на элементах контура сравнительно большого размера.

Постановка опытов состояла в быстром изобарном переводе жидкости в область сверхкритических температур в широком диапазоне сверхкритических давлений, от 1 до $(3\div 7)p_c$. При изменении в серии последовательных импульсов внешнего параметра (в нашем случае, давления и скорости пересечения окрестности критической температуры) были отслежены картины теплопереноса, связанные с изменением

параметра, при до- и сверхкритических температурах. Важно, что величина энергии, вкачанной в систему зонд/вещество, была одинаковой для всей серии. Характерное время нагрева составляло единицы-десятки миллисекунд, что соответствовало толщине прогретого слоя в единицы микрометров по порядку величины. Пространственно-временной масштаб опыта позволяет практически исключить из обсуждения влияние эффектов гравитации и конвективной неустойчивости, являющихся «бичом» измерений теплопроводности вблизи критической точки. Объектами изучения служили общепринятые теплоносители, а также растворы, включая ограниченно совместимые системы с нижней критической температурой растворения. Полученные результаты нестационарных опытов целесообразно учитывать при проектировании промышленных установок, рабочим телом которых является сверхкритическая среда, и эксплуатация которых не исключает возможность мощных локальных тепловыделений. Принимая во внимание общую тенденцию к интенсификации технологических процессов, знание картины нестационарного теплопереноса может оказаться востребованным для широкого круга сверхкритических флюидных технологий [3].

Список литературы

1. Теплообмен и сопротивление в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя: итоги научных исследований и практические рекомендации / В.А. Курганов, Ю.А. Зейгарник, Г.Г. Яньков, И.В. Маслакова. М.: ОИВТ РАН, 2018. 304 с.
2. **Rutin S. B., Yampol'skiy A. D., & Skripov P. V.** Heat transfer in supercritical fluids. Going to microscale times and sizes, L. Chen, & Y. Iwamoto (Eds.), 2017. *Advanced Applications of Supercritical Fluids in Energy Systems* (pp. 271-291). Hershey, PA: IGI Global.
3. Сверхкритические флюидные технологии. Экономическая целесообразность / Ф.М. Гумеров. Казань: АН РТ, 2019. 440 с.

Рябов Г. А.¹, Фоломеев О. М.¹

1 ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт (ОАО «ВТИ»), Москва, 115280, Автозаводская, 14

СЕПАРАЦИЯ ЧАСТИЦ В ЦИКЛОНАХ УСТАНОВОК С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Установки с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) получили широкое распространение в энергетике, нефтехимии, производстве алюминия (обжиг глинозема) и других секторах промышленности. Технология ЦКС характеризуется относительно высокими скоростями в реакторе, превышающих скорость витания средних по размеру частиц, и наличием сепараторов (в основном – циклонного типа) с системой возврата уловленных частиц в реактор. За счет этого обеспечивается длительное время пребывания частиц в реакционной зоне, высокая кратность циркуляции, стабильная и относительно низкая температурой в реакторе. Фактически именно КПД улавливания в циклоне напрямую определяет кратность циркуляции и расход циркулирующих частиц и их характерный размер. При высоком КПД уловителей (порядка 99,5 %) изменение КПД всего на 0,1 % увеличивает циркуляцию в 1,2 раза. Важным является не только общая эффективность улавливания, но и фракционный КПД. Высокий фракционный КПД для мелких частиц позволяет существенно снизить размер циркулирующих частиц, тем самым увеличить расход частиц, концентрацию их в реакторе и кондуктивную составляющую теплообмена в котлах с ЦКС. В схемах котлов ЦКС наибольшее распространение получили высокотемпературные циклоны. Для крупных котлов они имеют диаметр до 10 и выполняются футерованными. Некоторые котлы снабжены охлаждаемыми паром циклонами, причем поверхность труб циклона защищена керамической обмазкой. Компания "Сумитомо-Фостер-Уиллер» предложила, так называемый "компакт-дизайн", который предусматривает наличие восьмиугольного охлаждаемого циклона с установкой завихрителей в выхлопном патрубке. Многочисленные исследования выполнены в последнее время в Китае, которые позволили создать собственную конструкцию высокоэффективных сепараторов и котлов с ЦКС [1].

В докладе рассмотрены вопросы современного состояния разработок и методов расчета циклонов. Следует отметить, что многие специалисты высказывали сомнение в возможности достижения КПД более 90 % в высокотемпературных циклонных аппаратах большого диаметра. Причиной этого были традиционные знания об улавливании мелких частиц, поступающих с потоком газа в небольших концентрациях

(порядка 10 г/м^3). В топках с ЦКС средний размер частиц, поступающих в золоуловитель, составляет $170 \div 300 \text{ мкм}$, а запыленность потока достигает 10 кг/м^3 . При этом полидисперсность невелика, так как во многом определяется собственно возможностями уловителя.

Приведено краткое описание установок и результаты собственных исследований сепарации частиц в циклонах. Они проведены для частиц с различными свойствами (размеры, истинная плотность) в широком диапазоне скоростей газов и запыленностей на входе в циклоны. Сопротивление циклона при движении потока газа с высокой запыленностью существенно снижается по сравнению с незапыленным потоком. Обобщены данные наших и зарубежных исследований и предложена зависимость поправки на массовую концентрацию частиц. Рассмотрены вопросы повышения фракционной эффективности улавливания за установки выхлопного патрубка эксцентрично оси циклона [2]. Применение такого решения на стендовой установке существенно увеличило эффективность улавливания в циклоне диаметром $0,3 \text{ м}$ и позволило получить общий КПД улавливания на уровне $99,99\%$. Столь высокий КПД связан как с относительно крупными частицами, так и с высокой их концентрацией [3]. Приведены опытные данные о влиянии запыленности на эффективность улавливания в виде зависимости относительного уноса частиц (1-КПД) от массовой концентрации частиц на входе в циклон. Унос заметно снижается при росте концентрации, так как мелкие частицы увлекаются более крупными к стенке циклона.

Список литературы

1. **Yue, G.** The Formation of the CFB Design Theory and its Practice in China [Text] / Y. Guangx// Proc. of the 22nd Int. Conf. on FBC, June 14-17, 2015.-Finland,Turku, 2015. - pp.12 – 22.
2. **Krohmer, B.** Operating experience with measures for improvement of cyclone removal efficiency [Text] / B. Krohmer, B. Roper, J. Seeber, G.-N. Stamatelopoulos // Proc. of 19-th Int. Conf. on FBC, May 21 – 24, 2006, Vienna, Austria.
3. **Knowlton, T.** Cyclone Systems in Circulating Fluidized Beds// Proc. of CFB12, May 24-26, 2017, Krakow, Poland, pp 47 - 64.

Рябов Г. А., Фоломеев О. М.

ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт (ОАО «ВТИ»),
Москва, 115280, Автозаводская, 14

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ В ОПУСКНЫХ СИСТЕМАХ И ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЗАТВОРАХ КОТЛОВ С ЦКС

Котлы с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) получили широкое распространение в энергетике. Хорошо известны основные преимущества технологии ЦКС, которые определяются длительным временем пребывания частиц в реакционной зоне за счет высокой кратности циркуляции, стабильной и относительно низкой температурой в топке при ступенчатой подаче воздуха, оптимальной температурой для связывания оксидов серы известняком. Ключевым элементом этих котлов являются системы возврата уловленного в сепараторах золы (циклонах) материала обратно в топку. Эти системы состоят из опускных стояков, снабженных в нижней части пневматическими клапанами для транспорта материала из зоны низкого (атмосферного) давления в циклоне в зону повышенного давления в топке. Пневматические клапаны работают по принципу псевдооживленных затворов, причем запирающую функцию затворов выполняет подъемный участок с наклонной течкой возврата в топку (петлевой затвор или J-клапан) или горизонтальный участок, соединяющий сток с топкой (L-клапан). Опускное движение в стояке может происходить в режиме движущегося вниз плотного слоя или в переходном режиме, при большом расходе проскоку оживающего агента (газ, пар, воздух) в стояк возможен и режим с пузырьковым оживлением, который может приводить к проскоку воздуха в циклон. Границы режимов зависят от скорости скольжения (суммы скоростей материала и газа с разными знаками направления движения). Если скорость скольжения положительна (положительное направление – вниз), то движение происходит в плотном слое, если отрицательно – то в переходном режиме, а при большом значении этой скорости – в режиме пузырькового слоя.

Скорость скольжения частиц при опускном движении определяется как сумма скорости твердых частиц и газа. Однако, определить скорость скольжения довольно трудно, если не знать долю воздуха, поступающего в стояк (стояк L-клапана в том числе), от общего расхода воздуха, поданного в нижнюю часть стояка. Известно, что значительная часть воздуха уходит с потоком материала в подъемную часть затвора или в горизонтальную часть L-клапана [1, 2]. Нами выполнен анализ влияния свойств частиц и режимных параметров и предложены зависимости для расчетной оценки скорости скольжения по измеренному градиенту

давлений [3]. В настоящей работе дано уточнение этих зависимостей. Для оценок доли газа, поступающего в стояк в режиме движения в плотном опускном слое, проведены экспериментальные исследования с использованием метода газовых меток. Дано краткое описание установки и методики исследования. В качестве газовой метки использовался углекислый газ от баллонов. Исследования проведены в диапазоне чисел псевдооживления от 1 до 4. При больших числах псевдооживления газовые метки не применялись, а скорость скольжения в условиях петлевого затвора определялась по данным о градиенте давлений. Приведены результаты экспериментов и дано их сравнение с известными зарубежными данными, например [4]. При подаче воздуха под стояк петлевого затвора со скоростью менее 2 скоростей минимального оживления в подъемную часть петлевого затвора поступает почти весь воздух. При скорости более четырех скоростей минимального оживления уже почти половина воздуха поступает в стояк. Режим движения в плотном слое в стояке происходит при подаче воздуха до примерно двух скоростей псевдооживления, переходному режиму соответствует подача воздуха в стояк со скоростью 2 – 5 скоростей минимального псевдооживления, далее наступает режим движения в полностью оживленном состоянии. Результаты работы могут быть использованы для проектирования и наладки аппаратов с циркулирующим кипящим слоем, включая системы со связанными реакторами для полигенерирующих систем и химических циклов сжигания и газификации топлив.

Список литературы

1. **T. M. Knowlton** / Non-mechanical solid feed and recycle devices circulating fluidized beds// 3-rd Int. Conf. on CFB Technology, Pergamon Press, 1988.
2. **Yao, X.** Investigation on the hydrodynamic properties in the external loop of circulating fluidized bed with loop seal / X. Yao, T. Wang, H. Yang, H. Zhang, Q. Liu, J. Lu, G. Yue // Proc. of the 10-th Int. Conf. on circulating fluidized bed technology, CFB-10, Sunriver, Oregon, USA, May 1 - 5, 2011.
3. **Рябов, Г. А.** Методика расчета показателей псевдооживления в системах возврата материала аппаратов с циркулирующим кипящим слоем/Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев // Известия РАН Энергетика.– 2014. – № 5.
4. **Yazdanpanah, M.** Gas tracer study in a non mechanical L-valve/M. Yazdanpanah, A. Hoteit, A. Forret, T. Gauthier, A. Delebarre//Proc. of the 10-th Int. Conf. on circulating fluidized bed technology, CFB-10, Sunriver, Oregon, USA, May 1 - 5, 2011.

*Ряжских В.И., Коновалов Д.А., Кожухов Н.Н., Ряжских А.В.,
Николенко А.В., Портнов В.В.*

Воронежский государственный технический университет «ВГТУ»,
Воронеж, 394026, Московский проспект, 14
dmikonovalov@yandex.ru

НАПОРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ НЬЮТОНОВСКОЙ СРЕДЫ В ПРИБЛИЖЕНИИ ДАРСИ-БРИНКМАНА ЧЕРЕЗ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ПОРИСТЫЙ КАНАЛ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ С ОРТОТРОПНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

Миниатюризация современных энергетических систем требует разработки и создания высокоэффективных сверхкомпактных устройств, обеспечивающих стабильный тепловой режим. Уже на сегодняшний день в современных установках тепловыделение достигает 400 Вт/см^2 , а в разрабатываемых - около 1000 Вт/см^2 . Особенно остро проблема стоит при разработке телекоммуникационного оборудования (системы связи, серверы), элементов микропроцессорной техники (процессоры), мобильных энергетических установок.

Одним из перспективных направлений интенсификации теплообмена в пористых средах является специальным образом подобранная архитектура пористой матрицы [1]. Гидравлические потери в этом случае могут быть существенны и снивелировать интенсифицирующий эффект анизотропии за счет дополнительных энергетических затрат на преодоление сопротивления вязкостного трения. Поэтому необходима оценка гидродинамической обстановки в анизотропном пористом теле [2]. Для этого сформулирована на основе модели Дарси-Бринкмана задача фильтрации вязкой несжимаемой жидкости при ее ламинарном вынужденном течении под действием постоянного градиента давления в пористом прямоугольном канале с ортотропной анизотропией в линейном приближении однонаправленного аксиального движения [3]:

$$\bar{g} \frac{\partial g_y}{\partial y} = -\frac{\varepsilon}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_f}{\rho_f} \left(\frac{\partial^2 g_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g_y}{\partial z^2} \right) - \mu_f K_{22}^{-1} g_y; \quad (1)$$

с соответствующими граничными условиями

$$g(x, 0, z) = \bar{g}; \quad (2)$$

$$g_y(x, y, 0) = g_y(x, y, h_z) = g_y(0, y, z) = g_y(h_x, y, z) = 0, \quad (3)$$

где x, y, z - локальные 3D координаты; g_y - компонента скорости течения ньютоновской среды; ε - пористость; ρ_f, μ_f - плотность и динамическая

вязкость потока; h_x, h_z - геометрические характеристики прямоугольного сечения канала; \bar{v} - среднеинтегральная скорость течения ньютоновской среды в пористом канале; K_{22}^{-1} - элемент ортотропного анизотропного тензора проницаемости.

Получено аналитическое решение системы (1) – (3) методом последовательного применения интегральных преобразований Лапласа и Фурье. Анализ результатов вычислительного эксперимента показал существенную зависимость сопротивления вязкостного трения от архитектуры анизотропного пористого тела.

Работа выполнена в рамках конкурсной заявки 2020 г. РФФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» по теме «Интенсификация теплообмена на основе адаптированных структур анизотропных пористых сред для обеспечения термического режима энергонасыщенных рельефных поверхностей», №20-19-00203.

Список литературы

1. **Mahajan A., Nandal R.** Anisotropic porous penetrative convection for a local thermal non-equilibrium model with Brinkman effects // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2017. – v. 115. – pp. 235 – 250.
2. **Nield D.A., Bejan A.** Convection in porous media. – NY: Springer Vorlag, 2006. – 654 p.
3. Analytical solution to the problem of convective heat transfer in a porous rectangular channel for thermal boundary conditions of the second genus / D.A. Kononov, V.I. Ryazhskikh, A.V. Ryazhskikh, A.A. Boger, S.V. Dakhin // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS), 2017, vol. 10, no. 3, pp. 40-53.

*Ряжских В.И., Коновалов Д.А., Кожухов Н.Н., Ряжских А.В.,
Николенко А.В., Трошин А.Ю.*

Воронежский государственный технический университет «ВГТУ»,
Воронеж, 394026, Московский проспект, 14
dmikononov@yandex.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ, ЗАПОЛНЕННОМ АНИЗОТРОПНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ

Современные энергонасыщенные технические системы характеризуются конструктивной компактностью. Развитие новых технологий по их созданию ведет к увеличению удельного

тепловыделения. Если несколько лет назад требуемый максимальный теплосъем в таких устройствах составлял до 100 Вт/см^2 , то в настоящее время 400 Вт/см^2 , а в перспективе ближайших трех лет - до 1000 Вт/см^2 . В связи с этим, особенно остро стоит проблема интенсификации теплообмена. Одним из перспективных направлений интенсификации является использование пористых сред с анизотропной структурой матрицы [1]. Развитие технологий получения материалов из различного вида сеток и технологий 3D-печати позволило реализовать изготовление слоистых пористых структур, а отсутствие единого подхода к теоретическому описанию процессов гидродинамики и теплообмена, инициировать ряд экспериментальных исследований [2]. Однако до сих пор не раскрыты основные закономерности процессов в анизотропных пористых средах, а корректность дальнейшего использования массива экспериментальных данных для восстановления структуры соответствующей заданным физическим свойствам, остается не решенной проблемой [3].

Для исследования гидродинамики в анизотропной пористой среде, представляющей из себя прямоугольную область [4], использована система уравнений Бринкмана и неразрывности. Рассмотрен частный случай анизотропной пористой среды – ортотропная пористая среда, которая

моделировалась с использованием тензора проницаемости. Причем значение проницаемости в двух направлениях отличалось на три порядка (по потоку меньшее значение). Решение рассмотрено для разных углов направления проницаемости относительно глобальной системы координат. Зависимость гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса представлена на рис. 1. Показано, что наименьшим сопротивлением из рассмотренных вариантов ортотропной среды обладает структура с углом направления 60° .

Работа выполнена в рамках конкурсной заявки 2020 г. РФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» по теме «Интенсификация теплообмена на основе адаптированных структур

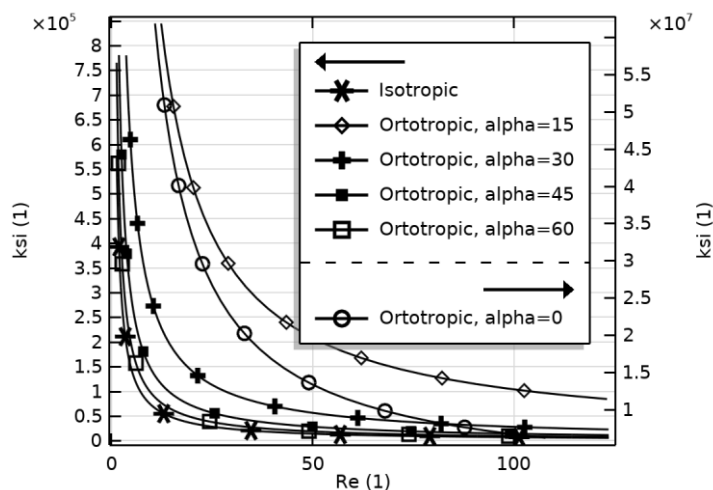


Рис. 1. Зависимость сопротивления от числа Рейнольдса

анизотропных пористых сред для обеспечения термического режима энергонасыщенных рельефных поверхностей», № 20-19-00203.

Список литературы

1. **Mahajan A., Nandal R.** Anisotropic porous penetrative convection for a local thermal non-equilibrium model with Brinkman effects // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2017. – v. 115. – pp. 235 – 250.
2. **Ф.В. Пелевин** Теплообмен в металлических сетчатых материалах при межканальной транспирации и двумерном межсеточном движении теплоносителя // Теплофизика высоких температур. Т. 56, №2, 2018, с. 219-228.
3. **Mujeebu M.A., Abdullah M.Z., Abu Bakar M.Z., Mohamed A.A., Abdullah M.K.** Applications of porous media combustion technology – A review // Applied Energy. – 2009. – v. 86. – N10. – pp. 1365 – 1375.
4. Гидродинамика и теплообмен при ламинарном течении ньютоновского теплоносителя в пористом анизотропном плоском канале при граничных условиях второго рода/ В.И. Рязских, Д.А. Коновалов, И.Г. Дроздов, А.В. Николенко// Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: тр. XXII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. – М.: «Шанс», 2019. С. 220-222.

Рязанцев В.А., Забилов А.Р., Виноградов М.М., Ягов В.В
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
zabirov.arslan@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕЛ В НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

Главной задачей представленной работы является выявление механизмов особого высокоинтенсивного режима кипения при пленочном кипении недогретых жидкостей. Этот режим был представлен учеными из Великобритании (Г. Хьюитт, Д. Кеннинг 1986-1990 [1]), которые назвали его как микро-пузырьковое кипение. Эксперимент проводился в воде с недогревом в 20К и при атмосферном давлении. Во время эксперимента были зафиксированы огромные тепловые потоки, достигающих 10МВт/м².

Основной целью наших предыдущих экспериментов было изучение интенсивного режима кипения на неводных жидкостях и повышение температуры перехода, при которой этот режим начинается. Было экспериментально доказано, что на переход оказывает влияние шероховатости поверхности и низкая температурапроводность. Кроме того, была разработана приближенная модель возникновения

интенсивного теплообмена при плёночном кипении недогретой жидкости [2], согласно которой, чем выше тепловая активность охлаждающего тела, тем ниже температура перехода к интенсивному режиму кипения. Поэтому было принято решение провести серию экспериментов на дюралевом образце, поскольку он имеет низкую плотность и относительно высокую теплопроводность.

В качестве опытного образца использовался шар из дюралюминия диаметром 40 мм. В шаре монтировались 5 хромель-алюмелевых термопар: четыре на поверхности и одна в центре. Для размещения кабельных термопар в шаре из верхней точки высверливались сквозные отверстия диаметром около 1 мм с полярными углами выходных точек $\theta = 45, 90, 135$ и 180° .

Эксперименты проводились при атмосферном давлении в диапазоне температур жидкости от -80 до 100°C . В качестве охлаждающих жидкостей использовались: вода, этанол и водные растворы этанола различного состава.

Абсолютно на всех опытных образцах проводятся эксперименты по охлаждению в насыщенной воде. Это делается для того, чтобы проверить исправность всех термопар, заделанных в шаре, и убедиться в том, что поверхность образцов не имеет «серьёзных» дефектов, которые могли бы повлиять на процесс охлаждения. На рис.1 представлена термограмма охлаждения шара из дюралюминия диаметром 40 мм в воде с недогревом в 30°C . Видно, что процесс охлаждения начинается мгновенно и продолжается в течение 10 секунд. К сожалению, нам не удалось зафиксировать точку перехода к интенсивному режиму, поскольку весь процесс протекал очень быстро, и мы были ограничены температурой нагрева образца.

На рис.2 представлена термограмма охлаждения шара из дюралюминия диаметром 40 мм в этаноле с температурой $+50^\circ\text{C}$. Как и в большинстве экспериментов на этаноле, после погружения шара в жидкость, наблюдается устойчивое плёночное кипение, которое продолжалось более 70 секунд. Интенсивный режим наступает при температуре поверхности приблизительно $170 - 180^\circ\text{C}$. Результаты на воде согласуются с предыдущими нашими экспериментами, в которых процесс охлаждения

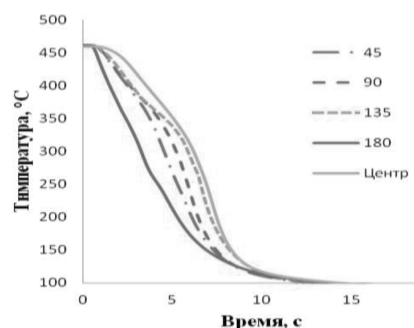


Рис. 1. Охлаждение образца из дюралюминия в воде с температурой $+70^\circ\text{C}$

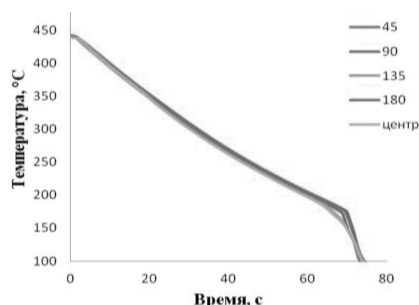


Рис. 2. Охлаждение образца из дюралюминия в этаноле с температурой $+50^\circ\text{C}$

начинался сразу после погружения шара в воду. Кипение чистого этанола и его водных растворов проходят в режиме устойчивого плёночного кипения, сменяемого переходным, а затем пузырьковым кипением. Сравнивая эксперименты на воде и этаноле, видно, что режим охлаждения на воде намного интенсивнее, чем охлаждение в спирте.

Работа выполнена в НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант №17-79-20402).

Список литературы

1. **S. Aziz, G.F. Hewitt, D.B.R. Kenning**, Heat transfer regimes in forced convection film boiling on spheres, in: Proc. of the 8th International Heat Transfer Conf., San Francisco, 1986. V. 5, pp. 2149-2154
2. **A.R. Zabirov, V.V. Yagov, P.K. Kanin**. Intensive cooling metallic bodies with low thermal conductivity in film boiling of ethanol// Journal of Physics: Conference Series.

Салех Б., Шкель А.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

vladimir.melikhov@erec.ru

СРАВНЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕТОНАЦИИ В ДО И СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

В ходе развития аварии на АЭС расплавленная активная зона (кориум) может вступить в контакт с жидким теплоносителем (вода/натрий). При определенных условиях в этой системе способно произойти взрывное взаимодействие с ростом давления до сотен и тысяч атмосфер, вызывая катастрофические последствия. Это явление, известное как паровой взрыв, активно исследуется во всех крупнейших мировых научных центрах по атомной энергетике. В настоящее время общепринято, что развитие парового взрыва проходит через следующие стадии: 1) предварительное перемешивание расплава с охладителем (водой) и формирование крупнодисперсной смеси «капли расплава, окруженные паровой пленкой, - охладитель», 2) инициирование взрыва (некоторое локальное энергетическое событие), 3) распространение волны термической детонации, в которой происходит фрагментация крупных капель расплава и когерентная передача тепловой энергии расплава охладителю, 4) расширение продуктов парового взрыва в окружающем пространстве.

В [1] было выполнено численное моделирование развития волны термической детонации в системе "расплавленный кориум - пароводяная смесь". В расчетах были получены как выход на стационарное распространение волны термической детонации, так и её затухание в зависимости от величины объемной доли расплава кориума.

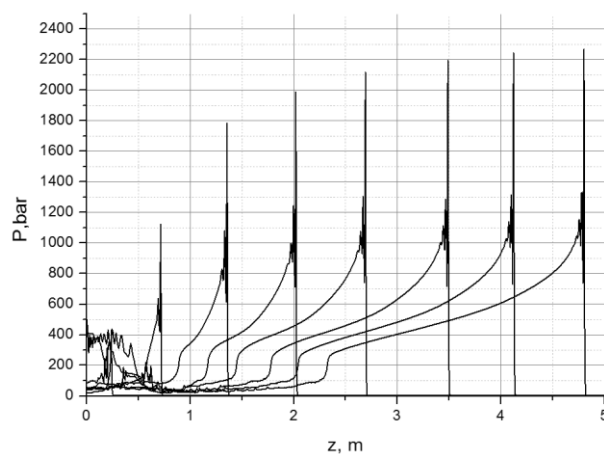


Рис. 1. Профили давления в последовательные моменты времени (через 1 мс).

Рассматриваемые параметры отвечали докритическому режиму распространения волны термической детонации, т.е. максимальные давления не превышали критического давления воды. Известно, что для практики большой интерес представляет сверхкритический режим термической детонации в связи с существенно возрастающими нагрузками на окружающие конструкции. В настоящей работе рассматриваются особенности формирования и распространения сверхкритической волны термической детонации, а также проводится сравнение с распространением волны в докритическом режиме. На рис.1 показано развитие сверхкритической волны термической детонации (начальное давление 0,4 МПа, температура кориума 2800 К, объемная доля кориума 0,021, объемное паросодержание 0,5). Примерно через 2-3 м волна выходит на стационарный режим, давление достигает 2200 бар, скорость движения волны 709 м/с, а скорость увлекаемой волной воды около 400 м/с. В отличие от случая докритической термической детонации, при которой примерно 25% расплава остаются не фрагментированными, в случае сверхкритической детонации фрагментирует весь расплав. Также следует отметить резкое увеличение давления (на порядок) при переходе волны термической детонации из докритического режима в сверхкритический режим распространения (при объемной доле расплава 0,019).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-01048 а).

Список литературы

1. Гудеменко Д.В., Мелихов В.И., Мелихов О.И. Исследование термической детонации на основе модели микровзаимодействий // Вестник МЭИ. 2017. № 2. С. 32—39.

Саломатов Вас.В.¹, Саломатов Вл.В.^{1,2} ()*

¹ Институт теплофизики СО РАН,

Новосибирск, 630090, Лаврентьева, 1

² Новосибирский национальный исследовательский университет,

Новосибирск, 630090, Пирогова, 2

salomatov.vv@mail.ru

ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПРИСТЕННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ

Закрученные турбулентные пристеночные струи как элемент технологического процесса широко применяются в топочных и горелочных устройствах котлоагрегатов, циклонах и сепараторах, газотурбинных и поршневых двигателях и других технических системах. Использование закрутки радикальным образом влияет на поле течения и, прежде всего, на такие его характеристики: распространение и затухание струй, форма и размеры пламени, интенсивность и стабилизация горения, уровень турбулентности и структура течения и др. Исследовать эти свойства закрученного течения наименее затратным образом возможно только с помощью математического моделирования. Как показывается в работе, выбор модели турбулентности решающим образом влияет на достоверность расчета закрученных течений.

Анализ выполненных компьютерных расчетов пристенных струй показал, что RWG-модели турбулентности по сравнению со стандартной к-ε моделью дает более точные результаты при достаточно интенсивной закрутке $\Omega \approx 1$.

Дальнейшее усовершенствование моделей может состоять в отказе от концепции изотропности турбулентной вязкости и решении уравнений переноса для отдельных компонент тензора напряжений Рейнольдса. Необходимо также более подробно исследовать вопрос о влиянии кривизны линии тока на характеристики турбулентности в рассматриваемых течениях.

Согласование с экспериментом [1] удалось получить с использованием модифицированной с учетом числа Ричардсона модели турбулентности (при $C_{Ri} = 0.005$).

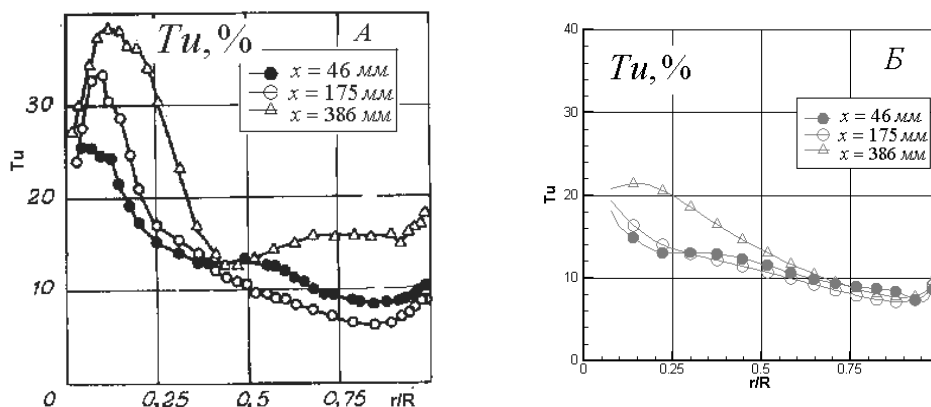


Рис. 1. Сравнение профилей для интенсивности турбулентности в различных сечениях (А – эксперимент [1], Б – расчет по к-ε модели с поправкой на число Ричардсона $Cr_i = 0.005$)

Список литературы

1. Волчков Э.П., Спотарь С.Ю., Терехов В.И. Закрученная пристенная струя в цилиндрическом канале. – Новосибирск, 1982. – 42 с.

*Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Бабич А. Ю.,
Зайнуллина Э. Р., Павлов А. В.*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29
zaynullinaelza@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА НАКЛОНА ТРУБЫ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

В первой серии экспериментов, посвященных использованию градиентной теплотметрии [1] в изучении теплообмена при конденсации водяного пара на наружной поверхности трубы [2], подтверждена применимость и высокая информативность предлагаемого метода. С помощью градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) получены распределения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи (КТО) по поверхности наклонной трубы, определен оптимальный (для условий эксперимента) угол, обеспечивающий максимальный КТО при конденсации. Актуальной становится задача оптимизации при различных режимных параметрах – в первую очередь, при изменении расхода (и скорости) пара.

Экспериментальная установка собрана по схеме «труба в трубе»: внутренняя труба выполнена из нержавеющей стали 12Х18Н9Т ($l_1 = 1250$ мм, $d_1 = 20$ мм, толщина стенки – $\delta_1 = 2$ мм), наружная – из резинового рукава ($l_2 = 900$ мм, $d_2 = 65$ мм), длина зоны теплообмена

составила 800 мм. На образующей трубы из нержавеющей стали установлены 5 ГДТП из монокристаллического висмута размерами в плане $2,3 \times 10,5$ мм. Для измерения температуры в местах установки датчиков заделаны спаи полусинтетических термопар медь – нержавеющая сталь.

Исследования
 проводились при
 противотоке сред:
 насыщенный водяной пар
 при атмосферном давлении
 подавался в межтрубное
 пространство сверху, а
 охлаждающая вода в трубу
 из нержавеющей стали
 снизу.

По результатам первой
 серии опытов, выполненных
 при расходе водяного пара
 $G_{п} \approx 10$ кг/ч, построена
 зависимость среднего КТО

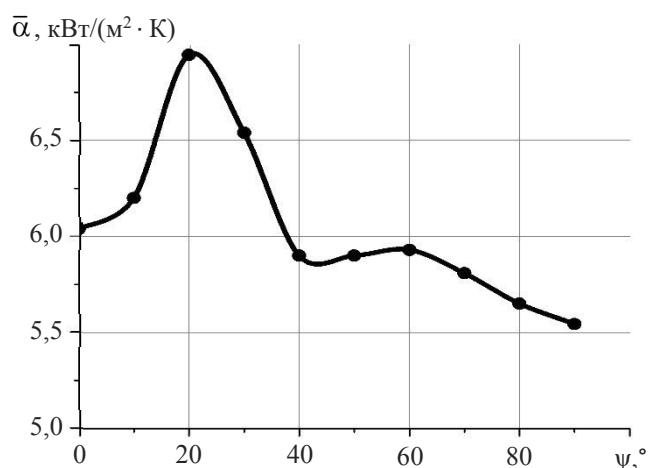


Рис. 1. Зависимость среднего КТО от угла наклона трубы.

от угла наклона трубы (рис. 1). Наибольшее значение среднего КТО достигается при наклоне трубы на угол $\psi = 20^\circ$ и составляет $6,94$ кВт/(м²·К), превышая значение, полученное на вертикальной трубе, на 14,9%; а на горизонтальной – на 25,3 %.

Характер зависимости (рис. 1) несколько отличаются от теоретических представлений [3] и результатов других исследователей [4]. Предполагаем, что это связано с малым расходом водяного пара, что подтверждает полезность поставленной задачи.

Список литературы

1. Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement/ Sapozhnikov, Sergey Z., Mityakov, Vladimir Yu., Mityakov, Andrey V. – Springer International Publishing, 2020.
2. Зайнуллина Э. Р. Исследование теплообмена при конденсации на поверхностях труб методом градиентной теплотометрии / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков, А. Ю. Бабич, Э. Р. Зайнуллина // Письма в ЖТФ. - 2019. - том 45, вып.7.
3. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учебное пособие для вузов / В. В. Ягов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014.– 542 с.
4. Nada, S. A. General semi-empirical correlation for condensation of vapor on tubes at different orientations / S. A. Nada, M. S. Hussein // International Journal of Thermal Sciences. – 2016.– 100.– pp. 391–400.

Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Бабич А.Ю., Зайнуллина Э.Р.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29
babich1994@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

Введение. С развитием атомной и геотермальной энергетики возрастает интерес к исследованиям процессов, протекающих в парогенераторах атомных и скважинах геотермальных станций. Предложена методика измерения плотности теплового потока при помощи гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГГДТП).

Метод исследования. Для исследования теплообмена при конденсации создан экспериментальный стенд «труба в трубе». Внутренняя труба из нержавеющей стали имеет вставки для установки ГГДТП и термопар, а наружная пластиковая труба образует рубашку охлаждения.

Поворотное устройство обеспечивает поворот экспериментального участка относительно вертикали и вокруг собственной оси, что позволяет получить местные плотности теплового потока и коэффициенты теплоотдачи при углах наклона ψ от 0 до 90° и поворота вокруг своей оси на углы ϕ от 0 до 180°.

Результаты. Для проверки применимости градиентной теплометрии к изучению конденсации в трубе проведены опыты с традиционной подачей пара сверху. Результаты показали соответствие с данными литературы, что позволило применять новый метод при неклассической постановке задачи.

При наклоне трубы распределение плотности теплового потока по внутренней поверхности становится несимметричным, поэтому необходимо измерять плотность теплового потока по поверхности трубы. В ходе работы получены распределения местных коэффициентов теплоотдачи по внутренней поверхности трубы при различных углах наклона. Плотность теплового потока уменьшается в нижней части сечения трубы, что соответствует увеличению толщины конденсатной пленки в этой области.

В качестве примера на рисунке 1 приведены относительные коэффициенты теплоотдачи при угле наклона $\psi = 45^\circ$.

Уникальное быстроедействие ГГДТП позволяет фиксировать пульсации плотности теплового потока, вызванные колебаниями пленки конденсата, которые невозможно отследить при помощи показаний термопар.

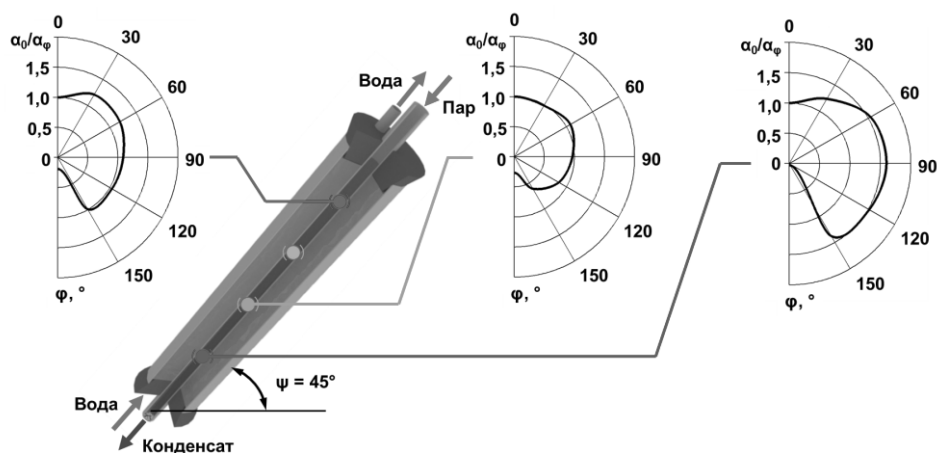


Рис. 1. Распределение местных коэффициентов теплоотдачи при наклоне трубы под углом $\psi = 45^\circ$.

Заключение. Разработана, изготовлена и протестирована экспериментальная установка для исследования конденсации с использованием гетерогенных градиентных датчиков теплового потока.

Выявлено преимущество теплотометрии перед термометрией. Показаны новые возможности в исследовании конденсации с помощью ГГДТП. Особый интерес представляют результаты на наклонной трубе.

Градиентная теплотометрия будет использована в широком круге задач, связанных с конденсацией пара в трубах.

Сапожников С.З.², Митяков В.Ю.², Павлов А.В.¹, Бобылев П.Г.²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого «СПбПУ»,
Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29
pavlovav196@mail.ru

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ШАРА

Изучение теплообмена при кипении на сегодняшний день не обладает необходимой экспериментальной базой. Доступными первичными преобразователями до недавнего времени являлись термопары. По температурам на поверхности и в центре шара решением обратной задачи теплопроводности оценивают плотность теплового потока [1]. Применение градиентной теплотометрии позволит измерить плотность теплового потока напрямую [2].

В наших экспериментах использован шар из титана ВТ22 диаметром 34 мм. На его поверхности установлен гетерогенный градиентный датчик теплового потока (ГГДТП) из композиции медь+никель с 3x3 мм. Установленные на поверхности и в центре шара термопары позволили отследить равномерность прогрева экспериментальной модели, а также получить временные теплограммы при остывании шара в воде.

Начальная температура шара составляла 450 °С, при температуре воды 50 °С. Для оценки распределения плотности теплового потока по поверхности шара использован поворотный механизм, с помощью которого ГГДТП выставился по заранее выбранным радиальным углам φ . Экспериментальные значения записывались на измерительно-вычислительный комплекс National Instruments. На основе полученных данных построены распределения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи (КТО) по углу поворота φ (рис. 1).

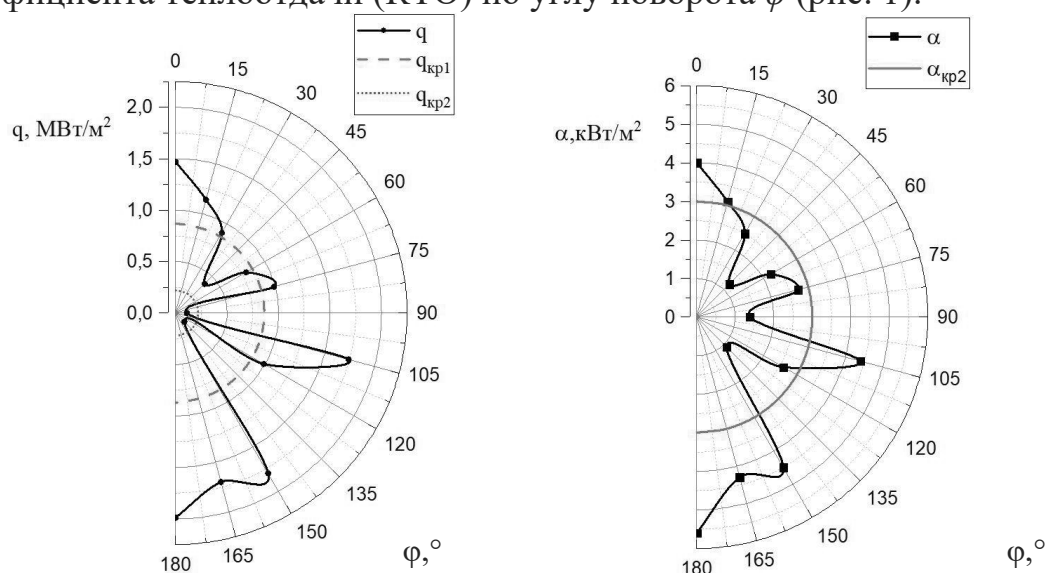


Рис. 1. Распределение плотности теплового потока и КТО по поверхности шара

Результаты работы показали существенную неравномерность плотности теплового потока и КТО по поверхности шара. В нижнем и верхнем интервалах φ плотность теплового потока превышает первую критическую более, чем вдвое, а в среднем опускается ниже второй критической плотности теплового потока.

Список литературы

1. **Ягов В.В.** Нестационарный теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости/ В.В. Ягов, А.Р. Забиров, М.А. Лексин // Теплоэнергетика. 2015. №11. С. 70-80
2. **Сапожников С.З.** Экспериментальное исследование пленочного кипения недогретой воды методом градиентной теплотометрии / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков и др. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. №6.

*Сафронов А.А.*¹, *Коротеев А.А.*², *Филатов Н.И.*¹, *Григорьев А.Л.*¹,

¹ ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва, 125438, Онежская, 8

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, 125993, Волоколамское шоссе, д. 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН В РАДИАЦИОННО ОСТЫВАЮЩЕМ ДИСПЕРСНОМ ПОТОКЕ

Решение новых научно-технических и информационно-телекоммуникационных задач, связанных с использованием космического пространства, предполагает значительное повышение энерговооружённости космических аппаратов. Наиболее проблемной частью их энергетических установок является система отвода низкопотенциального тепла. В настоящее время обычно используются панельные холодильники-излучатели. При больших мощностях они имеют значительную площадь поверхности, массу и метеоритную уязвимость. Расчёты показывают, что предельная мощность энергетических установок долговременно функционирующих космических аппаратов с панельными излучателями, не превышает 100-200 кВт. С использованием капельного холодильника-излучателя (КХИ) становится возможным создание аппаратов мегаваттного уровня мощности [1].

Задача радиационного остывания капельной пелены ранее рассматривалась применительно к излучателям с размером частиц 5-30 мкм, расположение которых считалось равномерным [2, 3]. Предполагалось, что температура капель составляет ~ 700 К [4]. Процесс остывания рассматривался как распространение тепловой волны в среде с нелинейной теплопроводностью [3].

Использование низкопотенциальных излучателей позволяет повысить КПД энергетической установки космического аппарата и снизить потери рабочего тела на испарение. Радиус капель в таком излучателе не превышает $r \sim 100$ мкм и определяется техническими возможностями диспергирования вещества. Поскольку температура достаточно мала ($T \sim 400$ К), спектр теплового излучения сосредоточивается в области длин волн, при которых рабочее тело эффективно поглощает излучение. Интегральная степень черноты капель приближается к единице. Расчёты показывают, что использование структурированного капельного потока позволяет повысить мощность КХИ на несколько десятков процентов по сравнению со случаем однородного расположения частиц [5].

В структурированном потоке заметный вклад в переоблучение частиц дают дальние радиационные взаимодействия. Их наличие существенно

изменяет структуру распространяющихся тепловых волн [6]. В представленной работе исследуется влияние дальних радиационных взаимодействий на развитие тепловых волн в радиационно остывающем потоке КХИ. Показано, что в системе существуют колебания, сопровождающие процесс установления равновесного профиля температуры. Определена амплитуда колебаний и скорость их затухания. Проведено сравнение результатов теоретического анализа и численного расчёта реального капельного потока.

Список литературы

1. Ядерные ракетные двигатели / Демянко Ю.Г., Конюхов Г.В., Коротеев А.С. и др. М.: Норма-Информ, 2001. 415 с.
2. **Siegel R.** Separation of variables solution for nonlinear radiative cooling // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1987. V. 30, I. 5. P. 959–965.
3. Radiation Heat Transfer in Disperse Systems / Dombrovsky L.A. New York, Begell House 1996. 690 p.
4. **Ohta K. O., Graf R.T., Ishida H.** Evaluation of space radiator performance by simulation of infrared emission // Applied Spectroscopy. V 42, N 1, 1988. P. 114-120.
5. **Koroteev A.A., Safronov A.A., Filatov N.I.** Influence of the structure of a droplet sheet on the capacity of frameless space radiators and the efficiency of the power units // High Temperature. 2016. T. 54. № 5. С. 767-770.
6. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. М.: Наука, 1966. 686 с.

Свириденков А.А., Соколова Е.И.

Центральный институт авиационного моторостроения

им. П.И. Баранова «ЦИАМ»

Москва, 111116, Авиамоторная 2

aasviridenkov@ciam.ru

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ФОРМИРОВАНИЕ ФАКЕЛА РАСПЫЛИВАНИЯ ЗА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКЕЙ.

Пневматические форсунки широко используются для создания мелкодисперсного факела распыливания в различных секторах промышленности. Они просты в изготовлении и характеристики факела распыливания, создаваемого ими, легко получить современными методами расчёта. Тем не менее, ежегодно публикуется большое количество работ, в которых рассматриваются особенности работы

пневматических форсунок в составе фронтального устройства. Продолжающееся ужесточение мер ИКАО по ограничению выбросов вредных веществ в атмосферу, а также экологическая безопасность, вызывают необходимость организации новых конструктивных методов сжигания топлива. Одним из таких методов, широко используемых в современных авиационных двигателях, является однонаправленная или противоположно направленная относительно направления движения топливной плёнки, закрутка воздушного потока. Представляемая работа является продолжением исследования [1] в котором показано, что закрутка окружающего форсунку воздуха в том же направлении, что закрутка топливной плёнки, позволяет раскрыть топливный факел. В этом случае воздух увеличивает закрутку плёнки. При вращении воздуха в противоположном направлении раскрываемость факела хуже, так как закрутка топлива в этом случае уменьшается. Добавление продольной компоненты скорости слабо улучшает раскрываемость. Для исследования влияния скорости и направления потока воздуха на основные характеристики, определяющие дисперсность и форму факела распыливания за центробежной форсункой, использовалась математическая модель движения пленки в криволинейной системе координат, связанных с поверхностью пленки. В модели предполагается, что закрученное течение жидкости одномерно и стационарно. Жидкость считается несжимаемой с нулевым градиентом давления в направлении движения плёнки и в тангенциальном направлении. Значения перепада давления в нормальном к поверхности пленки направлении определяется из условия равновесия сил давления и поверхностного натяжения. Влиянием сил вязкости на движение жидкости пренебрегается, но учитывается вязкое взаимодействие на границе раздела газа и жидкости. Так как на практике толщина плёнки значительно меньше радиуса факела распыливания, то изменением скорости в окружном и нормальном направлении можно пренебречь. При таких предположениях можно записать уравнения сохранения массы и импульса с учетом гравитации, в которых все переменные является функцией одной координаты, отсчитываемой вдоль поверхности плёнки. Эти уравнения можно проинтегрировать и получить зависимости основных параметров, определяющих качество распыливания, а именно толщины и скорости плёнки, а также угла раскрытия факела, как функции расстояния от центробежной форсунки. В расчётах, проведённых по этой модели, основное внимание обращалось на характеристики распыливания в начальной фазе образования факела. Расчёты показали, что закрученный воздушный поток способствует раскрытию всего факела, однако вблизи сопла форсунки при противоположной закрутке угол раскрытия факела меньше, чем в отсутствие воздушного потока. В работе также показано, что закрученный воздушный поток уменьшает толщину плёнки топлива

за форсункой в начальном участке практически одинаково, вне зависимости от направления его вращения. На основе полученных результатов о толщине плёнки топлива, её скорости и угле раскрытия факела получены данные о влиянии воздушного закрученного потока на средние размеры распыленных капель топлива. Полученные результаты сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными.

Список литературы

1. A I Maiorova, A Yu Vasil'ev, A A Sviridenkov and O G Chelebyan The atomization and burning of biofuels in the combustion chambers of gas turbine engines, Journal of Physics: Conference Series, 2017, Volume 891, conference 1 012221, DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012221>

Семенёв П.А.^{1,2}, *Кон Дехай*³, *Афанасьев В.Н.*¹, *Исаев С.А.*⁴

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-ая Бауманская, 5

²Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, 111116, Москва, Авиамоторная, 2

³Северо-Западный политехнический университет, Китай, 710072, Шэньси Сиань, район Бейлин, ул. Запад Юйи, 127

⁴Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38
semenyov@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ЩЕЛЕВОГО ВЫСТУПА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА

Проблема интенсификации процессов теплообмена имеет особую важность при решении задач энергосбережения в различных технологиях, и, как правило, она успешно решается путем использования наиболее эффективных методов интенсификации процессов теплообмена, таких как: формирования на исходно гладкой поверхности двумерных, безотрывных и отрывных систем сферических углублений, безотрывных и отрывных углублений-траншей, выступов различной геометрии [1-3] и т.п. При этом большое внимание уделяется отрывным течениям, в основе которых лежит отрыв и повторное присоединение потока.

В работах [2, 3] проведены численные и экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена при турбулентном обтекании одиночного прямоугольного выступа с разными формами и размерами щели. Отмечено, что на боковых границах щели в поперечном направлении наблюдается пара симметричных протяженных пятен с высокими значениями коэффициента теплоотдачи, особенно в случае

выступов с конфузорной щелью. На практике наибольший интерес представляют максимум или минимум интенсификации теплообмена при использовании конкретного метода интенсификации теплообмена, т.е. увеличения или уменьшения коэффициента теплоотдачи и размеров области его распространения.

В данной работе представлены результаты численного исследования влияния формы и размеров отверстий в выступе на область максимальной интенсивности теплообмена при турбулентном обтекании прямоугольного щелевого выступа, установленного на плоской пластине, нагреваемой по закону $q_w = const$. Численное моделирование выполнено с помощью расчетного пакета ANSYS FLUENT для несжимаемой жидкости в рамках трехмерных уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу, замкнутых с помощью стандартной $k-\varepsilon$ модели с модификацией Като-Лаундера.

Установлено, что пятна с повышенными значениями коэффициентов теплоотдачи имеют большую протяженность — более $x/h = 20$. Очевидно, что на их величину оказывает существенное влияние процесс взаимодействия струи, вытекающей из щели, на основной поток, обтекающий сплошной выступ, так называемые «концевые эффекты» — сложные и непредсказуемые, но приводящие к существенному увеличению коэффициента теплоотдачи и заслуживающие особого внимания.

Список литературы

1. **Afanasyev V.N., Chudnovsky Ya.P., Leontiev A.I., Roganov P.S.** Turbulent flow friction and heat transfer characteristics for spherical cavities on a flat plate // Exp. Therm. Fluid Sci. 1993. V. 7. N 1. P. 1-8.
2. **Terekhov V.I., Yarygina N.I., Zhdanov R.F.** Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // Int. J. Heat Mass Transf. 46(2003) 4535-4551.
3. **Afanasyev V.N., Kong Dehai., Isaev S.A., Nikushchenko D.V.** Jet vortex heat transfer in turbulent air flow around a plate with a slit rib // Int. J. Heat Mass Transf. 146(2020) 118867.

Семенёв П.А.^{1,2}, Токталиев П.Д.³

¹ Центральный институт авиационного моторостроения им.
П.И. Баранова, 111116, Москва, Авиамоторная, 2

² Московский государственный технический университет им.
Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-ая Бауманская, 5

³ Институт проблем химической физики РАН,
142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр-т академика Семенова, 1
semenyov@gmail.com

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ПОЛУДЕТАЛЬНОЙ КИНЕТИКОЙ ПРИ УМЕРЕННЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Реагирующие потоки, в том числе с горением, возникают во многих технических устройствах, таких как авиационные двигатели и энергетические установки. Высокая эффективность и низкая эмиссия вредных веществ являются одними из приоритетных целей при разработке газотурбинных двигателей. Численное моделирование процессов в элементах двигателя с целью предсказания параметров на этапе проектирования требует рассмотрения совокупности различных физико-химических и тепломассообменных процессов. Явление турбулентного горения – одна из сложнейших вычислительных проблем вследствие широкого диапазона пространственных и временных масштабов.

Трёхмерное прямое численное моделирование (DNS) при умеренных числах Рейнольдса и использовании достаточно сложной кинетики позволяет как рассмотреть в отдельности, так и выявить фундаментальные связи между явлениями турбулентности, смешения и химическими реакциями. Эта информация является незаменимым инструментом для разработки и тестирования подсеточных моделей переноса для метода моделирования крупных вихрей (LES), а также моделей для реагирующих потоков меньшей размерности. При этом, как показывают исследования [1,2], использование совместно с DNS редуцированных кинетик существенно меняет основные характеристики турбулентного течения.

В данной работе представлены результаты прямого численного моделирования турбулентного дефлаграционного горения предварительно перемешанной метановоздушной смеси в модельных условиях - в простейшей прямоугольной расчетной области при умеренных числах Рейнольдса, $Re_\lambda \sim 50$ и числах Карловитца $Ca \sim 5$. Эти условия соответствуют режиму горения с локализацией основных окислительных реакций в узкой области. Для описания химических превращений в системе использован полудетальный механизм окисления метана. На основе проведенных расчетов получены значения времен

задержки воспламенения и ламинарной скорости пламени, произведено сравнение с результатами предыдущих работ [3,4], полученными в 0D, 1D и 3D постановках. На основе результатов моделирования выявлены толщина, форма и локальные структуры фронта пламени, проведено сравнение с известными экспериментальными данными. Проведен анализ производительности расчетов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-31-20059.

Список литературы

1. **Chen, J.H.** Petascale direct numerical simulation of turbulent combustion - fundamental insights towards predictive models // Proc. of the Combust. Inst. 33:99–123 (2011).
2. **Saito N., Minamoto Y., Yenerdag B., Shimura M., Tanahashi M.** Effects of Turbulence on Ignition of Methane–Air and n-Heptane–Air Fully Premixed Mixtures // Combustion Science and Technology, 190:3, 452-470 (2017)
3. **Semenev P.A., Martynenko S.I., Toktaliev P.D.** Direct numerical simulation of methane-air mixture combustion in synthetic turbulence test conditions // Короткие статьи и описания плакатов XIII Международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ-2019)». С.448.
4. **Семенёв П.А., Токталиев П.Д.** Анализ и тестирование детальных и полудетальных механизмов окисления метана/пропана // Тезисы докладов XXII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (20-24 мая 2019 года, Москва). В 2т. Т.1 С.177-178.

Сергеев Д.А.^{1,2}, Кандауров А.А.^{1,2}, Суворов А.С.¹

¹ Институт прикладной физики РАН,
Россия, 603950, Нижний Новгород, Ульянова ул. 46

² Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева,

Россия, 603950, Нижний Новгород, Минина, 24

daniil@appl.sci-nnov.ru

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ПРОЦЕССОВ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ СУДОВЫХ ЯЭУ

Введение. Автоколебательные режимы, возникающие из-за гидродинамической неустойчивости в энергетических системах, приводят к нестационарным тепловым нагрузкам на конструкционные элементы, негативно влияя на их работоспособность и ресурс, а также затрудняют

применение диагностических систем. Также гидродинамическая неустойчивость в турбулентных течениях может быть причиной возникновения паразитных акустических шумов. Таким образом, моделирование гидродинамической неустойчивости и процессов шумоизлучения в турбулентных течениях теплоносителя в ядерных энергетических установках (ЯЭУ), включая судовые (к ним предъявляются высокие требования по надежности и шумности) является актуальной и практически значимой задачей. Основной проблемой, которая исследуется в настоящей работе, является изучением механизмов формирования акустического поля гидродинамическими шумами на примере элементов запорной арматуры в трубопроводах судовых ЯЭУ.

Описание исследования. Основным методом исследования стало лабораторное моделирование отрезка трубопроводной системы охлаждающего контура на аэроакустическом стенде ИПФ РАН. Стенд состоит из модели проточной части запорной арматуры, подводящей и отводящей трубы, вентилятора, камеры глушителя. Использованный вариант модели базировался на максимально возможном упрощении конструкции области проточной части запорной арматуры, с учетом обеспечения возможности одновременных измерений полей скорости PIV-методом и вибро-акустических характеристик микрофонами, установленными внутри модели запорной арматуры. Основным качеством данного варианта являлось сохранение соотношения габаритных пропорций проточной части корпуса модели запорной арматуры по сравнению с реальным объектом при упрощении ее конфигурации до параллелепипеда, выполненного из оргстекла для возможности визуализации потока. Была использована схема PIV-измерений с дымовой визуализацией, непрерывной лазерной подсветкой и высокоскоростной видеосъемкой (аналогично [1]). Исследования выполнялись при фиксированной скорости воздушного потока 30 м/с (на оси). По результатам измерений PIV-методами восстанавливались поля скорости. По результатам их обработки были построены спектры пульсационных компонент в фиксированных точках, а также средние спектры по всей области наблюдения. Они продемонстрировали узкие пики выделенных частот в диапазоне 340-690 Гц, наличие которых и интенсивность сильно зависит от расстояния зазора между трубами в модели. При этом пики в спектрах пульсаций скорости полностью совпадают с пиками в спектрах сигнала звукового давления.

Качественный анализ видеоизображений продемонстрировал генерацию крупных вихрей, при срыве вихревой пелены, только при определенных параметрах зазора. Причина влияния расстояния зазора на процесс шумоизлучения, заключается в том, что оно и скорость потока явным образом определяют время за которое вихрь образуется и достигнет кромки выходной трубы, а значит и частоту

гидродинамической неустойчивости. Очевидно, что данная частота гидродинамической неустойчивости при определенных условиях синхронизируется с другими резонансами системы, что порождает автоколебания и сопутствующее им акустическое излучение.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований № 18-48-520023 (проведение численного моделирования) и Российским научным фондом № 18-19-00473 (проведение измерений).

Список литературы

1. **Сергеев Д.А.** Измерительный комплекс для исследования течений жидкости методом пробных частиц на основе твердотельного лазера с диодной накачкой // Приборы и техника эксперимента. 2009. №. 3. С. 138-144.

Серяков А.В., Алексеев Анд.П.

ООО «РУДЕТРАНССЕРВИС»,

173003, Великий Новгород, ул. Санкт Петербургская, 64

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОТКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ МЕТОДОМ МОНОТОННОГО НАГРЕВА

Представлены результаты исследований методом монотонного нагрева в вакуумном адиабатическом калориметре теплового сопротивления и теплоемкости коротких тепловых труб (ТТ), предназначенных для охлаждения космических аппаратов и спутников с жесткой регламентацией взлетной массы. При малых тепловых нагрузках и линейном во времени монотонном нагреве испарителя в приближении постоянных значений коэффициентов удастся решить уравнение теплопроводности. Полученные расчетные значения теплового сопротивления $R_{ТТ}$ тождественно совпадают с опытными, полученными в стационарных условиях. При больших тепловых нагрузках необходимо применять разработанный алгоритм численного решения обратной коэффициентной задачи теплопроводности (ОЗТ), позволяющий разделять вычисления теплопроводности и теплоемкости ТТ (фрагментов ТТ) из-за более быстрой сходимости пропорциональных \dot{t} расчетных функционалов теплоемкости, по сравнению с пропорциональными разностям температур Δt функционалами теплопроводности. Схема короткой ТТ с выполненным в виде сопла Лаваля паровым каналом представлена на рис.1.

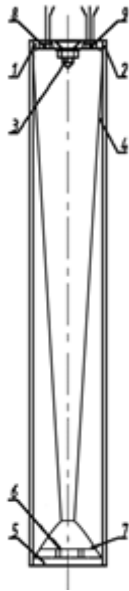


Рис.1, схема ТТ: 1-верхняя крышка; 2-цилиндрический корпус ТТ; 3- запорный узел; 4-капиллярно-пористая вставка; 5-нижняя крышка; 6-инжекторные каналы; 7-капиллярно-пористый испаритель; 8,9-емкостные датчики конденсации, измеряющие толщину пленки жидкого конденсата.. В качестве рабочей жидкости применен эфир диэтиловый $C_4H_{10}O$ с температурой кипения при атмосферном давлении $T_B = 308.65K$ ($35.5^\circ C$), критические параметры $T_C = 466.55K$ ($193.4^\circ C$), $P_C = 3.61MPa$.

Распределение экспериментально определенных значений одномерного температурного поля в ТТ применяют для решения стандартного уравнения теплопроводности следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{R_{ТТ}(t)} \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} = C_{ТТ}(t) \dot{t}(\bar{z}, \tau) ; R_{ТТ}(t) = \frac{L_{ТТ}}{\lambda(t)F(\bar{z})_{ev}} ; C_{ТТ}(t) = \rho_{ТТ} c_p(t) L_{ТТ} F(\bar{z}) . \quad (1)$$

где: $C_{ТТ}(t)$ – теплоемкость ТТ, J/K; $c_p(t)$ – удельная объемная теплоемкость ТТ, J/m³·K; $F(\bar{z})$ – площадь сечения ТТ, m²; $L_{ТТ}$ – длина ТТ, m; $R_{ТТ}(t)$ – тепловое сопротивление ТТ, K/W; \dot{t} – скорость роста температуры, K/s; $\bar{z} = z/L_{ТТ}$ – безразмерная продольная координата; $\rho_{ТТ}$ – плотность ТТ, kg/m³; $\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности ТТ, W/m·K;

Полученные результаты теплового сопротивления $R_{ТТ}$ в зависимости от температурного напора на испаритель, $\delta T = T_{ev} - T_B$, приведены на рис.2. T_{ev} – температура испарителя, K; T_B – температура кипения рабочей жидкости при атмосферном давлении, K. $T_{ev} = T_{ev0} + b\tau$, $b = 3 \cdot 10^{-3}$ K/s, τ – время, s.

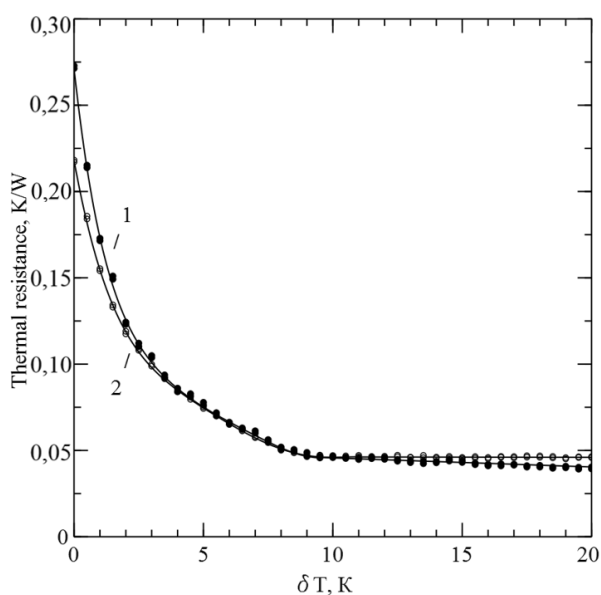


Рис. 2. Тепловое сопротивление $R_{ТТ}$. 1– черные точки, экспериментальные стационарные значения $R_{ТТ}$ короткой ТТ с выполненным в виде сопла Лавалья паровым каналом; 2– белые точки, экспериментальные стационарные значения $R_{ТТ}$ короткой ТТ с цилиндрическим паровым каналом. Сплошные линии – расчетные значения теплового сопротивления по уравнению (1) с опытными значениями поверхностной температуры вдоль продольной оси ТТ.

Погрешность опытного определения $R_{ТТ}$ не превышает 1.5%.

Сидоров А.А, Ястребов А.К.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

Alexander-Sidorov99@yandex.ru

CFD-РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕЛИЕВОГО ТУРБОДЕТАНДЕРА

Турбодетандерные агрегаты (ТДА) относятся к лопастным криогенным машинам расширительного типа и предназначены для решения большого круга задач, начиная от получения холода, очистки и ожижения газов для хранения и транспортировки и заканчивая получением электроэнергии в турбодетандерах-генераторах.

Развитие новых технологий, а именно трехмерного компьютерного моделирования процессов теплообмена и гидродинамики методами конечных объемов (CFD) открыло новые возможности в проектировании сложных машин и агрегатов, существенно снизив затраты на исследования. Классический подход к проектированию подразумевает, в основном, достаточно сложный и затратный итерационный процесс, включающий в себя, как правило, упрощенное моделирование физических процессов, а также экспериментальные исследования для внесения корректировок. Методы CFD этих недостатков лишены, и позволяют с высокой точностью моделировать многофазные и многокомпонентные потоки, агрегаты со сложной пространственной геометрией, учитывать трудозатратные для классических методов физические явления, а также обладают высокой наглядностью,

позволяющей оптимизировать узлы и компоненты в ходе визуального контроля. Помимо прочего настоящие методы позволяют прогнозировать и минимизировать вклад таких явлений, как кавитация и эрозийный износ.

В реальных условиях рабочая среда, поступающая в турбодетандер, содержит некоторое количество примесей, которые влияют как на характеристики потока, так и на результирующее значение температуры на выходе из ТДА. Целью настоящей работы является определение степени влияния примесей на режимы работы и характеристики ТДА, для чего проводится сравнение расчетных характеристик турбодетандера в однофазной однокомпонентной постановке и многофазной многокомпонентной постановке в виде зависимостей температуры на выходе из диффузора от частоты вращения.

В работе рассматривается расширение смеси неконденсирующегося газа и пара в проточной части турбодетандерного агрегата, при этом газ является рабочим телом, а пар – примесью, т.е. содержание пара в смеси мало. В качестве математического описания используется полная система уравнений неразрывности, движения и энергии в трехмерной постановке с учетом сжимаемости и межфазного теплообмена [1], парогазовый поток представляет собой смесь идеальных газов. Расчет производится методами CFD с использованием скользящих интерфейсов на границах зон [2], что позволяет исследовать всю проточную часть ТДА, а не по частям путем «сшивания» решений.

В результате расчета получены распределения компонентов смеси в потоке, температуры, скорости, давления в сечении и на выходе из ТДА. Произведена оценка влияния примесей на режимы работы и характеристики ТДА, сделаны выводы и сформулирован набор рекомендаций по увеличению эффективности агрегата в условиях загрязненного потока.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90247.

Список литературы

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. Издание 6-е. М.: Физматлит, 2015. 728 с. (Теоретическая физика, т. VI).
2. Fluent Theory guide 14,
<https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>

Скрыпник А. Н., Попов И. А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ»,
420111, Россия, Казань, К. Маркса 10

К ПРИМЕНЕНИЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБ С ВНУТРЕННИМ СПИРАЛЬНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Трубы с внутренним спиральным оребрением являются перспективным способом повышения тепловой и теплогидравлической эффективности труб теплообменных аппаратов [1-2]

Однако, большая часть представленных в научной периодике обобщающих зависимостей, позволяющих выполнить расчет теплогидравлических характеристик таких труб получены в относительно узком диапазоне безразмерных режимных параметров потока и геометрических параметров теплообменных труб. Обобщающие зависимости, представленные в работе А. Е. Бергльса и Р. Равигуруаджана [3] получены в широком диапазоне характеризующих параметров, на основе анализа глобальной базы данных, полученных на период 1996 года. Отклонение экспериментальных значений величин коэффициентов гидравлического сопротивления и средней теплоотдачи составляет $\pm 50\%$, и позволяет описать 96% экспериментальных данных.

Представленные автором обобщающие зависимости [4] позволяют с доверительной вероятностью $P=0.95$ выполнить расчет величин гидравлического сопротивления и средней теплоотдачи труб с внутренним спиральным оребрением со средним отклонением $\pm 30\%$ от эмпирических значений, представленной в базе данных.

Представленные в научной литературе работы, позволяют отметить перспективы применения искусственных нейронных сетей для регрессионного анализа данных. В рамках данной работы разработаны модели искусственной нейронной сети на основе применения библиотек Keras и Tensor flow в python 3.0 позволяющие включить взаимовлияние и нелинейный характер влияющих параметров на выходную величину.

В качестве влияющих параметров, на основе критического анализа научных работ посвященных анализу структуры потока в трубах с внутренним спиральным оребрением, были выбраны: величина числа Рейнольдса Re ; величина числа Прандтля – Pr ; относительный осевой шаг между выступами p/d ; относительная высота выступов e/d ; относительное расстояние между выступами p/e ; число заходов спирального оребрения N .

Геометрические параметры труб с внутренним спиральным оребрением представлены на Рис. 1.

Итоговая модель искусственной нейронной сети для расчета значений коэффициентов гидравлического сопротивления ξ , и величины среднего коэффициента теплоотдачи Nu труб с внутренним спиральным оребрением состоит из входного, выходного и трех скрытых слоев нейронной сети. Первый скрытый слой состоял из 12, второй из 8 и третий из 6 нейронов. Из каждого нейрона предыдущего слоя информация передавалась в каждый нейрон следующего слоя. Обучение производилось последовательным вводом массива из 10 случайных значений выборки в течение 500 обучающих поколений. Полученная программа позволила выполнить расчет теплогидравлических характеристик труб с внутренним спиральным оребрением со средним отклонением от экспериментальных данных $\pm 20\%$, что значительно повышает предсказательную точность, по сравнению с зависимостями, полученными посредством регрессионного анализа.

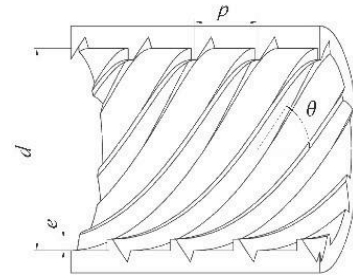


Рис. 1. Геометрические характеристики теплообменных труб с внутренним спиральным оребрением: θ — угол спирального оребрения [°]; e — высота выступа, м; p — осевой шаг между выступами; d_i — внутренний диаметр трубы, м; d_o — внешний диаметр трубы, м.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 19-38-90077.

Список литературы

1. Интенсификация теплообмена. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования / Ю. Ф. Гортышов, И. А. Попов, В. В. Олимпиев и др. // Издательство «Центр инновационных технологий», Казань, 2009. - 530 с. — 2009.
2. Эффективные интенсификаторы теплоотдачи для ламинарных (турбулентных) потоков в каналах энергоустановок / А. И. Леонтьев, Ю. Ф. Гортышов, В. В. Олимпиев, И. А. Попов // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2005. — № 1. — С. 75–91.
3. Ravigururajan T. S., Bergles A. E. Development and verification of general correlations for pressure drop and heat transfer in single-phase turbulent flow in enhanced tubes // Experimental Thermal and Fluid Science. — 1996. — Vol. 13, no. 1. — Pp. 55–70.
4. Skrypnik A. N., Popov I. A., Schelchikov A. V. Generalized correlations for predicting heat transfer and friction factor of turbulent flow in tubes with inner helical ribs // Journal of Physics: Conference Series / IOP Publishing. — Vol. 1382. — 2019. — P. 012032

Скурихин А.В.¹, Костановский А.В.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14

² Объединенный институт высоких температур РАН

125412, г. Москва, Ижорская ул., дом 13, стр. 2

SkurikhinAV@mpei.ru

РАЗДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПОРИСТЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

При приемке изделий из огнеупорных теплоизоляционных материалов (ОТИМ) требуется контроль коэффициента теплопроводности λ . Данный процесс является затратным по времени и требует наличия дорогого оборудования и труда квалифицированного персонала. В этой связи, представляет научно-практический интерес разработка методики расчетно-аналитической (прогнозной) оценки возможной величины λ ОТИМ.

Для получения ОТИМ в его состав могут добавляться дисперсные пористые присыпки, например, вспученный вермикулит (для краткости, просто вермикулит), получаемый путем обжига одноименного концентрата или руды, в результате которого он приобретает малую насыпную плотность (70-120 кг/м³) и низкий «эффективный» коэффициент теплопроводности $\lambda_{эфф}$ (менее 0,5 Вт/(м*К) при T = 1300 К) [1].

На практике ОТИМ используются в области температур вплоть до 1600 К, а при температурах свыше 600 К доля излучения при передаче теплоты в материале по мере нагрева быстро увеличивается. В пористых средах интенсивность конвективных процессов также возрастает. Так что необходимо рассматривать задачу сложного теплообмена, где должны быть учтены все три механизма теплопередачи: «молекулярная» (или «фононная») теплопроводность, обусловленная движением и взаимодействием частиц молекул вещества как внутри частиц и между ними, так и самой заполняющей среды в порах, а также излучение и конвекция. Исходя из независимой природы, эти составляющие аддитивны: $q = q_{изл.} + q_{мол.} + q_{конв.} = const$ (в стационарном случае). В настоящей работе была предпринята попытка разделить эти три типа теплопередачи.

Согласно ранее проведенным опытам [2-3], выяснилось, что вермикулит - полупрозрачный материал [4], определен его $\lambda_{эфф}$ для разных фракций и температур с учетом ориентации частиц и его изменения после прокаливании при 1000 °С в течение 3 ч, что впоследствии заложило основу для выполнения настоящей работы.

Расчетная часть работы проводилась в среде Matlab. Аналитическая часть работы при изучении сложного теплообмена внутри вермикулита и

ОТИМ на его основе заключалась в усложнении моделей, описывающих распространение тепла внутри них и объясняющих их теплофизические свойства, и изменении граничных условий.

Список литературы

1. Дубенецкий К.Н., Пожнин А.П. Вермикулит. Стройиздат, Ленинградское отделение, 1971 - 176 с.
2. Скурихин А.В., Костановский А.В. Определение коэффициента поглощения термовермикулита // «Приборы», 2019 № 5 (227).
3. Скурихин А.В., Костановский А.В., Маркелов С.А. Установка для измерения коэффициента теплопроводности сыпучих огнеупоров стационарным методом (на примере вспученного вермикулита) // «Приборы» № 10 (232), 2019.
4. Сергеев О.А., Мень А.А. Теплофизические свойства полупрозрачных материалов М., Издательство стандартов, 1977, 288 с.

Слюсарский К.В.^{1,2}, Ларионов К.Б.^{1,2}, Коотхан В.В.¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

634034, Томск, проспект Ленина, 30

² Национальный исследовательский технологический университет

«МИСиС»,

119991, Москва, Ленинский проспект, 4

slyuskonst@gmail.com

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ УПАКОВКИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ТЕПЛООБМЕН В ОБЛАСТИ С ШАРОВЫМ ТОПЛИВОМ

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы со свободной засыпкой сферического топлива – одни из наиболее перспективных решений для систем IV поколения. Ввиду сжимаемости и низкой теплопроводности газов (в сравнении с другими теплоносителями), теплогидравлические характеристики активной зоны усложняются. Температура в сферическом ТВЭЛе в активной зоне является областью с наибольшей температурой в системе, поэтому её определение является одной из наиболее важных задач [1]. При этом, закономерности теплообмена внутри топлива определяются, преимущественно, теплопроводностью, а температура на поверхности – конвекцией, связанной с гидродинамикой потока. Поскольку описание конвекции намного сложнее, чем описание теплопроводности, в данной работе акцент был сделан на конвективном теплопереносе.

В данной работе проведено моделирование области со сферическим топливом с применением ПО Ansys Fluent для определения распределения температур в расчетной области при изменении теплопроводности ТВЭЛа

и степени упаковки. Была построена кубическая сфероцентричная модель с одной целой центральной сферой и частями сопряженных сфер диаметром 0,06 м. Для изменения степени упаковки ТВЭЛов были созданы кубические расчетные области различного размера – с длиной ребра 0,07, 0,08, 0,09 и 0,10 м. Степень упаковки для данных областей при указанной компоновке составила 0,113, 0,155, 0,221 и 0,330, соответственно. Теплопроводность варьировалась в диапазоне от 1 Вт/(м К), близкой к параметрам оксида урана, до 100 Вт/(м К), близкой к параметрам карбида кремния. В качестве теплоносителя использовался гелий (наиболее перспективный теплоноситель для реакторов данного типа) со скоростью 0,5 м/с, температурой 523 К и давлением 5 МПа (характерные параметры на входе в активную зону [1]) на входе в расчетную область. Максимальная температура на поверхности сферического ТВЭЛа, в зависимости от указанных параметров, менялась в диапазоне от 695 до 895 К.

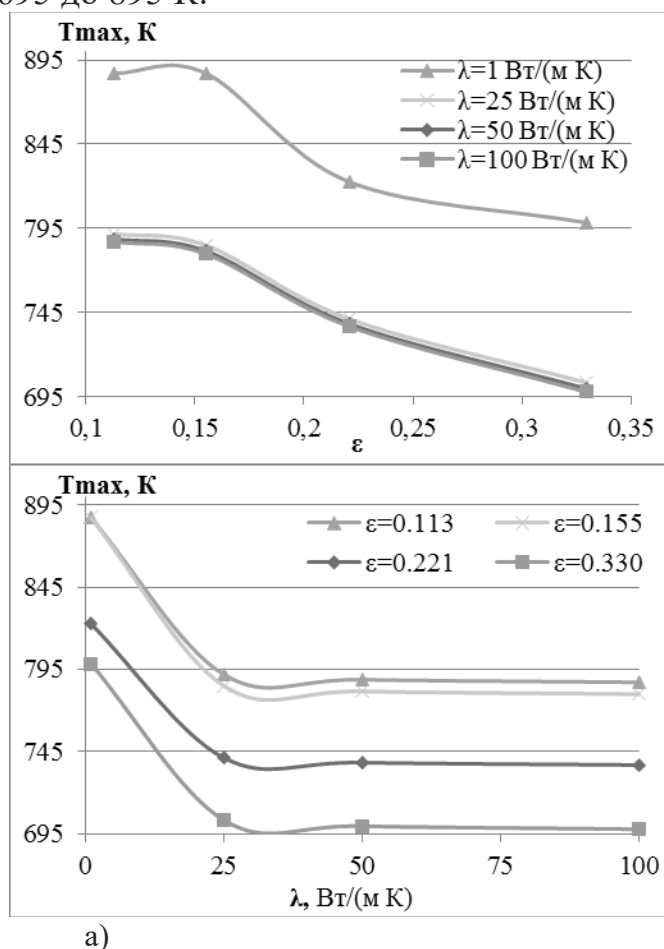


Рис. 1 – Зависимость максимальной температуры на поверхности сферического ТВЭЛа от степени упаковки ϵ (а) и теплопроводности топлива λ (б).

Сравнение данных моделирования с расчетами на основе общепринятых формул выявило значительные несоответствия результатов. На основе сопоставления полученных данных были

предложены поправочные коэффициенты к формулам для определения коэффициента теплоотдачи, позволяющим производить оценку максимальной температуры поверхности топлива.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, в рамках реализации проекта FSWW-2020-0022

Список литературы

1. **Jiang S., Tu J., Yang X., Gui N.** A review of pebble flow study for pebble bed high temperature gas-cooled reactor // *Experimental and Computational Multiphase Flow*. 2019. Vol. 1. № 3. P. 159—176.

Солодов А.П.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
SolodovAP@gmail.com

ПЛЕНОЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ: ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОБМЕН

Рассмотрены задачи трения и теплообмена в одномерных стабилизированных потоках вдоль твердых протяженных поверхностей (модели пленочных течений), когда скорость и температура существенно переменны по нормали к стенке, в то время как продольные изменения пренебрежимо малы. Используется современная версия модели турбулентности с одним дифференциальным уравнением сохранения (уравнением турбулентной энергии) – компактная, ориентированная на инженерные приложения и адекватная сложности рассматриваемого феномена. Пленочные течения с *рециркуляцией* актуальны как специальные режимы конденсационных (или испарительных) устройств энергетических установок (в том числе, аварийные режимы “захлебывания” (“flooding”) [1]), а также как простейшие предельные модели шероховатости технических поверхностей или модели новых технологий тонкопленочных материалов.

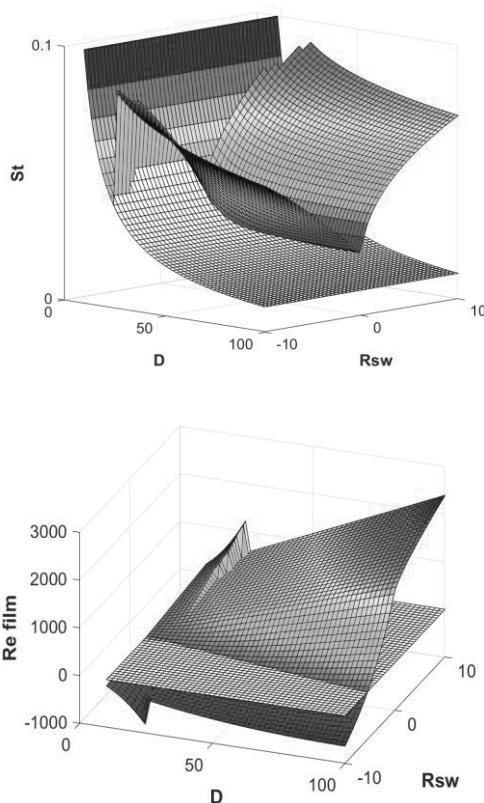


Рис. 1. Теплообмен и гидродинамика в пленке с рециркуляцией.

Математическое описание представлено далее как система дифференциальных уравнений первого порядка для распределений по толщине пленки ($0 \leq Y \leq D$) величин плотности потока турбулентной энергии $J_K(Y)$, турбулентной энергии $K(Y)$ и скорости течения $U(Y)$. Турбулентная вязкость N_T и масштаб турбулентности L_{mix} задаются стандартными формулировками принятой модели. Параметр R_{sw} определен как отношение напряжений трения на внешней границе (τ_s) и на стенке (τ_w).

$$\begin{cases} J'_K(Y) = N_T(Y) \cdot (U'(Y))^2 - \left(C_D \cdot f_\mu(Y) \cdot K(Y)^{3/2} / L_{mix}(Y) + 2K(Y)/Y^2 \right); \\ K'(Y) = -J_K(Y) / (1 + N_T(Y)); \\ U'(Y) = \left((1 - R_{sw})(1 - Y/D) + R_{sw} \right) / (1 + N_T(Y)). \end{cases}$$

Безразмерное представление получено в “переменных стенки”. Динамическая скорость (“скорость трения”) определена через напряжение трения на стенке; введены интегральные характеристики пленочных течений как числа Рейнольдса пленки Re_F и Стантона St :

$$u_* \equiv \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}; \quad Y \equiv \frac{y \cdot u_*}{\nu}; \quad N_T \equiv \frac{v_T}{\nu}; \quad Re_F \equiv \frac{1}{\nu} \int_0^\delta u \, dy = \int_0^D U \cdot dY; \quad St \equiv \frac{\alpha}{\rho c_p u_*}.$$

Специальные процедуры численного интегрирования эффективно обрабатывают нелинейную систему дифференциальных уравнений со свойством сингулярности в начале координат.

Диаграмма $St(D, R_{sw})$ на рис.1 дает *обобщенное* представление теплообмена при различных режимах пленочной конденсации [2] (или пленочного испарения) и, в частности, демонстрирует сильное влияние структурного параметра R_{sw} на ламинарно-турбулентный переход. Горизонтальная плоскость на диаграмме $Re_F(D, R_{sw})$ определяет течение с нулевым расходом; расположенная ниже нее область диагностируется как режим «захлебывания» (flooding) [1].

Представленная модель с уравнением турбулентной энергии перспективна для анализа феномена возмущений на межфазной границе раздела [3].

Список литературы

1. **De Santi, G. F., Mayinger, F.** Steam Condensation and Liquid Holdup In Steam Generator U-Tubes During Oscillatory Natural Circulation, Experimental Heat Transfer, vol. 6, pp. 367-387, 1993.
2. **M. S. Gorpinyak, A. P. Solodov.** Vapor-Gas Mixture Condensation in Tubes. Thermal Engineering, 2019, Vol. 66, No. 6, pp. 388–396. © Pleiades Publishing, Inc., 2019. ISSN 0040-6015.

3. **A. P. Solodov.** Phase interface perturbations in phase transitions. High Temperature, 2017, 55(2), 253-262.

*Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Алексеев В.В.,
Грабежная В.А., Загорулько Ю.И., Камаев А.А.,
Орлов Ю.И.*

Акционерное общество «Государственный научный центр
Российской Федерации
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»
(АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»),
249033 Обнинск, Калужская обл. пл. Бондаренко,1.
sorokin@ippe.ru

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ ТЕПЛОФИЗИКИ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

Изложены результаты актуальных экспериментальных и расчетных исследований в обоснование тепло- физических характеристик и безопасности быстрых реакторов с натриевым и свинцовым теплоносителями. Показано влияние стратифицированного течения теплоносителя на формирование полей скорости и температуры в баке реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем с интегральной компоновкой в номинальном, переходном и аварийном (аварийное расхолаживание) режимах. Демонстрируется развитие деградации тепловыделяющей сборки в процессе развития тяжелой аварии с потерей расхода натрия в реакторе на быстрых нейтронах, блокировка проходных сечений сборки ТВЭЛов и выброс материалов-маркеров за ее пределы. Идентифицированы основные механизмы деградации оболочек имитаторов ТВЭЛов при плавлении ТВС в тяжелой аварии, приведена оценка распределения материалов-маркеров по высоте сборки в ее конечном состоянии.

Показана целесообразность встроенной в бак реактора комбинированной системы очистки натрия, в которой «холодные ловушки» являются обязательным элементом, а «горячие ловушки» обеспечивают ускоренную очистку от кислорода при работе АЭС на номинальном режиме. Представлены результаты экспериментальных теплогидравлических исследований крупномодульного парогенератора «натрий-вода» в различных режимах работы реактора.

Применительно к реактору со свинцовым теплоносителем показано влияние дистанционирующих решеток и измерительного имитатора ТВЭЛ на теплообмен в ТВС активной зоны. На модели парогенератора реакторной установки со свинцовым теплоносителем установлено, что

значения температуры пара на выходе из обоих коллекторов совпадают. Совпадает и температура свинца на выходе из опускного участка и в основном тракте свинца. В опытах не обнаружено пульсаций расхода питательной воды, давления в контурах, что свидетельствует об устойчивости режимов при работе на неполной нагрузке. Анализируется состояние и перспективы развития технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей.

Показана принципиальная возможность обеспечения требуемых параметров высокотемпературного быстрого реактора с натриевым теплоносителем для производства большого количества водорода. Анализируются проблемы дальнейших теплофизических исследований.

Ступакова А.В., Дедов А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПРИ КИПЕНИИ НА МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Пузырьковое кипение является одним из наиболее эффективных способов теплоотвода от энергонапряженных поверхностей. Нанесение микропокрытий на поверхность позволяет увеличивать критический тепловой поток (КТП) в 2-3 раза по сравнению с гладкой поверхностью.

В работе [1] получена формула для расчета КТП на основании модели, учитывающей, что приток жидкости к границе сухого пятна обусловлен градиентом капиллярного давления. В модели обосновывается, что вблизи кризиса кипения, когда размер сухого пятна намного превосходит радиус равновесного парового зародыша и толщину жидкой макропенки δ_0 , которая выступает в качестве основного характерного размера. Если процесс происходит на структурированной поверхности, то к градиенту давления за счет кривизны мениска пленки, добавляется градиент капиллярного давления в микроканалах. С ростом теплового потока на стенке толщина пленки уменьшается, а диаметр парового пузыря возрастает, происходит к необратимому росту размера сухого пятна, что определяет наступление кризиса теплообмена. Учитывая влияние микроструктуры получена формула (1) для определения доли увеличения КТП на структурированной поверхности с регулярной морфологией относительно КТП на гладкой поверхности:

$$\frac{q_{кр.пов}}{q_{кр}} = \left(1 + \frac{k_1 \left(\frac{\sigma}{\rho G} \right)^{0.4} \left(\frac{\mu}{g \Delta \rho} \right)^{0.8}}{(a+s)^2} \right) \quad (1),$$

где $q_{кр}$ – КТП на базовой (гладкой) поверхности; $q_{кр.пов}$ – КТП на структурированной поверхности.

На рис. 1 представлены результаты расчетов КТП по (1), выполненные для работ [2-7], где получены значения КТП на регулярных микроструктурированных поверхностях, в большинстве своем при кипении воды при атмосферном давлении. Результаты сопоставления расчетов по (1) и экспериментальных данных

показывают значительный разброс, достигающий 50%. Уравнение (1) позволяет оценить возможность увеличения КТП, для более серьезных выводов необходима апробация расчетов на большем массиве данных.

Список литературы:

1. Л.А.Сукомел, В.В.Ягов. Возможности повышения критических тепловых потоков при кипения на поверхностях с пористыми покрытиями (обзор) \ \ Вестник МЭИ, 2017. С. 55-67.
2. А.В. Щелчков, Р.Р.Хакимянов. Теплоотдача на микроструктурированных поверхностях при кипении воды в условиях свободной конвекции. 2014. С.263-266.
3. Kuang-Han Chu, Ryan Enright, Evelyn N. Wang. Structured surfaces for enhanced pool boiling heat transfer \ \ American Institute of Physics, 2012. 5 с.
4. Lining Dong, Xiaojun Quan, Ping Cheng. An experimental investigation of enhanced pool boiling heat transfer from surfaces with micro/nano-structures.\ \ International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013
5. Navdeep Singh Dhillon, Jacopo Buongiorno, Kripa K. Varanasi. Critical heat flux maxima during boiling crisis on textured surfaces \ \ NATURE COMMUNICATIONS, 2015. С. 189-196.
6. Seol Ha Kima, Gi Cheol Leeb, Jun Young Kanga, Kiyofumi Moriyamaa, Moo Hwan Kima,c, Hyun Sun Park. Boiling heat transfer and critical heat flux evaluation of the pool boiling on micro structured surface \ \ International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015. С. 1140-1147.
7. Xianbing Ji, Jinliang Xu, Ziwei Zhao, Wolong Yang. Pool boiling heat transfer on uniform and non-uniform porous coating surfaces.\ \ Experimental Thermal and Fluid Science, 2013. С. 198-212.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 19-19-00410

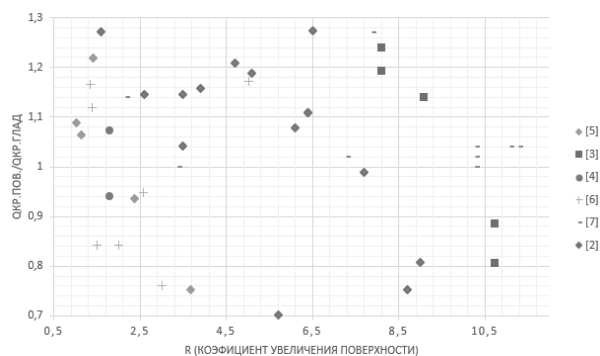


Рисунок 1. Зависимость $q_{кр.экспер}/q_{кр.расчет}$ от R (коэффициент развития поверхности)

Сукомел Л.А., Кабаньков О.Н., Анкудинов В. Б.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
ms.las2016@mail.ru, kon09.tiger@yandex.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО КОНТУРА ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

На практике системы с естественной циркуляцией запускаются из состояния покоя, и всегда требуется конечное время, прежде чем система достигнет оптимального расчетного режима эксплуатации. При этом в начальный период времени циркуляция теплоносителя осуществляется в режиме однофазной конвекции. Дальнейший режим теплообмена будет зависеть от уровня тепловой нагрузки. При достаточно высоких плотностях теплового потока на стенке в зоне обогрева происходит закипание теплоносителя и реализуется его двухфазное течение в подъемном участке. Расчетный режим циркуляции определяется при проектировании контура в зависимости от его назначения. В ряде случаев, например при запуске аварийной системы пассивного охлаждения ядерного реактора, надежное прогнозирование времени выхода системы на расчетный режим и динамика изменения теплогидравлических характеристик имеют принципиальное значение. Кроме того, на практике возможны различные нештатные ситуации, когда может произойти нарушение баланса между подводимой тепловой мощностью и мощностью источника охлаждения. В этом случае контур естественной циркуляции переходит в нестационарный режим работы с нарушением расчетных параметров циркуляции.

В работе проведено численное исследование нестационарных режимов работы однофазного контура естественной циркуляции. Как известно, расход в контуре естественной циркуляции не задается, а является результатом внутренних тепловых процессов. При однофазной конвекции в контуре поля скорости и температуры перестраиваются по всей длине зоны обогрева в условиях сильной переменности теплофизических свойств жидкости (прежде всего, вязкости), вследствие чего сложным образом меняются касательные напряжения на стенке, а следовательно, и коэффициент сопротивления трения. Кроме того, согласно проведенным ранее авторами численным расчетам, коэффициент сопротивления трения зависит также от геометрии контура, в частности от гидравлического диаметра обогреваемой секции. Показано, что коэффициент сопротивления трения, применяемый в гидравлических расчетах, не может быть описан простой зависимостью вида $\xi = a/Re^b$. В связи с сохраняющейся неопределенностью выбора обоснованных соотношений для расчета трения и теплообмена при использовании

традиционного 1D приближения можно не предсказать поведение системы с естественной циркуляцией достаточно удовлетворительно, особенно в нестационарных режимах. В этой ситуации альтернативой является численное моделирование.

Расчеты выполнены применительно к лабораторному экспериментальному контуру с вертикальной обогреваемой (подъемной) секцией, в качестве которой использовалась электрообогреваемая труба с круглым поперечным сечением. Одна из особенностей конструкции контура – относительно большое отношение площадей поперечных сечений опускной и подъемной секций, что снизило гидравлические потери в опускной линии до пренебрежимо малых значений. Модельный контур представлял собой замкнутую по жидкости систему из круглой и кольцевой труб. Круглая (обогреваемая) труба расположена соосно внутри кольцевой трубы, моделирующей опускной участок контура. Ширина кольцевого зазора и высота щелевых зазоров на горизонтальных участках задавались таким образом, чтобы не принимать во внимание гидравлические потери в опускной и горизонтальных линиях. Таким образом, данная расчетная модель обеспечивает соответствие условий циркуляции в обогреваемых участках модельного и экспериментального контуров и позволяет решить задачу в двумерной постановке.

По результатам расчета полей скорости и температуры получена количественная информация об изменении во времени температур жидкости и обогреваемой поверхности, расхода жидкости и движущего напора в стартовых режимах циркуляции при различном соотношении длин зоны обогрева и адиабатного участка в подъемной секции контура, а также при разных соотношениях подводимой тепловой мощности к мощности источника охлаждения.

Работа выполнена на кафедре ИТФ НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-08-01044а.

Супельняк М.И. ¹

¹ Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана,
248000, Калуга, Баженова 2
max2901@mail.ru

ДВУМЕРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И УПРУГИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ШАРЕ И ПРОСТРАНСТВЕ СО СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТЬЮ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА

Проведено исследование установившихся колебаний температуры и вызванных ими термоциклических напряжений в областях, ограниченных снаружи или изнутри сферической поверхностью. Предполагалось, что условия теплообмена с внешней средой зависят от времени и зенитного угла. В таких условиях температура, перемещение, деформации и напряжения являются функциями радиуса r , зенитного угла ψ и времени t . Интерес к поставленной пространственной задаче связан с тем, что при максимальной простоте постановки ее решение позволяет изучить влияние пространственно неоднородных условий теплообмена на колебания температуры и термоциклические напряжения в термическом слое в условиях, когда форма граничной поверхности остается неизменной, и проверить возможность использования для их расчета классических решений [1,2,3].

Наряду со сферической поверхностью одинаковую форму, т.е. одинаковые главные кривизны во всех точках, имеет круглая цилиндрическая поверхность, у которой одна из главных кривизн равна нулю. Циклическая задача термоупругости для областей, ограниченных поверхностью круглого цилиндра, ранее рассматривалась автором в [4]. У сферической поверхности обе главные кривизны равны.

Колебания температуры и термоциклические напряжения определялись из решения несвязанной квазистатической циклической задачи термоупругости. В задаче теплопроводности на границе области задавалось одно из классических граничных условий – I, II или III рода. В задаче теории упругости граница области считалась свободной от напряжений. Решение задачи было найдено с помощью метода разделения переменных в виде рядов Фурье по переменным ψ и t . Для решения третьей краевой задачи теплопроводности при неоднородной нестационарной теплоотдаче был использован подход, основанный на методе автора из работы [5]. Для решения задачи теории упругости применялся тот же способ, что и в исследованиях [4,6]. Сравнение расчетов колебаний температуры и термоциклических напряжений, проведенных с помощью пространственных и одномерных решений

задачи термоупругости, показало, что в ряде случаев допустимо использовать одномерные решения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00090.

Список литературы

1. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
3. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. М.: Физматгиз, 1963. 252 с.
4. Супельняк М.И. Квазистатические двумерные термоциклические напряжения в упругом полупространстве, неограниченном цилиндре и пространстве с цилиндрическим каналом // Материалы XXV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, 18 – 22 марта 2019 г., Вятчи. Т. 1. М.: ООО «ТРП», 2019. С. 192–195.
5. Супельняк М.И. Колебания температуры полупространства при пространственно-неоднородных условиях теплообмена // ТВТ. 2019. Т. 57. № 5. С. 713–726.
6. Supel'nyak M. Influence of spatial inhomogeneity of environment temperature on temperature oscillations and thermocyclic stresses in elastic half-space // EPJ Web of Conferences. 2019. 196, 00027. 8 p. (<https://doi.org/10.1051/epjconf/201919600027>)

Счастливец А.И., Борзенко В.И.

Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОМ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Водород в перспективе может стать одним из основных средств накопления энергии ВИЭ. Его преобразование в электрическую энергию в настоящее время происходит в топливных элементах, однако при увеличении его производства наиболее эффективными могут стать схемы с использованием сжигания водорода. Важным качеством водорода является то, что при его сжигании не образуются оксиды и диоксиды углерода, а также токсичные вещества, образуемые при сжигании

углеводородного топлива. Единственным вредным соединением, образующимся при сгорании водорода является NO_x. Исследования, проведенные различными авторами показывают, что при сжигании водорода в воздухе могут образовываться значительные количества NO_x до 15...28 ppm [1; 2; 3]. Кроме того, установлено, что значительное влияние на образование NO_x оказывает изменение давления в камере сгорания и коэффициента избытка окислителя [4; 5]. В работе [6] рассмотрено влияние резкого охлаждения продуктов реакции водорода и кислорода путем добавления в них большого количества воды. Показано, что при резком охлаждении происходит увеличение количества недогоревшего водорода, что объясняется авторами эффектом закалки потока.

Представлены результаты экспериментальных исследований в водородно-воздушном газогенераторе. В результате исследований установлено, что резкое смешение воздуха с продуктами реакции горения, температура которых может достигать 3600 К, приводит к их сильному разбавлению и образованию больших количеств непрореагировавшего водорода (до 3,5 %), при этом использование ступенчатой схемы подачи воздуха снизило количество непрореагировавшего водорода до 1,4 %. Установлено, что повышение давления в камере сгорания приводит к увеличению полноты сгорания водорода и практически не оказывает влияния на образование оксидов азота. Показано, что попадание молекул азота непосредственно в зону горения происходит к его интенсивному окислению, а для снижения образования оксидов азота его подача должна осуществляться на удалении не менее 4-х диаметров камеры сгорания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 05.607.21.0313 (уникальный идентификатор RFMEFI60719X0313).

Список литературы

1. Maurya R.K., Akhil N. Development of a new reduced hydrogen combustion mechanism with NO_x and parametric study of hydrogen HCCI combustion using stochastic reactor model // Energy Conversion and Management. 2017. Т. 132. — С. 65-81.
2. Khaitan S.K., Raju M. Dynamics of hydrogen powered CAES based gas turbine plant using sodium alanate storage system // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. Т. 37. № 24. — С. 18904-18914.
3. Han D.-S., Kim G.-B., Kim H.-S., Jeon C.-H. Experimental study of NO_x correlation for fuel staged combustion using lab-scale gas turbine

- combustor at high pressure // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014. Т. 58. — С. 62-69.
4. Ditaranto M., Anantharaman R., Weydahl T. Performance and NO_x Emissions of Refinery Fired Heaters Retrofitted to Hydrogen Combustion // *Energy Procedia*. 2013. Т. 37. — С. 7214-7220.
 5. Andreini A., Facchini B., Innocenti A., Cerutti M. Numerical Analysis of a Low NO_x Partially Premixed Burner for Industrial Gas Turbine Applications // *Energy Procedia*. 2014. Т. 45. — С. 1382-1391.
 6. Sternfeld H.J., Heinrich P. A demonstration plant for the hydrogen/oxygen spinning reserve // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1989. Т. 14. № 10. — С. 703-716.

Таиров Э.А., Сафаров А.С.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Иркутск, 664033, Лермонтова, 130
alexssss@list.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРСОДЕРЖАНИЯ В СЛОЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ МЕТОДОМ ОТСЕЧЕНИЯ ПОТОКА

Введение. Объемное паросодержание и перепад давления двухфазного парожидкостного потока являются его основными параметрами в описании характеристик при расчетах аппаратов тепловой и ядерной энергетики, нефтегазовых технологий, химических реакторах. Разработан целый ряд методик измерения паросодержания двухфазного потока, основанных на использовании различных физических принципов. Некоторые из них применены для исследования течений в пористых средах. В данной работе для измерения среднего истинного объемного паросодержания применен метод отсечения потока [1].

Описание экспериментальной установки. Рабочий канал экспериментального стенда представляет собой вертикальный участок трубы из нержавеющей стали с внутренним диаметром 39 мм. На вход канала подается пароводяная смесь с заданными характеристиками. В составе канала установлен участок отсечения внутренним объемом 250 мл. Данный участок синхронно отсекается двумя шаровыми кранами с пневмоприводами. Внутренний объем участка заполнен исследуемой насадкой, в нашем случае это были стальные шары диаметрами 2 мм или 4 мм. В отсекаемом участке устроена врезка, через которую, при конденсации пара в отсеченном объеме, поступает добавочная вода из мерного сосуда. В стенде применены датчики давления ПД-100 фирмы ОВЕН, терморпары ХК и термометр типа РТ100, шаровые высокотемпературные краны Bonomi WAFER для температуры рабочей среды до 198°С, с пневмоприводами Valbia.

Режимные параметры. Были проведены эксперименты без засыпки и с засыпкой из стальных шаров диаметром 2 мм и 4 мм при давлениях: 0.3; 0.6 МПа. Массовые расходы составили 100; 200 кг/м²с. Массовое паросодержание варьировалось в диапазоне: 0.005 - 0.08.

Результаты. Истинное объемное паросодержание определялось на основе объема поступившей добавочной воды. На рисунке 1 приведены полученные значения истинного объемного паросодержания при различных расходных массовых паросодержаниях. Результаты измерений показали высокую степень совпадения значений паросодержания в условиях наличия и отсутствия упаковки шаровых частиц в трубе. В связи с этим были рассмотрены

возможности описания полученных опытных данных с привлечением уже известных рекомендаций по расчету истинного объемного паросодержания в трубах. В качестве основных были взяты достаточно широко известные формулы из работ Миропольского[2], Федорова[3], Премоли[4].

Работа выполнена на ЦКП «Высокотемпературный контур» в рамках научного проекта Ш.17.1.3 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310443-5.

Список литературы

1. **Таиров Э. А., Маслов А. И., Сафаров А. С., Гаманец В. Г.** Способ определения истинного объемного паросодержания // Патент на изобретение номер 2685016, Россия, 2019.
2. **Миропольский З. Л., Шнеерова Р. И., Карамышева А. И.** Паросодержания при напорном движении пароводяной смеси с подводом тепла и в адиабатических условиях // Теплоэнергетика, 1971, № 5, с. 60—64.
3. Процессы генерации пара на атомных электростанциях / Л.Ф. Федоров, Н.Г. Рассохин. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. **Premoli A., Di Francesco D., Prina A.** Una correlazione adimensionale per la determinazione della densita di miscele bifasiche // La Termotecnica Vol. XXV - N. 1 - 1971 17-26.

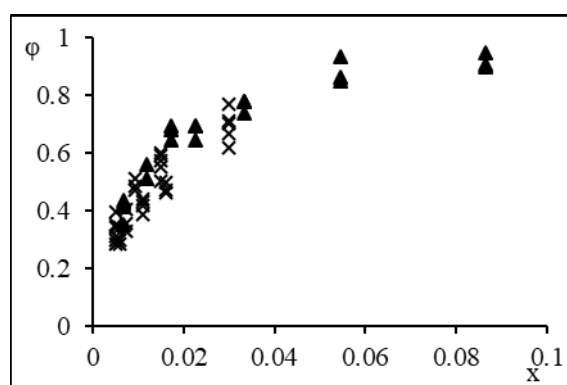


Рис. 1. Зависимость истинного объемного паросодержания ϕ от массового расходного x при давлении 0.3 МПа и приведенной массовой скорости 100 кг/м²с в канале: с засыпкой из шаров диаметром 2 мм — ▲, без засыпки — ×.

Таиров Э.А., Хан П.В.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Иркутск, 664033, Лермонтова, 130

tairov@isem.irk.ru

МОДЕЛИ СО СКОЛЬЖЕНИЕМ ФАЗ В ГИДРОДИНАМИКЕ ЗЕРНИСТЫХ СРЕД

Введение. В последнее время активно изучается течение пароводяной смеси в засыпках из шаровых частиц, имеющее применение в энергетике, химической промышленности и других областях промышленного производства. При этом одной из основных задач является установление связи между расходом и перепадом давления. Среди всего разнообразия применяемых подходов, можно выделить класс методов, опирающихся на представление о раздельном течении жидкой и паровой фаз с различными средними скоростями.

Модели и данные. Сорокин [1] применил метод Локкарта-Мартинелли к течению пароводяной смеси в шаровых засыпках, введя свои замыкающие соотношения. Ли и др. [2] сравнили ряд методов, основанных на уравнениях Дарси-Форхгеймера в применении к течению воздушно-водяной смеси через засыпки. Таиров и Хан [3] обобщили данные по течению пароводяной смеси через шаровые засыпки при помощи газодинамической модели. В данной работе проведено сравнение предсказательных способностей модели Сорокина (S), модели Дарси-Форхгеймера (F) и газодинамической модели (T) на данных, полученных различными исследователями. Диапазон изменения давления составил 0,6-15 МПа, расходного массового паросодержания – 0,002-0,3, массовой скорости – 120-1100 кг/(м²с), диаметра шаровых частиц – 2-4 мм, высоты засыпки – 50-355 мм. Модели S и F содержат выражения градиентов давления для жидкой и паровой фаз. В модели F требуется равенство градиентов, поскольку рассматривается одновременное течение двух фаз в составе смеси. В модели S градиенты различны, поскольку рассматривается не совместное течение фаз. Модель T содержит единое выражение для смеси в целом при плотности смеси, выраженной через коэффициент скольжения фаз. В данной работе были рассмотрены перепады давления до 85% от входного давления с существенным изменением градиента давления вдоль засыпки.

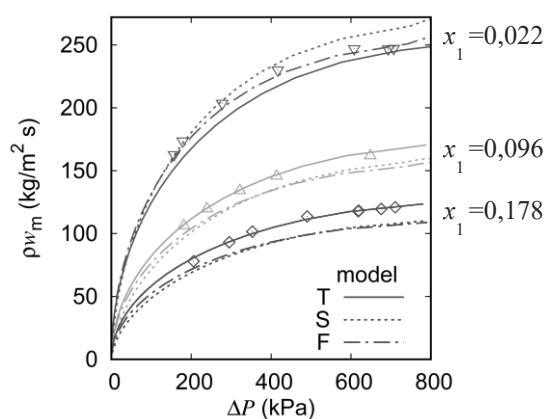


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и расчётных значений массовой скорости смеси в зависимости от перепада давления

Поэтому при вычислении перепада давления по заданной массовой скорости в моделях S и F вместо вычисления по среднему было применено численное интегрирование, а при решении обратной задачи потребовалось численное решение нелинейного уравнения. Модель T опирается на политропное приближение процесса расширения смеси в засыпке и даёт аналитическое решение как прямой, так и обратной задач.

Результаты и выводы. Сравнение моделей проводилось на основе расчёта массовой скорости при заданном перепаде давления. Установлено, что модель S имеет точность 7% и наиболее точно приближает данные при средних значениях массового расходного паросодержания (рис. 1). Модель F имеет точность около 6% при давлениях ниже 5 МПа, и 10-15% при больших давлениях. Модель T имеет среднюю погрешность 5%. Учитывая также, что модель T позволяет более точно воспроизводить нелинейный профиль давления, можно заключить, что ее применение в рассмотренном диапазоне условий наиболее предпочтительно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-29-10019).

Список литературы

1. **Сорокин В.В.** Расчет двухфазного адиабатического течения в шаровой засыпке // ТВТ. 2007. Т. 45. № 2. С. 261–266.
2. **Li L., Zou X., Wang H., Zhang S., Wang K.** Investigations on two-phase flow resistances and its model modifications in a packed bed // Int. J. of Multiphase Flow. 2018. Т. 101. С. 23 - 34.
3. **Tairov E.A., Khan P.V.** Hydraulic and gas-dynamic models of a steam-water mixture flow in a granular bed // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Т. 1382. 12101.

Тарасевич С.Э.¹, Шишкин А.В.²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ,
420111, Казань, Карла Маркса, 10

² Общество с ограниченной ответственностью «ДоминантПроект»,
420127, Казань, Дементьева, 2Б, к.4
ts.55@mail.ru

РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ХЛАДАГЕНТА В КАНАЛЕ С НЕПРЕРЫВНОЙ ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА

Исследованию теплоотдачи при кипении жидкости в каналах с закруткой потока посвящено достаточно много работ, которые выполнены с использованием классических скрученных лент Lorina, R. F., Bergles, A.E. (1969 г.), Agrawal, K.N., Varma, H.K. (1986 г.), Щукин В.К. (1994 г.), Kanizawa, F.T., Mogaji, T.S., Ribatski, G. (2016 г.), и др. В большинстве из них в качестве рабочего тела использовались галогенуглеводородные хладагенты при горизонтальном расположении рабочего участка с использованием электрического нагрева. Для расчета коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции R12 в каналах со вставленной скрученной лентой Дженсен и Бенслер (1986 г.) рекомендуют использовать корреляцию Лопины и Берглеса (1969 г.). В последнее время широкое применение получила зависимость Манглика-Берглеса (1993 г.). В отечественной литературе также используется обобщающая зависимость В.К. Щукина (1970 г.).

Коэффициент теплоотдачи при кипении хладагентов в прямолинейных трубах может быть рассчитан по методикам Лю-Винтертона (1991 г.), Войтана (2005 г.), Кандликара (1990 г.) и Стюшина (1962 г.). Теплоотдача в каналах с закруткой при кипении теплоносителя зависит от множества параметров: геометрических, режимных, теплофизических свойств жидкости и материала поверхности нагрева, от способа обработки материала и шероховатости поверхности нагрева. Большинство опубликованных работ ограничиваются небольшими значениями числа Re при движении теплоносителя. Для кипящих закрученных потоков можно рассмотреть ряд зависимостей, хотя наибольшее распространение получила методика Агравала и Вармы (1986 г.). Минеевым (2006 г.) были обработаны экспериментальные данные, полученные им и рядом авторов, которые позволили получить обобщающую зависимость в широком диапазоне изменения чисел Re и Pr . Автором учтено влияние на теплоотдачу: давления, плотности теплового потока, скорости потока и закрутки. Авторами данной работы было выполнено экспериментальное исследование теплоотдачи при

вынужденном движении воды и хладагента R134a в каналах со вставленными гладкими и оребренными [1] скрученными лентами при $Re = 30000 \div 120000$; $q = 0.7 \div 50$ кВт/м² [2]. Для учета влияния режимных параметров при кипении принято модифицированное число $Re_* = Bo Re = qd / \mu r$, а расчетное соотношение представлено в виде $Nu = 10.33 Re_*^{0.7} K_p^{0.2} (s/d)^{-0.15} Pr^{0.43}$. Как показало экспериментальное исследование с применением оребренных скрученных лент теплоотдача наиболее сильно зависит от шага расположения ребер t и их высоты h . Влияние угла выражено менее сильно и находится в пределах погрешности измерений, поэтому в конечный вид формулы для теплоотдачи входят два геометрических параметра ребер (высота и шаг), объединенных в один влияющий фактор h/t . Обобщающая зависимость имеет вид $Nu = Nu_{эксп} / Nu_0 = 1 + 59 (h/t)^{1.5}$, здесь Nu_0 расчет по зависимости Манглика-Берглеса (1993 г.).

Список литературы

1. Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Шишкин А.В. Особенности теплогидравлических характеристик каналов с модифицированными скрученными ленточными вставками // Тепловые процессы в технике. 2018. Т.10. №3-4. С.107-115.
2. Тарасевич С.Э., Шишкин А.В., Гиниятуллин А.А. Теплоотдача в канале с оребренными скрученными лентами // ТВТ. 2020. Т.58. № 1. с. 107–112

Терехов В.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 1

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНОМ В ОТРЫВНЫХ ПОТОКАХ

Отрывные течения широко используются в различных технических устройствах в качестве одного из основных методов интенсификации процессов переноса. Изучению структуры течения и тепломассопереноса при отрыве ламинарного или турбулентного потока за различными преградами посвящено огромное число работ. С современным состоянием проблемы, а также с потенциальными возможностями различных интенсификаторов теплообмена можно ознакомиться, например, в монографии [1,2]. В то же время использование отрывных потоков, как правило, сопряжено с ростом гидравлических потерь, а также с формированием плохо продуваемых застойных зон с пониженным теплообменом. Поэтому, в данной проблеме важное значение приобретают работы по изучению пассивных методов управления отрывом потока путем введения дополнительных возмущений различной

интенсивности непосредственно в зону рециркуляционного течения. Работы этого направления в последние годы стремительно развиваются [3-5] и они направлены на экспериментальное и численное исследования возможностей воздействия возмущений малого масштаба на характер деформации глобального отрывного течения. К данной проблеме непосредственное отношение имеет также и воздействие на отрыв высокой турбулентности внешнего потока [2] или специально генерируемые периодические возмущения различной частоты и интенсивности [6]. Интенсивно развиваются исследования по воздействию вихрегенераторов различных размеров и форм на усиление теплообмена и, особенно в каналах компактных теплообменников. Результаты этого направления представляют несомненный интерес для понимания сложных процессов взаимодействия разномасштабных турбулентных отрывных структур.

В работе рассмотрен широкий класс задач по взаимодействию отрывных потоков. В качестве классической задачи изучается влияние на отрыв потока за прямой ступенькой с помощью установленного вверх по потоку прямоугольных преград различной высоты. Показаны различные сценарии развития течения и теплообмена за ступенькой при изменении высоты малой преграды и ее местоположения. При этом размеры отрывной зоны, а также интенсивности теплообмена, могут, как возрастать, так и снижаться. Еще более сложные сценарии течения наблюдаются для осциллирующих преград, а также для разрезных ребер – зубцов или табов [4,5,7]. Кроме размера по высоте большое влияние на характеристики течения могут оказывать шаг их расположения в трансверсальном направлении, а также форма самих зубцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 18-19-00161) и гранта РФФИ (проект 18-58-00011).

Список литературы

1. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы / Ю.И. Давыдов, Б.В. Дзюбенко, Г.А. Дрейцер и др.; Под ред. В.М. Иевлева. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
2. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках / Терехов В.И., Богатко Т.В., Дьяченко А.Ю. и др.; Под ред. В.И. Терехова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 239 с.
3. **Терехов В.И., Смутьский Я.И., Шаров К.А.** Экспериментальное исследование структуры отрывного течения за уступом при наличии пассивного возмущения // ПМТФ. 2016. Т. 57, № 1, с. 207-215
4. **Park H., Jeon W.-P., Choi H., Yoo J.Y.** Mixing enhancement behind a backward-facing step using tabs// Physics of Fluids 2007. Vol. 19. 105103.

5. Дьяченко А.Ю., Жданов В.Л., Смульский Я.И., Терехов В.И. Управление отрывным потоком за уступом с помощью разрезных ребер // ИФЖ.-2017. т. 90, №3. с. 575-583.
6. Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М. Отрыв пульсирующего потока // ДАН. 2007. Т. 417. С. 760–763.
7. Дьяченко А.Ю., Жданов В.Л., Смульский Я.И., Терехов В.И. Экспериментальное исследование теплообмена в отрывной области за обратным уступом при наличии табов // Т и А, 2019, т.26, № 4, 549-560.

Терехов В.И.¹, Экаид А.Л.², Яссин Х.Ф.³

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 1

² Технологический университет, Багдад, Ирак

³ Технологический Институт Хавижа, Северного технического Университета, Киркук, Ирак

ОТРЫВ ПОТОКА ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Естественно-конвективные течения в вертикальных каналах со свободными нижней и верхней границами имеют место во многих инженерных приложениях, например, при охлаждении электрического и электронного оборудования, в ядерных реакторах, в системах вентиляции домов, дымовых трубах, а также во многих энергетических аппаратах. Течение и теплообмен в вертикальных прослойках с гладкими стенками изучено достаточно подробно [1-4], чего нельзя сказать о каналах с оребренными поверхностями. В литературе в большей мере представлены данные по замкнутым прослойкам с дифференциальным подогревом боковых стенок. Каналы с открытыми границами, картина течения в которых имеет принципиально иной вид по сравнению с замкнутыми прослойками, изучались фрагментарно, несмотря на большой прикладной интерес таких исследований.

В работе представлены результаты численного расчета двумерной свободной ламинарной конвекции и теплообмена между двумя параллельными изотермическими пластинами при наличии на поверхности канала одиночного ребра. Исследования проведены для канала с удлинением $AR = L/w = 10$, где L – высота канала, а w – расстояние между пластинами. Бесконечно тонкое адиабатное ребро располагалось на одной или на противоположных стенках как посередине высоты канала, так и вариации расстояния от входа. Относительная высота ребра при этом изменялась в диапазоне $l/w = 0 \div 0.8$, где l – высота ребра. Температура стенок была выше ее значений в окружающей среде, а число Релея изменялось в диапазоне $Ra = 10^2 \div 10^5$.

Основное внимание уделено изучению влияния высоты ребра и числа Релея на локальный и интегральный теплообмен и число Рейнольдса в канале (конвективную тягу в канале). Показано принципиальное отличие распределения теплоотдачи по высоте канала на стенке с ребром и гладкой поверхности. Проведены сопоставления результатов расчета со случаем симметричного распределения ребер на обеих стенках с суммарной высотой, равной одиночному ребру.

Главным выводом работы является значительное снижение числа Рейнольдса и интегрального числа Нуссельта в канале с оребрением, что обусловлено ростом гидравлического сопротивления канала за счет установки преграды. Особенно сильно установка ребра сказывается в области малых чисел Релея, когда конвекция является слабой. При этом симметричный случай установки ребер в канале практически не отличается по интегральному теплообмену и числу Рейнольдса от несимметричного, когда ребро расположено только на одной стенке. Полученные данные позволяют качественно и количественно прогнозировать тепловой и аэродинамический режим течения в вертикальных каналах при наличии ребер на поверхности в различных инженерных приложениях. Отметим также, что большая часть вопросов требует более дальнейших детальных исследований. К наиболее актуальным проблемам можно отнести влияние параметра удлинения AR , формы канала и препятствий, их месторасположения и числа, а также теплопроводности материала преград.

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА ПРИ ФИНАНСОВОЙ ПОДДЕРЖКЕ РФФИ
(КОД ПРОЕКТА 20-08-00717) И СРЕДСТВ ГБ (ПРОЕКТ АААА-А17-
117030310010-9).

Список литературы

1. **Elenbaas W.** Heat dissipation of parallel plates by free convection // *Physica*, 1941, IX/1, pp.2–28.
2. **Bar-Cohen A., Rohsenow W.M.**, Thermally optimum spacing of vertical, natural Convection Cooled, Parallel Plates // *J. Heat Transfer*, 1984, vol. 106, pp. 116- 123.
3. **Терехов В.И., Экаид А.Л.** Турбулентная свободная конвекция между вертикальными изотермическими пластинами с несимметричным нагревом // *Теплофизика и Аэромеханика*. 2013. том 20, № 2, с.153-164.
Terekhov V.I., Ekaid A.L. Turbulent free convection between vertical isothermal plates with asymmetrical heating // *Thermoph. and Aeromechanics*, 2013, vol. 20, No. 2, pp. 151-162.
4. **Terekhov, V.I., Ekaid, A.L., Yassin, K.F.** Laminar free convection heat transfer between vertical isothermal plates // *J. Eng. Thermophys.*, 2016, Vol. 25, No. 4, pp 509–519.

Терехов В.И.^{1,2}, Золотухин А.В.^{1,2}, Чохар И.А.¹

¹ Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный технический университет,
630073, Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20
zoloav.hm@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА В КОМПЛАНАРНЫХ КАНАЛАХ

Компланарные каналы представляют собой особую конструкцию с перекрестно расположенными ребрами, выполненными на противоположных поверхностях канала, и обеспечивающих перекрестное течение теплоносителя [1]. Работы некоторых авторов, выполненные по данной тематике, говорят о значительном росте теплообмена, около 3 – 6 раз, при использовании компланарных каналов вместо гладких, но взамен это ведет к значительному увеличению гидравлического сопротивления. Существенное улучшение теплообмена крайне актуально в отраслях промышленности, в которых используются агрегаты с высокими тепловыми нагрузками, которым необходим отвод тепла. На данный момент компланарные каналы активно используются в охлаждаемых лопатках ГТД (газотурбинных двигателей), камерах ЖРД (жидкостных ракетных двигателей), зеркалах лазеров и рекуперативных теплообменниках [2, 3].

На сегодняшний день проблема заключается в отсутствии экспериментальных работ по изучению локальных эффектов внутри компланарных каналов. Авторами не было обнаружено работ, которые могли бы дать точное описание картины всех процессов, происходящих в ячейках, образованных перекрещенными ребрами. Поэтому целью данной экспериментальной работы является изучение локальных эффектов внутри компланарных каналов и обнаружение возможных местных феноменов. Также актуальной задачей является оптимизация теплогидравлических параметров компланарных каналов, а именно, увеличение теплосъема с нагреваемой поверхности при неизменном или пониженном гидравлическом сопротивлении, что входит в задачи данной исследовательской работы. Основное внимание в проведенных исследованиях уделялось экспериментальному изучению тонкой структуры течения, турбулентности и тепловых полей как в отдельной ячейке, так и группе ячеек компланарных каналов.

Экспериментальная установка. В экспериментах используются бесконтактные оптические диагностические методы, такие как лазер-доплеровский измеритель скорости (ЛДИС) и тепловизионная техника с омическим нагревом тонких теплопроводящих слоев. Были созданы три

экспериментальных участка с различным углом скрещивания ребер – 60° , 90° и 120° . Экспериментальный стенд содержит все элементы аэродинамической трубы для создания качественного потока: генератор высокого напора, диффузор, поворотное колено с разделителями потока и конфузор, выполненный по профилю Витошинского. На стенде, до и после экспериментального участка, было расположено несколько точек отбора статического давления и трубка Пито-Прандтля.

В проведенных экспериментах обнаружено, что гидравлическое сопротивление в компланарных каналах в несколько раз больше, чем в гладком канале – от 8 до 20 раз, в зависимости от числа Рейнольдса и угла скрещивания ребер. Также использование метода ЛДИС показало, что течение в ячейках компланарных каналов является чрезвычайно сложным и трехмерным с преобладанием продольной и тангенциальной компонент скорости при наличии больших градиентов параметров как в окрестности стенки, так и на границе смещения встречных потоков.

Экспериментальная установка была создана при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-38-90030), а исследования проведены за счет средств Госзадания ИТ СО РАН (проект АААА-А17-117030310010-9).

Список литературы

1. **Александренков В.П.** Теплогидравлическая эффективность применения компланарных трактов охлаждения камер ЖРД //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2015. № 2 (101). С. 44-56.
2. **Ануров Ю.М.** Эффективные методы интенсификации теплообмена в системах охлаждения лопаточных аппаратов высокотемпературных газовых турбин //А/р диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Ст.-Петербург. гос. политехн. ун-т. Санкт-Петербург, 2005
3. **Соколов Н.П., Полищук В.Г., Андреев К.Д.** Гидравлические сопротивления в каналах прямоугольного сечения со скрещивающимся ребрением // Ст.-Петербург. гос. политехн. ун-та. 2013. № 2 (171). С. 85-94.

*Грибин В.Г.¹, Тищенко А.А.¹, Алексеев Р.А.¹, Гаврилов И.Ю.¹, Попов В.В.¹,
Тищенко В.А.¹*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
tishchenkova@mpei.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ ЧЕРЕЗ ЩЕЛИ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ В ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЯХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Внутриканальная сепарация в влажно-паровых отсеках паровых турбин является эффективным способом снижения эрозионного износа лопаточных аппаратов, особенно последних ступеней, для которых характерны высокие скорости и значения влажности парового потока. При этом, помимо удаления самой водяной пленки, из проточной части также удаляется часть основного потока пара, что приводит к дополнительным потерям, а также локальному аэродинамическому воздействию в пристеночной области вблизи сепарационной щели. Характер влагоудаления определяется рядом параметров – характеристики жидкой пленки и основного потока перед сепарационной щелью, перепад давления между рабочим телом и средой в сепарационной камере. Кроме того, немаловажную роль играет непосредственно геометрия сепарационной щели. В работе рассмотрены процессы взаимодействия пара и жидкой пленки при движении через щели различной геометрии для различных значений перепада давления на них.

Рассмотрено 4 геометрии сепарационных щелей, применяемых в настоящий момент в последних ступенях паровых турбин. Каждая из конфигураций использует различный подход к удалению пленки. Проводилось трехмерное нестационарное моделирование области вблизи этих щелей при различных перепадах давления на них. Для этого использовался CFD-код с моделью VOF (Volume of Fluid), которая позволяет рассчитывать движение многофазной системы, имеющей границу раздела между фазами (система паровой поток-пленка). Исследовался нестационарный процесс движения двухфазной среды в пространстве сепарационной щели, при этом определялись расходы как жидкой, так и паровой фаз, удаляемых из проточной части. В расчете учитываются динамические межфазовые взаимодействия, которые могут способствовать дестабилизации движения пленки и ее разрушению на отдельные фрагменты.

В результате численного моделирования, определены основные достоинства и недостатки работы различных геометрий сепарационных щелей при варьировании перепада давления на них. Выявлены основные механизмы влияния геометрии щели на эффективность процесса удаления

пленки. Получены интегральные расходные характеристики, по которым можно оценить эффективность работы системы влагоудаления. Основным критерием является максимальное удаление пленки при минимальном расходе сепарируемого пара. Полученные данные позволили сформулировать требования к геометрии и режиму работы сепарационных систем.

Усов Э.В, Чухно В.И.

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики «ИБРАЭ»,
Москва, 115191, Большая Тульская ул., д. 52
usovev@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОПЛИВА С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Причиной тяжелой аварии с разрушением активной зоны реакторной установки является потеря баланса между генерацией и отводом тепла при несрабатывании защитных систем атомной станции. Наиболее критичным является взрывное разрушение активной зоны из-за динамических нагрузок, способных разрушить корпус реактора и выбросить материалы за пределы реактора. Применительно к реакторным установкам с натриевым теплоносителем подобные процессы возможны при прямом контакте жидкого натрия с горячим керамическим топливом и при существовании большой теплопередающей поверхности. Подобные высокоинтенсивные термические взаимодействия топлива и теплоносителя могут приводить к возникновению крупномасштабного взрывного вскипания теплоносителя и высоким динамическим нагрузкам. Кроме того, локальное вскипание натрия из-за взаимодействия топлива с теплоносителем опасны тем, что формируют пустоты в потоке натрия, способные вызвать положительный пустотный коэффициент реактивности и временное «опрокидывание» потока теплоносителя, что негативно скажется на дальнейшем развитии аварии. Взаимодействие топливо/теплоноситель в верхней камере смешения может также влиять на протекание аварии, но будет обладать невысокой энергией вследствие того, что энтальпия топлива может заметно снизиться в процессе прохождения через каналы теплоносителя или межчехловой зазор.

Проблеме взаимодействия топливо/теплоноситель традиционно уделяется повышенное внимание по аналогии с развитием аварии в водяных реакторах. Но в случае аварии в жидкометаллическом реакторе практически отсутствуют условия для «взрывного» взаимодействия, такие как глубокий бассейн натрия и одновременного попадания большой массы расплава топлива, особенно в реакторах нового поколения. Однако

анализ подобного рода взаимодействия в жидкометаллическом реакторе важен по причине того, что интенсивность данного процесса определяет особенности движения топлива, выброшенного в теплоноситель и, как следствие, характер и последствия аварии. По этой причине экспериментальные исследования проводились в разных странах в реакторных условиях, и вне-реакторных. Так на реакторе TREAT было выполнено три различных типа эксперимента: S – серия экспериментов, E и H – серия экспериментов, а также эксперименты по имитации аварий с потерей теплоносителя.

Настоящая работа посвящена развитию подходов для расчета процессов термического взаимодействия топлива и теплоносителя. Для моделирования термического взаимодействия предлагается использовать многокомпонентную термически неравновесную модель, в которой в качестве компонент выступают топливо в твердом или жидком состоянии и теплоноситель в жидком или газообразном состоянии. В рамках данной модели решаются уравнения сохранения массы, энергии и импульса. Попадание расплава стали или топлива в жидкий теплоноситель, находящийся, например, в натриевой полости, верхней камере смешения или в напорной камере реактора, может приводить к интенсивному испарению теплоносителя и, как следствие, к появлению резких скачков давления. Величина скачков давления определяется количеством образовавшегося пара, связанного с интенсивностью теплообмена между компонентами твэла и теплоносителем. Для определения скорости обмена теплом между различными компонентами и их трения между собой должны быть реализованы замыкающие соотношения. Интенсивность взаимодействий зависит от режимов течения и теплообмена компонент между собой.

Хазиев И.А., Дедов А.В., Федорович С.Д.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ПОВЫШЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПРИ КИПЕНИ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В настоящее время из года в год растет количество исследований, посвященных проблемам теплообмена при кипении. Значительная часть таких работ посвящена экспериментальному исследованию отдельных процессов, составляющих теплообмен при кипении в большом объеме. Повышение критического теплового потока (КТП) и коэффициента теплоотдачи (КТО) является важной задачей, позволяющей снизить металлоемкость и себестоимость теплообменного оборудования. Множество способов интенсификации теплообмена при кипении связана с модификацией поверхности и созданием разнообразными способами различных структур. Структурируя поверхность теплообмена, можно в разы развить теплообменную поверхность, одновременно создавая искусственные центры парообразования и увеличивая приток жидкости в зону испарения. В ряде плазменных и пучковых технологий сопутствующим явлением является модификация поверхности. Интенсификация теплообмена позволяет расширить применение подобных технологий.

В рамках исследования был собран комплект образцов, полученных лазерной, плазменной, ионной и электронной обработкой поверхностей из различных металлов (рис.1). Для данных образцов были определены краевой угол смачивания, температура Лейденфроста и параметры шероховатости, получена кривая кипения для режима пузырькового кипения в большом объеме. Приведено сравнение ряда существующих методов обработки поверхностей и похожих исследований по тематике работы с обзором литературы. Выполнен анализ результатов об интенсификации КТО и КТП, полученных в лабораторных экспериментах.

Для получения параметров шероховатости был использован микроскоп LEXT OLS4000. При исследовании шероховатости образцов были выполнены многократные автоматизированные измерения не менее чем в 10 областях образцов в разных направлениях. Получены многочисленные результаты измерений, по которым выполнено осреднение.

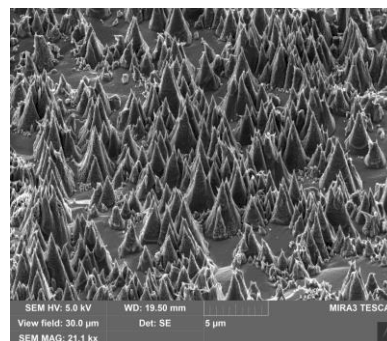


Рис. 1. Образец из нержавеющей стали, полученный обработкой плазменным пучком.

Были выполнены измерения статических углов смачивания воды для всех образцов с помощью автоматизированной установки KRUSS DSA25. Измерения выполнены многократно, для двух начальных объемов капель, в разных областях поверхностей.

Для измерения температуры Лейденфроста и исследования кипения в большом объеме были сконструированы специализированные установки. Температура Лейденфроста измерялась по динамике испарения капли жидкости.

Экспериментальный стенд по изучению кипения представляет собой сосуд с прозрачными стенками, наполненный рабочей жидкостью, в которую погружен нагреватель с закрепленным на нем образцом. В ходе опытов фиксировались температуры по высоте нагревателя и температура в объеме жидкости. На их основе рассчитывались тепловые потоки и были построены кривые кипения фреона R-113 для разных образцов, определены значения КТП.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 19-19-00410).

Khliyeva O.¹, Nikulin A.², Zhelezny V.¹, Artemenko S.¹

¹Odessa National Academy of Food Technologies, Institute of Refrigeration,
Cryotechnologies and Ecoenergetics,

1/3 Dvoryanskaya Str., 65082 Odessa, Ukraine

² CIC Energigune, Vitoria-Gasteiz, Álava, Spain

khliyev@ukr.net

ANALYSIS OF HEAT EXCHANGERS ENERGY EFFICIENCY UTILIZING NANOFLUID AS HEAT TRANSFER AGENT

Nowadays, the intensification of convective heat transfer is one of current interest and complex problems that have important practical applications. Enhancing the convective heat transfer can increase the overall performance of different systems such as thermal-energy conversion devices, solar power systems and electronic equipment.

Last years the utilizing of nanofluids as heat transfer agents for the purposes of heat transfer enhancing has actively been studied all over the world. Nowadays there are many experimental studies that shown enhancing in the convective heat transfer coefficient at different nanofluids flow in comparison with base fluid flow at equal Reynolds numbers or mass flow rates. But nanofluids are characterized with higher than base fluids viscosity. So, there is one very important question that necessary to solve before any nanofluid appliance in industrial heat exchangers: how appropriate from energy-efficient point of view is the using of nanofluid as heat transfer agent?

Previously obtained data on heat transfer coefficient and pressure drops during flow of isopropanol/ Al₂O₃ nanoparticles nanofluid in circle channel [1] did not allow us to definitely conclude about its practical possibilities as heat transfer agents. It was obtained the increasing in heat transfer coefficient vs. Reynolds number at laminar and turbulent flow. This enhancing was approximately proportionally the nanoparticles Al₂O₃ mass fraction in nanofluid. But controversy results have been obtained at analyzing the heat transfer coefficient vs. product mass flow rate and fluid specific heat capacity at turbulent flow. Thus, taking into account the current requirements of improving the energy performance of power systems, the appropriate criterion of applicability nanofluids as heat transfer agent is necessary.

A new criterion which takes into account ratio between convective heat transfer intensity and both power losses on fluid circulation and exergy losses do to the finite temperature difference in the heat exchanger has been proposed by author:

$$E = \frac{Q}{T_0 \cdot Q \left((\bar{T}_2)^{-1} - (\bar{T}_1)^{-1} \right) + N}$$

were Q is the heat flux, W; T_0 is the ambient temperature, K; \bar{T}_1 and \bar{T}_2 are the average temperature of heat transfer media in heat exchanger, K; N is the pump power, W.

The nanofluid utilizing as heat transfer agent in heat exchanger can contribute both increase in pump power N and decrease in exergy losses $T_0 \cdot Q \left((\bar{T}_2)^{-1} - (\bar{T}_1)^{-1} \right)$ by convective heat transfer enhancing. Thus, we expect the existence of optimal parameters for analyzed nanofluid (heat transfer agent velocity, nanoparticle mass fraction etc.) that allow us to obtain the maximum heat flux Q in relation to the power and exergy losses (at fixed heat transfer surface) in the heat exchanger.

Proposed criterion has been calculated using own experimental data on convective heat transfer coefficient and pressure drops for nanofluid isopropanol/Al₂O₃ in the range of nanoparticles mass fraction 0...0.071 kg·kg⁻¹ and fluid velocity up to 4.3 m·s⁻¹ [1]. As results of E value analysis it was shown there are no advantages in energy efficiency of heat exchanger at using nanofluids isopropanol/ Al₂O₃ over base fluid at laminar flow. In addition, deteriorate the energy efficiency (decrease E value) of heat exchanger utilizing this nanofluid as heat transfer agent at turbulent flow was shown. The nanofluid isopropanol/ Al₂O₃ can have applicability as heat transfer agent when energy saving issues are not priority, for example, at cooling of electronics elements.

Proposed criterion can be useful at analysis of applicability different heat transfer agents, including nanofluids, in heat exchangers with the purposes of enhancing the energy performance of overall system .

References

1. Nikulin A. et al. Effect of Al_2O_3 nanoparticles on laminar, transient and turbulent flow of isopropyl alcohol //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 130. P. 1032-1044.

Хромова И. В., Чичиндаев А. В.

Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, 630073, пр-т К. Маркса, 20
xromova@corp.nstu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК – ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА» В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Задача разработки физико-математических моделей живых систем имеет большое прикладное значение в области систем жизнеобеспечения летательных аппаратов, направленных на обеспечение теплового комфорта для человека в рамках системы «человек – тепловая защита – окружающая среда». В частности, это относится к задаче защиты человека от переохлаждения при нахождении в условиях низких температур. Подобные модели позволяют проводить комплексные исследования в области разработки индивидуальных систем жизнеобеспечения, определять границы проводимых экспериментов и создавать модельные тренажеры для отработки экстремальных ситуаций, связанных с переохлаждением и перегревом человека.

В настоящей работе описывается разработанная методика расчета тепловых процессов в системе «человек – тепловая защита – окружающая среда». Предлагаемая модель является многослойной многоэлементной моделью, которая состоит из «ядра» и «оболочки» и учитывает процессы теплопроводности, конвекции и излучения, а также внутренние тепловыделения (физическая нагрузка и процессы метаболизма) и перенос тепла с током крови. Приводятся результаты исследования теплоотдачи различных расчетных элементов и вкладов составляющих тепловых потоков (рис. 1) в суммарные теплотери организма в широком диапазоне условий окружающей среды для людей разного пола, возраста, типа конституции и уровня физической

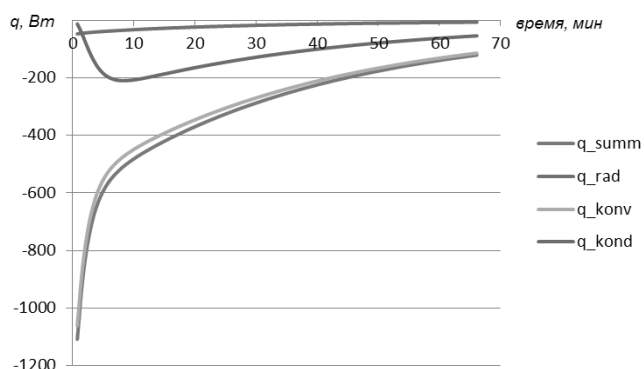


Рис. 1. Теплоотдача расчетного элемента (рука): температура окружающей среды: $t_{\text{окр}} = -30$ °С; скорость ветра: $v=10$ м/с; мужчина, возраст 40 лет.

активности. Полученные результаты могут быть полезны в области разработки авиационных и космических систем жизнеобеспечения, при проектировании и усовершенствовании специализированных костюмов пожарных; спецодежды для работы в неблагоприятных погодных условиях; высотно-компенсирующих костюмов летчиков, костюмов постоянного ношения для космонавтов, а так же при совершенствовании элементов систем термостабилизации скафандров.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-38-00257.

Список литературы

1. **Васин Ю.А.** Тепловое состояние системы «человек-окружающая среда» в экстремальных условиях / Автореф. дис. канд. – М., 2003. – 22 с.
2. **Ермакова И.И.** Информационная платформа мультикомпаративных моделей терморегуляции человека // Кибернетика и вычислительная техника – 2013. – Вып.174 – С. 81-91.
3. **Катунцев В.П.** Тепловое состояние космонавтов при автоматическом регулировании теплосъёма в период внекорабельной деятельности с борта международной космической станции / В. П. Катунцев, С. Н. Филипенков // Медицина экстремальных ситуаций – 2019. – № 21(2) – 10 с.
4. **Kirsanov R. I.** Helical (Spiral or Swirling) Blood Flow in Cardiovascular System / R. I. Kirsanov, V. P. Kulikov // Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences). - 2013. - Vol. 44 - № 2. – P. 181–185.
5. **Khromova I. V.** Heat Exchange Processes Modeling in «Human Body - Thermal Protection – Environment» System / I. V. Khromova, A. V. Chichindaev // Advances in Engineering Research. - 2018. - Vol. 158 : Proceedings of the international conference. – P. 181–185. - DOI: 10.2991/avent-18.2018.35
6. **Чичиндаев А. В.** Теплообмен в системе «человек – окружающая среда» в условиях низких температур : монография / А. В. Чичиндаев, И. В. Хромова. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. - 214 с - (Монографии НГТУ). - 3000 экз. - ISBN 978-5-7782-3492-5.

Чичиндаев А. В., Дьяченко Ю.В., Сиденко Д.Е., Шакин А.Д.
Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, 630073, пр-т К. Маркса, 20
chichindaev@corp.nstu.ru

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КОМПАКТНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕМЕННЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

В настоящее время широкое распространение в системах кондиционирования воздуха (СКВ) самолетов Tu-204, Superjet 100, MC-21 и зарубежных Boeing, Airbus получили компактные пластинчато-ребристые теплообменники (КПРТ), благодаря простоте конструкции и обслуживания, а так же высокой надежности работы. Однако часть из них имеет специфические эксплуатационные проблемы, требующие решения ряда инженерных задач. К ним относятся: проблема обмерзания теплообменника-конденсатора при работе на влажном воздухе с отрицательными рабочими температурами и проблема небольшого ресурса работы предварительного и первичного теплообменников за счет усталостного разрушения в результате термических напряжений при работе в условиях высоких температур и их больших перепадов. Проектирование по известным методикам не до конца учитывает данные эксплуатационные особенности, поэтому в настоящее время возникает необходимость разработки более совершенных методов расчета и проектирования КПРТ, позволяющих получить инновационные способы решения данных технических проблем.

В настоящей работе представлены результаты комплекса исследований, анализ эффективности работы теплообменных аппаратов авиационных СКВ, а также разработанные методы защиты теплопередающей поверхности от обмерзания и термических напряжений. В основу работы легли результаты проведенных экспериментальных исследований тепломассообмена трехфазного потока «влажный воздух – переохлажденный водный аэрозоль» с отрицательной температурой в каналах КПРТ. А также разработанные ранее методы моделирования процессов локальной теплопередачи в компактных теплообменниках с двухфазными теплоносителями (конденсатор) и в условиях наличия термических напряжений при высоких температурах горячего воздуха (предварительный теплообменник). В основе предлагаемых методов лежит идея получения заданной температуры поверхности за счет изменения термических сопротивлений в процессе теплопередачи. Усовершенствование моделей состоит в учете переменных термических сопротивлений по длине горячего и холодного тракта. В частности, параметров процессов теплоотдачи, задаваемых

геометрией оребрений и режимами течения, а также локальных процессов теплообмена при фазовых переходах. Разработанные методы моделирования и полученные результаты позволяют проводить анализ эффективности применения переменных термических сопротивлений в широком диапазоне изменения режимных и конструктивных параметров КПРТ с целью защиты теплопередающей поверхности. Данный подход является наиболее перспективным, т.к. позволяет убрать зоны обмерзания в конденсаторе и в 5-8 раз уменьшить термические напряжения в предварительном теплообменнике при минимальных энергетических и экономических затратах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-08-00321.

Список литературы

1. **Чичиндаев А.В.** Теплообмен влажного воздуха в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках : монография / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2012. - 298 с. (Серия «Монографии НГТУ»).
2. **Чичиндаев А.В.** Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Теоретические основы : учебное пособие / А.В. Чичиндаев . – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 436 с. - (Серия «Учебники НГТУ»)
3. Системы жизнеобеспечения и оборудование летательных аппаратов: учебное пособие / А. В. Чичиндаев, Ю. В. Дьяченко, В. А. Спарин, И. В. Хромова; под ред. А.В. Чичиндаева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 319 с. (Серия «Учебники НГТУ»). - ISBN 978-5-7782-3904-3.
4. **Chichindaev A. V.** Modeling of the heat transfer in a compact heat exchanger-condenser with variable finning / A. V. Chichindaev, I. V. D'Iachenko, D. E. Sidenko // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018) : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 4. – С. 41-44. - ISBN 978-5-7782-3614-1.

ВЛИЯНИЕ ПОДКОВООБРАЗНОГО ВИХРЯ НА ТЕПЛОПЕРЕНОС У ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ ЦИЛИНДРА, ПОГРУЖЕННОГО В ТУРБУЛЕНТНЫЙ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЕ

Представляются результаты экспериментального исследования поля осредненной по времени температуры и интенсивности ее пульсаций у передней кромки кругового цилиндра, установленного на вертикальной нагреваемой пластине, вдоль которой развивается свободноконвективный пограничный слой. Исследования выполнены на стенде, созданном в СПбПУ в 90-х годах [1] и модернизированном в последние два года. Свободноконвективное движение воздуха формировалось у поверхности изотермической алюминиевой пластины высотой 4,95 м и шириной 0,90 м. Пограничный слой на пластине без установленного цилиндра близок к статистически двумерному. Возмущающий слой низко-теплопроводный цилиндр, диаметром и высотой (h) 40 мм, помещался в область турбулентного течения – на расстоянии 1,8 м от нижней кромки пластины, где толщина пограничного слоя составляла около 120 мм.

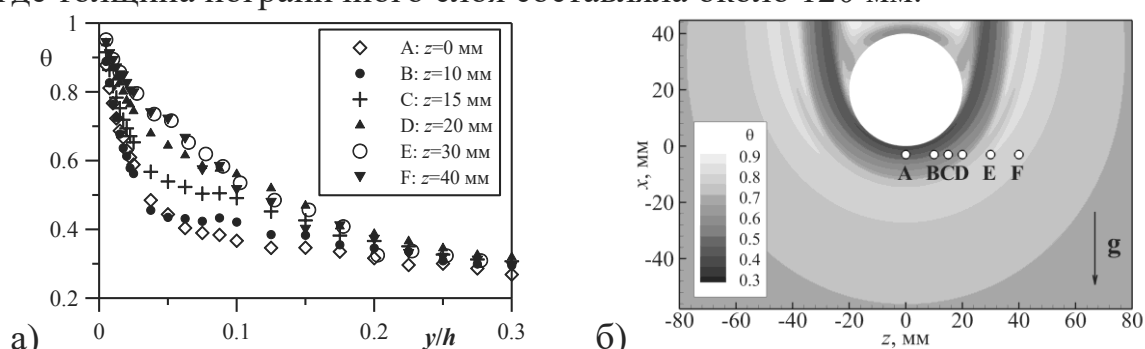


Рис. 1. Измеренные профили температуры (а) и схема с расчетным полем (б).

Методом термометра сопротивления измерялись распределения осредненной температуры и ее пульсаций по нормали (y) к поверхности пластины. В качестве датчика использовался зонд с чувствительным элементом в виде вольфрамовой проволоочки диаметром 5 мкм и длиной 3,5 мм. На рис.1а приведены профили осредненной нормированной температуры $\theta=(T-T_w)/(T_w-T_a)$, где T_w – температура пластины, 60°C , T_a – температура внешнего пространства, 26°C . Профили даны для точек, отмеченных на рис.1б; все точки расположены на горизонтальной линии, отстоящей на расстоянии 2,5 мм от передней кромки цилиндра; смещение каждой из точек относительно центральной вертикальной плоскости

(координата z) указано на рис. 1а. На рис. 1б показано также расчетное поле температуры в плоскости, параллельной пластине, на расстоянии 2 мм от нее ($y/h=0.05$). Это поле получено посредством численного моделирования на основе уравнений Рейнольдса [2]. Результаты измерений подтверждают установленный ранее расчетным путем факт сильного влияния подковообразного вихря на теплоперенос у передней кромки цилиндра.

Исследование поддержано Российским научным фондом (грант № 18-19-00082).

Список литературы

1. **Чумаков Ю.С.** Распределение температуры и скорости в свободноконвективном пограничном слое на вертикальной изотермической поверхности // ТВТ. 1999. Т.37. №5. С. 744-749.
2. **Е.М. Smirnov, А.М. Levchenya, V.D. Zhukovskaya.** RANS-based numerical simulation of the turbulent free convection vertical-plate boundary layer disturbed by a normal-to-plate circular cylinder // IJHMT, 144 (2019) 118573-118584.

Шакуров А.В., Кольшикин Л.М.

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, 105005, 2-я Бауманская ул, 5, стр.1
shakurov@bmstu.ru

ТЕПЛООБМЕН В СИСТЕМЕ ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА - ЧЕЛОВЕК В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ОБЩЕГО КРИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Общее криотерапевтическое воздействие (ОКВ) – современный аналог традиционных методик закаливания организма. При его проведении человек помещается в кабину с охлаждающим газом (температура до минус 140 °С). При этом температура поверхности тела пациента может снижаться до 0...5 °С (вблизи области низкотемпературного ее повреждения). В результате реализуется стимулирующий нервную систему и покровные биоткани эффект. Несмотря на перспективность данной процедуры для профилактики и лечения ряда заболеваний, развитие технологии её реализации в текущей технической реализации достигло насыщения и его потенциал остается нереализованным, а достигаемые эффективность, безопасность и экономичность не позволяют такому криовоздействию получить широкое распространение на практике [1,2]. Цель данного исследования – получить недостающие экспериментальные данные по фактическим значениям и взаимосвязи температур охлаждающего газа и поверхности тела пациента (в

зависимости от изменения его массогабаритных показателей) во время данного криовоздействия. На основе этого могут быть определены характеристики теплоотдачи от тела пациента с различной степенью неравномерности теплоотвода в зависимости от скорости натекающего потока и участка поверхности охлаждаемого тела. В результате чего возможно сформировать практические рекомендации по подаче охлаждающего газа. Исследование выполняется при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-1838.2020.2).

Список литературы

1. **Bouzigon R., Grappe F., Ravier G., Dugue B.** Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications (2016) *Journal of Thermal Biology*, 61, pp. 67-81.
2. **Жердев А.А., Шакуров А.В., Щелчков А.А.** Способы реализации общей криотерапевтической процедуры
Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 5 (5). С. 14.
3. **Leonov V.P., Kolishkin L.M., Voronov V.A., Shakurov A.V.** Experimental and computational study of the vertical axis temperature gradient of the liquid nitrogen individual cryo-cabin (2018) *Refrigeration Science and Technology*, 2018-September, pp. 91-96.

Шамирзаев А.А., Кузнецов В.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева, 1
alisham@itp.nsc.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ КИПЕНИИ ХЛАДОНОВ R134А И R236FA В СИСТЕМЕ ЩЕЛЕВЫХ МИКРОКАНАЛОВ

Микроканальные системы охлаждения с кипящим теплоносителем являются перспективными устройствами для поддержания постоянной температуры оборудования в условиях высокого тепловыделения [1]. В таких системах возможно бескризисно снимать высокие тепловые потоки до 100 Вт/см² и более. Несмотря на высокие значения коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков, определенное ограничение на применение микроканальных систем имеет увеличение гидравлического сопротивления, в особенности, для режима пузырькового кипения, что существенно влияет на эффективность системы охлаждения [2]. Целью данной работы является экспериментальное исследование теплообмена и потерь на трение при недогретом и насыщенном кипении хладонов R134a и R-236fa в условиях вынужденной конвекции в системе двух щелевых микроканалов.

Эксперименты проведены в замкнутом контуре. Рабочий участок представляет собой медный блок с нагревательными элементами, в котором фрезерованы 2 микроканала длиной 16 мм, сечением 2x0.4 мм, расстояние между каналами 2 мм. Диапазон массовых расходов от 600 до 1600 кг/м²с, тепловых потоков от 0 до 120 Вт/см² в условиях начального недогрева от 0 до 30 °С.

Проведено сравнение полученных результатов по теплообмену и гидравлическим потерям с моделями для расчёта в условиях недогретого и насыщенного кипения [2,3]. Для расчёта перепада давления в условиях тепловыделения проведен учет входного и выходного перепада давления, перепада давления, связанного с ускорением потока и на трение с учётом начального гидродинамического участка.

Анализ экспериментальных данных по теплообмену и гидравлически потерям в условиях недогретого и насыщенного кипения показал необходимость учета влияния начального участка не только для экономайзерного участка, Проведённые эксперименты позволили выделить области существенного влияния пузырькового кипения и подавления пузырькового кипения на теплообмен и перепад давления. Пример зависимости перепада давления на участке при кипении хладона R134a приведён на рис.1. Видно, что при тепловых потоках менее 50 Вт/см², перепад давления соответствует расчёту с учётом влияния пузырькового кипения.

С увеличением теплового потока влияние пузырькового кипения на перепад давления уменьшается, что указывает на подавление пузырькового кипения, как в модели для расчёта теплообмена из [3], и при тепловых потоках более 75 Вт/см² перепад давления соответствует расчёту без учёта влияния пузырькового кипения, что указывает на полное подавление пузырькового кипения.

Работа выполнена при поддержке: РФФИ проект № 18-08-01282А (результаты для R236fa); и РНФ проект № 16-19-10519-П (результаты для R134a).

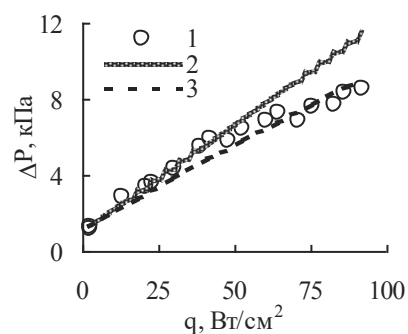


Рис. 1. Зависимость перепада давления от теплового потока: 1 — эксперимент; 2 — расчёт с учётом кипения; 3 — расчёт без учёта кипения. R134a, G=820 кг/м²с, P =7 бар.

Список литературы

1. **Kuznetsov V.V.** Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // Proc. Int. Heat Transfer Conf. IHTC14, 2010. Washington. IHTC14-22570.

2. **Kim S.M., Mudawar I.** Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for mini/micro-channel saturated flow boiling //Int J Heat and Mass Transf. 2013. Т. 58. №. 1-2. С. 718-734.
3. **Kuznetsov V.V., Shamirzaev A.S.** Flow boiling heat transfer of refrigerant R-134a in copper microchannel heat sink //Heat Transf Eng. 2016. Т. 37. №. 13-14. С. 1105-1113.

Шанин Ю.И.

Научно-исследовательский институт научно-производственное
объединение «Луч», Подольск, 142103, Железнодорожная, 24
syi@luch.com.ru

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ

В зависимости от тепловых нагрузок оптические блоки (отражающие пластины) деформируемых лазерных зеркал (ДЗ) могут быть в охлаждаемом [1] или неохлаждаемом [2] исполнении. Для повышения термической стабильности охлаждаемых ДЗ необходимо обеспечить общее снижение температуры оптического блока при возможно более равномерном ее распределении по толщине блока и недопущение попадания тепла в основу зеркала. Для повышения термической стабильности неохлаждаемых ДЗ: 1) применяются стабильные материалы, такие как кремний, карбид кремния; 2) используются высокоотражающие интерференционные диэлектрические покрытия и 3) преимущества проходной и зеркальной оптики [2]. Повышение порога применения неохлаждаемой оптики достигается за счет увеличения диаметров апертур оптических элементов (при возможности), роста коэффициента зеркального отражения (КЗО) оптической поверхности ДЗ (используя многослойные интерференционные покрытия) и использования проходной оптики. Основным термический фактор, ограничивающий работу деформируемого зеркала, – перемещения оптической поверхности, и наиболее вредоносные из них – изгибные перемещения.

Оптические поверхности ДЗ в процессе работы искажаются под воздействием: 1) изменения эксплуатационной температуры окружающей среды; 2) лазерного излучения; 3) расширения привода зеркала вследствие разогрева в процессе работы.

Для охлаждаемых ДЗ в работе дан анализ полученного ранее поля температуры по толщине оптического блока зеркала с точки зрения обеспечения наименьших термодформаций оптической поверхности блока и рассмотрены некоторые системы охлаждения, отвечающие этому требованию.

Для неохлаждаемых ДЗ в упрощенной постановке (рассматривалось только приближение одномерного нестационарного теплообмена по толщине ДЗ) проанализированы задачи:

- максимального возможного разогрева ДЗ без теплообмена с окружающей средой;
- распределения нестационарного поля температуры по толщине ДЗ и термоперемещений оптической поверхности подложки;
- учета теплообмена с поверхности подложки ДЗ (естественной и принудительной конвекцией);
- воздействия сильной неравномерности светового потока и пиковых локальных тепловых нагрузок [3] на температурное поле и возникающие напряжения в подложке ДЗ, перемещения оптической поверхности;
- учета наличия на зеркальной поверхности повреждений (точек, пятен, царапин), определения предельных размеров дефектов [4];
- влияния биметалличности материалов конструкции ДЗ на его теплонпряженное состояние.

Анализ неохлаждаемого случая проведен применительно к ДЗ прямоугольной апертуры. Корпус зеркала выполнен из сплава 29НК. Оптическая поверхность сформирована на подложке толщиной 3,5 мм, с нанесенными на обратную сторону шипами сечением 2×2 мм, шагом 1 мм, высотой 4 мм, выполненными для улучшения отвода тепла. Оптическая подложка изготовлена из кремния и имеет зеркальное интерференционное покрытие, благодаря которому удается использовать неохлаждаемую оптику.

В качестве примеров рассматривается воздействие на оптическую поверхность: 1) равномерной поглощаемой зеркалом тепловой нагрузки мощностью $P=100$ Вт, 2) локальной пиковой нагрузки.

Список литературы

1. О термоупругом деформировании связанных упругими стержнями круговых пластин/ В.А. Афанасьев, В.В. Королев, А.В. Павлюк и др.// Прикладная механика. 1989. Т.25. №4. С. 119-123.
2. Пределы работоспособности неохлаждаемых и охлаждаемых оптических элементов / Ю.И. Шанин, О.И. Шанин, А.В. Черных и др.// ИФЖ. 2017. Т.90. №6. С.1380-1386.
3. **Кузьмин Ю.А., Харитонов В.В.** Предельная допустимая мощность локального источника тепла на поверхности многослойной стенки с внутренним охлаждением//ТВТ. 1986. Т. 24. № 5. С. 948–956.
4. **Шанин Ю.И., Черных А.В.** Влияние технологических дефектов и эксплуатационных условий на работоспособность деформируемых зеркал// Тепловые процессы в технике. 2019. Т.11. №8. С.373-384.

Швецов Д.А.¹, Павленко А.Н.¹, Брестер А.Е.², Жуков В.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики СО РАН им С.С. Кутателадзе,
Новосибирск, 630090, Академика Лаврентьева пр-т, 1

² Новосибирский государственный технический университет,
630073, Новосибирск, К. Маркса пр-т, 20
shvetsov.kh301@ya.ru

КАРТЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИСПАРЕНИЯ И КИПЕНИЯ В ТОНКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Выполнено экспериментальное исследование теплообмена в широком диапазоне изменения толщины слоя и давлений. В качестве рабочей жидкости использовался н-додекан. Капиллярно-пористое покрытие рабочей поверхности было изготовлено с помощью лазерного 3D-принтера [1]. Диапазон изменения высоты слоя жидкости в экспериментах (1.7-4) мм, диапазон изменения давления над слоем (33-40000) Па. В экспериментах были получены кривые кипения при различных значениях давления над слоем н-додекана. Измерения теплообменных характеристик проводились одновременно с визуальными наблюдениями образующихся в слоях структур. В слоях жидкости в зависимости от высоты слоя и давления образовывались структуры трех основных типов: «воронки», «кратеры» и пузырьковые системы. Такие же структуры наблюдались на поверхности без покрытия, подробное описание которых представлено в [2].

В данной работе построены карты гидродинамических режимов теплообмена, на которых для каждой высоты слоя в зависимости от плотности теплового потока и приведенного давления показаны области существования наблюдавшихся структур. Пример карты гидродинамических режимов приведен на рис. 1. При приведенных давлениях более 0.0005 в слое возникало пузырьковое кипение. Величины критического теплового потока, полученных для капиллярно-пористого покрытия, выше значений, рассчитанных по известным зависимостям Кутателадзе [3] и Ягова [4], но ограничиваются сверху теоретической зависимостью Ландау [5]. По результатам визуальных наблюдений было установлено, что при определенных тепловых потоках

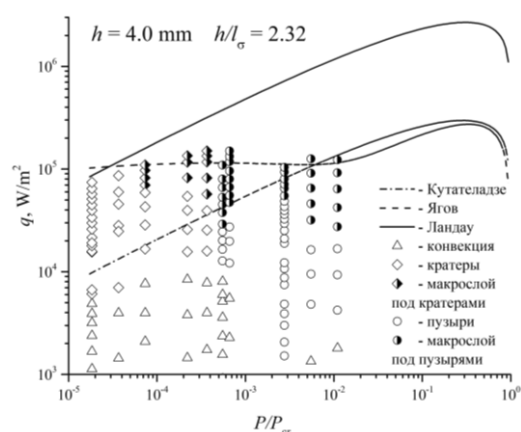


Рис. 1. Карта гидродинамических режимов в слое н-додекана высотой 4.0 мм.

на поверхности капиллярно-пористого покрытия образовывался макрослой, представляющий собой тонкую пленку жидкости, в зависимости от приведенного давления образующуюся либо под «кратерами», или под пузырями. Наименьшие значения теплового потока, при которых наблюдались такие структуры, были получены при приведенном давлении 0.0005. Величины тепловых потоков, при которых образовывались сухие пятна из-за высыхания макрослоя, значительно зависят от высоты слоя.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00545).

Список литературы

1. **Bessmeltsev V.P., Pavlenko A.N., Zhukov V.I.** Development of a technology for creating structured capillary-porous coatings by means of 3D printing for intensification of heat transfer during boiling // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2019. Vol. 55. No. 6. P. 554-563.
2. **Zhukov V.I., Pavlenko A.N.** Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2018. Vol. 117. P. 978–990.
3. **Кутателадзе С.С.** Гидромеханическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // ЖТФ. 1950. Т. 20. № 11. С. 1389–1392.
4. **Ягов В.В.** Механизм кризиса кипения в большом объеме // Теплоэнергетика. 2003. № 3 С. 2 – 10.
5. **Ландау Л.Д.** К теории медленного горения // ЖЭТФ. 1944. Т. 14. С. 240 – 245.

Шшиканов О.Г.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЗОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ТОПКЕ КОТЛА Е-160

Совершенствование тепловой работы топок энергетических котлов требует детальных знаний о характере и особенностях протекающих процессов радиационного и сложного теплообмена. Наиболее привлекательным в этих целях является проведение комплекса экспериментальных и расчетных исследований. Так, в ходе натурных экспериментов выявляются особенности и закономерности протекания топочных процессов, которые затем учитываются при математическом

моделировании. В свою очередь, результаты моделирования позволяют разработать рекомендации по совершенствованию конструкции устройства и режима сжигания, а также проверить ряд технических предложений, параметры которых отличаются от эксплуатационных.

Расчетные и экспериментальные исследования теплообмена проводились в топке котла Е-160-1,4-250 БТ (далее котел Е-160) Железнодорожной ТЭЦ-3 при факельном сжигании ирша-бородинского угля. В ходе экспериментов исследовалось распределение радиационных характеристик теплообмена в топочной камере и других показателей, включая экологические, при изменении штатных режимов эксплуатации. Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований показал следующее. Максимальные величины падающих радиационных потоков зафиксированы на уровне верхнего яруса горелок и составляет $258 \div 266$ кВт/м². Такой уровень падающего на стены топочной камеры излучения не приводит к появлению в отложениях золы жидкой фазы при сжигании ирша-бородинского угля, поэтому шлакование экранов в ходе экспериментов не наблюдалось. Тепловая неравномерность в сечениях топки (определялась как разница между максимальным и минимальным показателями плотности падающих радиационных потоков, зарегистрированных в центральных лючках экранов), вызванная соответствующим положением факела в результате отключения одной из четырех пылесистем котла, достигает существенных величин: $64 \div 84$ кВт/м². При включении четырех пылесистем, температурная неравномерность сокращается до минимальных значений – $11 \div 19$ кВт/м².

Несмотря на газовую сушку топлива и работу котла на нагрузках ниже номинальной, уровень вредных выбросов, зафиксированный при экспериментах, значительно превышает нормативный. Так, зарегистрированные величины концентрации оксидов азота составляют: $522 \div 888$ мг/м³. Отметим, что полученный минимальный уровень NO_x обусловлен наименьшим расходом воздуха для горения ($\alpha=1,2$), относительно других опытов.

Полученные в ходе экспериментальных исследований данные о тепловых неравномерностях в топочной камере котла Е-160 при различном сочетании работающих пылесистем, а также характеристики состава дымовых газов служат основанием для дальнейших исследований, направленных на совершенствование работы топочного оборудования. Для этого была разработана 123-зонная математическая модель теплообмена. Выделение девяти объемных зон в пределах зоны активного горения и зоны дожигания топлива позволило учесть несимметричное положение высокотемпературного факела при отключении одного из четырех горелочных блоков.

Исследование показателей теплообмена проводилось как при работе топки без отключения, так и при сочетании работающих пылесистем АВГ

(отключена пылесистема Б). Кроме того, моделировалось изменение расхода аэроsmеси и газов рециркуляции.

Анализ результатов моделирования теплообмена при отключении блока горелок показал, что максимальные температуры газов зафиксированы, помимо центральной зоны с ядром горения, но и в пристенных зонах, примыкающих к отключенному блоку горелок против направления кругового движения дымовых газов. В случае работы топки без отключения, температуры в пристенных зонах экранов практически не отличаются, что характеризует симметричное положение высокотемпературного факела.

Установлено, что отклонение факела при отключении блока горелок негативно влияет на образование как внутритрубных отложений, так и способствует росту шлакозольных отложений с внешней стороны экрана. Кроме того, такие условия работы котла сопровождаются значительным содержанием NO_x в уходящих дымовых газах.

Шишкин Н.Е.

Институт теплофизики им. Кутателадзе С.С., СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. Акад. Лаврентьева, 1

СОВМЕСТНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ И ЖИДКОЙ ПЛЕНКОЙ

Повышение рабочих параметров в энергетических устройствах во многом определяется надежностью защиты рабочей поверхности от высокотемпературных потоков. Одним из перспективных методов для этих целей может быть использование газокапельных пристенных струй, что было показано во многих работах, и наиболее обстоятельно в [1,2]. Это происходит за счет дополнительного охлаждения при испарения жидких капель. Большая концентрация мелких капель в пристенной струе способствует образованию жидкой пленки на стенке, что приводит к пролонгированному охлаждению до полного испарения жидкости и в последующем к защите парогазовой завесой.

Широко используется в технике для защиты и удержания центрального потока закрученная пристенная струя [3]. При вихревом движении периферийная подача жидкости имеет дополнительные благоприятные последствия. В поле центробежных сил испаряющиеся жидкие частицы (как более тяжелые компоненты в потоке) удерживаются вблизи ограничивающей стенки, а не распространяются на весь слой смешения, как это имело бы место в незакрученном течении. Опытные данные по температуре испаряющейся пленки в закрученном потоке приведены в работе [4], которые подтвердили эффективность охлаждения поверхности этим способом.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования эффективности охлаждения при совместной подаче пристенной закрученной воздушной завесы и организованной пленки воды на входе рабочего участка. Опыты проводились на специальной дозвуковой аэродинамической трубе. Рабочий участок представлял собой цилиндрический канал с внутренним диаметром 100 мм и длиной 1200 мм. Стенка трубы из стеклотекстолита дополнительно теплоизолировалась, на внутренней поверхности были вмонтированы термопары. На входе канала имелась тангенциальная кольцевая щель высотой 5 мм. Закрутка воздушной струи осуществлялась внутри щели через спиральные каналы, направленные под углом к аксиальному направлению. В периферийной части щели была также организована подача жидкой пленки, которая далее растекалась по поверхности рабочего участка.

Эффективность охлаждения оценивалась по энтальпиям смешивающихся потоков и вблизи стенки, так как в таком виде учитывается теплота фазового перехода, может быть достигнуто обобщение известными критериальными зависимостями для тепловых завес.

Список литературы

1. **Волчков Э.П., Лебедев В.П., Терехов В.И., Шишкин Н.Е.** Экспериментальное исследование влияния концентрации мелкодисперсных капель жидкости на эффективность газовой завесы // Сиб. физ.-техн. журн. 1992. Вып. 1. С. 28 - 32.
2. **Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е.** Теплозащитные свойства двухфазных газочапельных завес в вертикальном цилиндрическом канале // Изв. Акад. Наук, Энергетика. 2003. № 6. С. 135 - 143.
3. **Volchkov E.P., Lebedev V.P., Terekhov V.I., Shishkin N.E.** Simulation the flow stabilization process by peripheral flow swirling as applied to plasma reactors . Thermal Plasma Torches and Technologies. 1999. Pt. 2. P. 440 - 465. (Plasma Torches. Basic Studies and Design, V. 1).
4. **Алимов Р.З.** О некоторых особенностях испарительного охлаждения закрученным потоком // ТВТ. 1966. Т. 4, № 2. С. 238 - 241.

Шлегель Н.Е., Стрижак П.А., Кропотова С.С., Антонов Д.В.
Томский политехнический университет, г. Томск, 634050, Ленина, 30
pavelspa@tpu.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ

Измельчение капель жидкостей в течение нескольких этапов (первичное и вторичное [1–3]) применяется в различных приложениях, например, при распылении топлив в топках котлов, системах охлаждения, теплообменном оборудовании, пожаротушении. Целью данной работы является экспериментальное определение эффективных условий применения комбинированных методик вторичного измельчения однородных и многокомпонентных капель жидкостей с целью интенсификации процесса измельчения капель. В данной работе с целью интенсификации процесса измельчения использовались стенды, позволяющие реализовывать несколько методик измельчения исходных капель: столкновение друг с другом с последующим дроблением газовой струей, дробление при взаимодействии с твердой стенкой, микро-взрывное разрушение капель за счет интенсивного нагрева. Регистрация процессов взаимодействия и разрушения капель выполнялась с помощью высокоскоростной видеокамеры. Для определения размеров капель в потоке аэрозоля использовался оптический панорамный метод теневой фотографии Shadow Photography (SP). В качестве исследуемых жидкостей использовались составы, применяемые в перспективных химико-технологических и газопарокапельных приложениях: вода, угольная суспензия, эмульсия на основе трансформаторного масла и эмульсия на основе дизеля [4]. Проведенные эксперименты показали, что при комбинировании четырех рассмотренных схем измельчения предоставляется возможным увеличить площадь поверхности жидкости в несколько раз. При этом существенный рост площади этой поверхности наблюдается на третьей стадии – столкновении с подложкой.

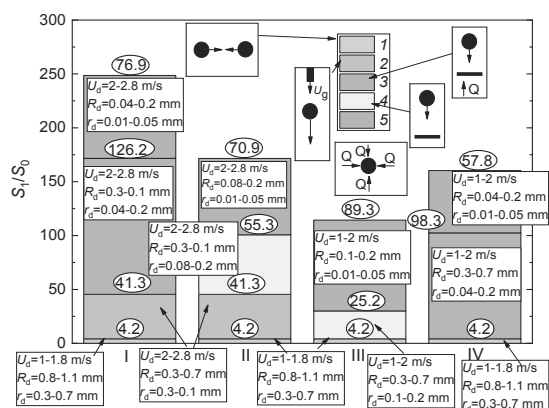


Рис. 1. Максимальные отношения площадей поверхности жидкости при комбинированном применении нескольких схем измельчения на примере капель дизельной эмульсии: 1 – соударения между собой; 2 – взаимодействие с натекающим потоком воздуха; 3 – соударение с нагретой стенкой; 4 – соударение со стенкой без нагрева; 5 – микро-взрывное измельчение. Где U_d – результирующая скорость взаимодействия капель, м/с; R_d и r_d – радиусы начальных капель и вторичных капель, мм; U_g – скорость потока воздуха, м/с; Q – тепловой поток, Вт.

Для достижения максимальной эффективности рекомендуется использовать схемы разрушения капель в следующей последовательности: дробление капель при их соударениях, воздействие на них потоком воздуха, соударение с нагретой твердой поверхностью, микро-взрывной распад капель при нагреве в соответствующих камерах и печах.

Список литературы

1. Cen, C., Wu, H., Lee, C., Liu, F., Li, Y. Experimental investigation on the characteristic of jet break-up for butanol droplet impacting onto a heated surface in the film boiling regime // Int. J. Heat Mass Transf. 2018. V. 123. P. 129–136.
2. Cossali, G.E., Marengo, M., Santini, M. Secondary atomisation produced by single drop vertical impacts onto heated surfaces // Exp. Therm. Fluid Sci. 2005. V. 29. P. 937–946.
3. Jung, S., Hoath, S.D., Martin, G.D., Hutchings, I.M. Experimental study of atomization patterns produced by the oblique collision of two viscoelastic liquid jets // J. Nonnewton. Fluid Mech. 2011. V. 166. P. 297–306.
4. Glushkov D.O., Shabardin D.P., Strizhak P.A., Vershinina K.Yu. Influence of organic coal-water fuel composition on the characteristics of sustainable droplet ignition // Fuel Processing Technology. 2016. V. 143. P. 60–68.

Яньков Г.Г., Артемов В.И., Абрамов А.В.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
aleksey.abramov22@yandex.ru

ИММЕРСИОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Использование силовых полупроводниковых приборов (СПП) в промышленности и электроэнергетике неуклонно возрастает. Различные типы тиристоров, транзисторов, полупроводниковых диодов, резисторов используются в преобразователях частоты, комплексных выпрямительно-преобразовательных устройствах, статических синхронных компенсаторах, управляемых шунтирующих реакторах и других устройствах силовой электроники. Единичная электрическая мощность СПП может достигать нескольких единиц и даже десятка мегаватт. Одним из способов теплоотвода является иммерсионное охлаждение, т.е. погружение охлаждаемых устройств в жидкость-диэлектрик. Наиболее привлекательным является двухфазное иммерсионное охлаждение, позволяющее существенно повысить за счет пузырькового кипения на поверхности радиатора интенсивность теплосъема, плотность размещения электронных компонентов и снизить энергозатраты на их охлаждение.

В данной работе численно моделируется тепловое состояние тиристора Т-283-1600 с различными радиаторами, на поверхности которых имеет место пузырьковое кипение жидкого диэлектрика «3М Novac 649». Расчеты выполнены в среде CFD кода ANES [1]. Коэффициенты теплоотдачи при пузырьковом и переходном кипении, а также критические плотности теплового потока рассчитывались по формулам В.В. Ягова [2]. Исследовались различные формы радиаторов: в виде ребер из нескольких дисков, прямоугольных параллелепипедов с вертикальными щелевыми каналами. При этом варьировались геометрические размеры ребер, каналов, их количество и габаритные размеры радиаторов. В результате численной оптимизации определена конструкция радиатора, отвечающая требуемым условиям по максимальной температуре резистора на поверхности соприкосновения с радиатором.

Список литературы

1. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учебное пособие для вузов/ Ягов В.В. М.: Издательский дом МЭИ, 2014 – 542 с.
2. Компьютерный CFD код ANES: <http://anes.ch12655.tnweb.ru>.

Секция 2
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

Андреев В.В.¹, Новицкий А.А.¹, Умнов А.М.¹

¹ Российский университет дружбы народов «РУДН»,
Москва, 117198, Миклухо-Маклая, 6
temple18@mail.ru

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ С ГАЗОВОЙ МИШЕНИ ПРИ УДЕРЖАНИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СГУСТКОВ В ПРОБКОТРОНЕ

Мягкое рентгеновское излучение лежит в максимуме излучательной способности плазменных образований с энергичной электронной компонентой масштаба нескольких сотен килоэлектронвольт. Ранее [1, 2], было показано, что гирорезонансное взаимодействие, реализуемое в магнитном поле длинного пробкотрона, приводит к генерации плазменных сгустков, электронная компонента которых соответствует указанному диапазону энергий. В работах [3, 4] были проведены исследования динамики изменений параметров жесткого тормозного излучения, которое регистрируется на разных этапах импульсного рабочего цикла с помощью рентгеновских спектрометров (NaI(Tl)). Тщательные измерения показали, что в типичных условиях проводимых экспериментов спектр регистрируемого излучения в мягком диапазоне состоит из рентгеновского континуума быстрых электронов сгустка и линий, излучаемых при переходах во внутренней оболочке газовой мишени. Для регистрации излучения в мягком диапазоне применялся спектрометр (Amptek X-123 CdTe) снабженный коллиматором, обеспечивающим регистрацию исключительно с газовой мишени и откалиброванный по Am²⁴¹. Характеристические линии рентгеновского излучения могут быть использованы в качестве пороговых показателей для определения количества электронов плазменных сгустков с энергией, превышающей энергию связи орбитальных электронов начальной вакансии для соответствующего рентгеновского перехода [5]. Когда в качестве плазмообразующей смеси используются тяжелые газы (Xe, Kr) соотношение интенсивностей между рентгеновскими линиями различных серий показывает, как изменяется средняя энергия электрона в зависимости от параметров рабочего цикла ускорения. Соотношения интенсивностей линий и тормозного излучения позволяет получить дополнительную информацию об анизотропии распределения электронов по энергии.

Спектры, указанного характера четко зарегистрированы в условиях используемых газовых мишеней. Полное число фотонов, испускаемых в линиях K_α (Xe, Kr), в предположении изотропности источника излучения, составило $2,6 \cdot 10^7$ Фотон/сек. Проведённые исследования динамики изменения интенсивности характеристических линий рабочего газа (Xe,

Kr) показали наличие режимов работы, при которых их значения максимальны. Проведение абсолютных измерений величины интенсивности указанных линий с фиксированного объема газовой мишени позволяет определить количество электронов обеспечивающих их появление, тем самым определить оптимальные условия захвата частиц в режим ускорения при используемом методе создания исходной плазмы. Показано, что эффективность захвата растёт практически линейно с увеличением темпа восстановления исходного профиля стационарного магнитного поля. Зависимость спектра и квантового выхода рентгеновского излучения с газовой мишени показало, что электроны ускоренного плазменного сгустка в процессе удержания локализованы в минимуме пробочной ловушки и сконцентрированы в тонком цилиндрическом слое. Спектр и характеристики (квантовый выход, максимальная энергия) рентгеновского излучения в продольном и поперечном направлениях имеют радикальные отличия. Полученные экспериментальные зависимости находят свое подтверждение и при проведении численного эксперимента, реализованного на оригинальной численной модели [1-4]. Результаты настоящей работы объясняют ранее полученные результаты и могут быть использованы для получения более обширной информации о количестве ускоренных электронов, их энергетическом спектре, а также динамику его изменений в пределах рабочего цикла ускорения и удержания генерируемых сгустков в магнитостатическом поле длинного пробкотрона.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-29-21041.

Список литературы

1. Andreev V.V., Novitskiy A.A., Umnov A.M., Chuprov D.V. Instruments and Experimental Techniques. 2012. T. 55. № 3. С. 301-312.
2. Andreev, V.V., Novitskiy, A.A., Umnov, A.M., Chuprov, D.V. 2015 Applied Physics 2015-January(3), с. 35-39
3. V.V. Andreev, A.A. Novitskiy, A.M. Umnov IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1094 (2018) 012013
4. V.V. Andreev, A.A. Novitskiy, A.M. Umnov IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1383 (2019) 012013
5. R. Friedlein, H. Tyrroff, C. Zippe, G. Zschornack, and W. Barnitzke// Rev. Sci. Instrum. 67 (3), March 1996, 1261

Андреев С.Н.¹, Бернацкий А.В.¹, Дятко Н.А.², Очкин В.Н.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН

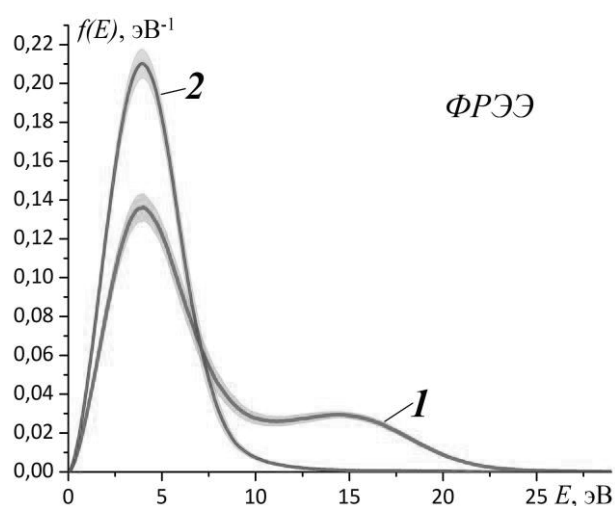
² Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий
институт инновационных и термоядерных исследований,
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12
bernatskiyav@lebedev.ru

ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Нашим коллективом в последние годы разработаны новые методы количественной спектроскопии [1-4], которые в перспективе могут применяться на различных установках, в том числе токамаках. Однако, для повышения чувствительности измерений некоторыми предложенными методами, необходимо проводить калибровочные зондовые измерения с целью установления функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ).

В работе [5] были продемонстрированы первые результаты измерений в плазме разряда с полым катодом оригинальной зондовой схемой. В её основе лежит формирование вольтамперной характеристики шумовым сигналом. Такой подход позволил увеличить динамический диапазон измерений.

На рисунке представлены результаты измерений ФРЭЭ в разряде с полым катодом в чистом гелии и в смеси гелия с парами воды $\text{He}+\text{H}_2\text{O}$ (2:1). Измерения проводились при давлении 2.9 мбар и напряжении разряда $U_d=283$ В. Как видно из рисунка, при добавлении паров воды в гелий доля быстрых электронов в установившейся ФРЭЭ уменьшается. Вероятно, это связано с потерями энергии электронов при диссоциативном возбуждении молекул H_2O ($\sigma\sim 10^{-17}$ см²), ионизации ($\sigma\sim 10^{-16}$ см²) и др. Пороги сечений этих процессов находятся в области 10 эВ. Наличие максимума ФРЭЭ в области 15 эВ (в разряде в гелии) обусловлено, по-видимому, нелокальным характером формирования ФРЭЭ. Выяснение этого вопроса требует детального численного моделирования.



ФРЭЭ ($p=2.9$ мбар): 1 — разряд в He; 2 — разряд в $\text{He}+\text{H}_2\text{O}(2:1)$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-02-00540а.

Список литературы

1. A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin, O.N. Afonin, A.B. Antipenkov. Measurements of the number density of water molecules in plasma by using a combined spectral-probe method // Plasma Physics Reports. 2015, V. 41, No. 9, P. 705-714. DOI: 10.1134/S1063780X15090032
2. A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin, I.V. Kochetov. Multispectral actinometry of water and water derivate molecules in moist inert gas discharge plasmas // Journal of Physics D: Applied Physics. 2016, V. 49, No. 39, 395204 (10pp). DOI: 10.1088/0022-3727/49/39/395204
3. A.V. Bernatskiy, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin. Transformations of neutral particles in the discharge plasma in inert gases with water vapor and deuterium // Physics of Plasmas. 2018, V. 25, No. 8, 083517 (9pp). DOI: 10.1063/1.5042839
4. A.V. Bernatskiy, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin. Determination of water leaks flows and their surface localization in plasma reactors by the ratio of the hydrogen isotopes line intensities // Plasma Sources Science and Technology. 2019, V. 28, No. 10, 105002 (10pp). DOI: 10.1088/1361-6595/ab4301
5. S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin. Probe measurements in plasma of a rectangular hollow cathode // Journal of Physics: Conference Series. 2019, V. 1370, 012011 (5pp). DOI: 10.1088/1742-6596/1370/1/012011

Афанасьев В.П.¹, Капля П.С.², Лобанова Л.Г.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Яндекс

Москва, 119021, ул. Льва Толстого, 16

v.af@mail.ru

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПИКОВ УПРУГООТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Создание аппаратуры, позволившей успешно определять пики электронов, квазиупруго-отраженных от различных атомов многокомпонентного образца с энергетическим разрешением удовлетворяющем критерию Релея [1] открыло новую способность Электронной Спектроскопии – определять атомы исследуемой мишени по величине атомного веса. Возможности новой разновидности Электронной Спектроскопии (ЭС), названной Спектроскопией Пиков Упруго Отраженных Электронов (СПУОЭ) были ярко продемонстрированы в работах Maarten Vos [1,2], который назвал данную методику электронным

Rezerford Back Scattering - ERBS. СПУОЭ сняла с ЭС запрет [3] на возможность фиксации в образцах изотопов водорода и гелия [4]. С появлением СПУОЭ возникла потребность создания методики обработки экспериментально измеренных спектров для получения количественной информации о послойном составе исследуемой мишени. Это приводит к необходимости решения ряда задач:

1. Задача определения площади под пиком сформированным упруго-отраженными электронами связана с вычитания фона, созданного неупруго-рассеянными электронами. Похожая проблема возникает и в рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) [3]. Методы решения данной задачи представлены в работах [5,6].

2. Учет влияния многократных упругих рассеяний на уширение и смещение пика упруго отраженных электронов.

3. Последовательный учет влияния многократных упругих рассеяний на интенсивность сигнала СПУОЭ. Если ответы на первые два вопроса нашли свое отражение в работах [5-7], то решению 3-ей задачи посвящена настоящая работа.

В работе показан эффект возрастания интенсивности пика электронов, отраженных от легкой компоненты многокомпонентной мишени.

Список литературы

1. Went M.R., Vos M. //Surface and Interface Analysis. 2007, v. 39, p. 871.
2. Went M.R., Vos M. //Appl. Phys. Lett. 2007, v.90, №7, Art. no 072104.
3. Hofmann S. Auger- and X-Ray Photoelectron Spectroscopy in Materials Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
4. Vos M. //Ultramicroscopy. 2002, v.92, p. 143.
5. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S., Ridzel O.Y. // Journal of Physics: Conference Series. 2016, v. 748, Art. no 012005.,
6. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S. , Kaplya P.S., Köppen M., Ridzel O.Yu., Subbotin N.Yu. , Hansen P., // Journal of Physics: Conference Series. 2017, v. 891, Art. no 012303.
7. Afanas'ev V.P., Afanas'ev M.V., Lubenchenko A.V., Batrakov A.A., Efremenko D.S., Vos M.//Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2010, v. 177, p. 35.

Базулин И.А.^{1,2}, Виноградова А.В.^{1,2}, Лубенченко А.В.¹, Иванов Д.А.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва, Троицк, 108840, Пушкиновых, вл.12
BazulinIA@mpei.ru

КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ЭНЕРГИЙ СВЯЗИ НИОБИЯ И ЕГО ОКСИДОВ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

Для расшифровки и верной интерпретации рентгеновских фотоэлектронных спектров необходимо знать энергию связи. Определение энергии связи является большой проблемой. Сложность связана с тем, что точное значение энергии связи электрона в атоме зависит от его химического окружения. Энергия электрона во внутренней оболочке определяется взаимодействием Кулона с другими электронами и притягивающим потенциалом ядра. Любое изменение химического окружения будет влиять на перераспределение заряда валентных электронов данного атома в пространстве и вызывать изменение потенциала, заметное для внутреннего электрона. Сдвиг энергий связи внутренних электронов в зависимости от химического окружения происходит на некоторую величину, которая является разницей между энергией связи соединения и энергией связи составляющих это соединение чистых элементов, и называется энергией химического сдвига. Для чистых элементов существуют экспериментальные базы, однако значения в них сильно отличаются [1]. Для соединений данные зачастую противоречат друг другу или вовсе отсутствуют. Например, для оксидов существует много работ, однако значения энергии связи, приведенные в этих статьях, измерены для конкретных энергетических уровней, в то время как остальные остаются неизученными. Ее определение является важнейшей задачей для расшифровки спектров и проведения последующих анализов.

В работе был проведен квантово-механический расчёт энергий связи ниобия и его оксидов со степенями окисления 2, 4 и 5 методом функционала плотности [2,3]. Расчёт был проведен в приближении локальной спиновой плотности в предположении, что локально электронная плотность представляет собой однородный электронный газ. Энергия обменного взаимодействия вычислялась по формуле Дирака. Корреляционная энергия однородного электронного газа рассчитывалась по интерполяционной формуле Воско, Уилка и Ньюэ. Для обменного функционала использовалась обменная поправка Бекке.

В результате расчёта были получены энергии связи для чистого ниобия, его оксидов. Была получена зависимость энергии связи от степени

окисления ниобия, что позволяет рассчитать энергии связи для оксидов с другими степенями окисления.

Дальнейшие работы позволят получить аналогичные зависимости для оксидов и нитридов других металлов, что улучшит качество обработки экспериментальных.

Список литературы

1. **Crist B.V.** XPS in industry—Problems with binding energies in journals and binding energy databases // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2019. Vol. 231. P. 75–87.
2. Квантово-механические методы исследования наноразмерных систем. / В.Г. Заводинский, А.А. Гниденко. Хабаровск. 2013. 49 с.
3. Введение в теорию функционала плотности. Учебно-методическое пособие / Сатанин А.М. Нижний Новгород, 2009. 64 с.

*Балмашнов А.А.¹, Бутко Н.Б.¹, Калашников А.В.¹, Степин В.П.¹,
Степина С.П.¹, Умнов А.М.¹*

¹ Российский университет дружбы народов «РУДН»,
Москва, 117198, Миклухо-Маклая, 6

ИНЖЕКТОР ПЛАМЕННОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ ОТКРЫТОГО КОАКСИАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

В работе представлены результаты первых экспериментов по формированию потока ЭЦР-плазмы в открытом коаксиальном резонаторе инжектора, отличающегося от описанного в работе [1] профилем стационарного магнитного поля и способом организации постоянного электрического поля.

Инжектор (рис. 1) состоит из открытого цилиндрического коаксиального резонатора (2), диаметром 5,2 см, и цилиндрического электрода (3), потенциал на котором мог варьироваться. Ввод рабочего газа осуществлялся в радиальном направлении через отверстие, расположенное на цилиндрической стенке резонатора. В работе использовался магнетронный генератор со стабилизированным источником питания (М-107, $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1,5 \times 10^{10}$ рад с⁻¹). СВЧ-мощность подавалась на осевой электрод резонатора (4), диаметром 0,4 см. Коэффициент стоячей волны ненагруженной системы составлял 1,1, а в условиях разряда не превышал 1,05. Азимутально-симметричное стационарное магнитное поле создавалось неодимовыми кольцевыми магнитами (1) диаметром 5 см.

Распределения магнитного и СВЧ-электрического полей определяли расположение азимутально-симметричной области ЭЦР-взаимодействия (5), которая находилась на расстоянии $R_c = (1,6 \pm 0,2)$ см от оси резонатора и $Z_c = (5,0 \pm 0,2)$ см от его сплошной торцевой стенки.

Диагностика параметров плазменного потока осуществлялась дискообразным электродом (диаметр 6 см), продольно ориентированным

электрическим зондом с охранным кольцом способным перемещаться как в продольном, так и в поперечном направлениях (диаметр активной части зонда 0,2 см) и пятисеточным электростатическим анализатором энергии заряженных частиц. Влиянием постоянного магнитного и СВЧ-электрического полей при обработке результатов измерений пренебрегалось. В работе использовался турбомолекулярный насос. Массовый расход рабочего газа рассчитывался по величине давления в вакуумной системе и производительности используемого насоса. Давление измерялось традиционным образом. В качестве рабочего газа использовался аргон.

Установлены режимы работы инжектора (диапазоны давления рабочего газа, вводимой СВЧ-мощности, потенциалы на цилиндрическом электроде), при которых плавающий потенциал в потоке плазмы, измеряемый дискообразным электродом, находится вблизи 0 В, что указывает на степень равенства токов электронной и ионной компонент плазмы, также установлена зависимость потоковой энергии ионной компоненты от потенциала на цилиндрическом электроде и величины ионного тока от режима работы инжектора.

Полученные результаты показывают перспективность продолжения работ по данной тематике.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-29-21041.

Список литературы

1. **Packan D.** ECR Plasma Thruster development at Onera // EPIC Workshop, 25-28 November 20114, Brussel.

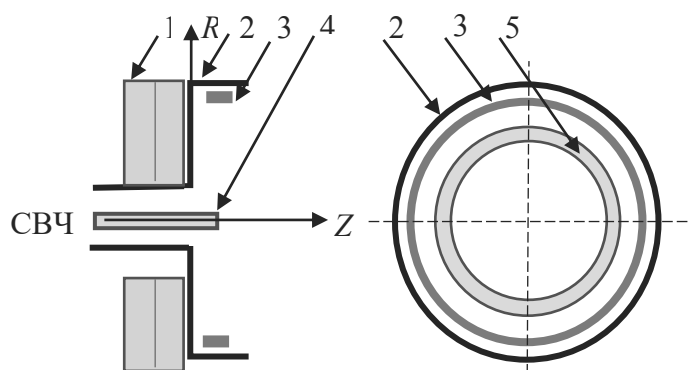


Рис. 1. Схема источника плазмы.

1 – кольцеобразные магниты, 2 – корпус цилиндрического резонатора, 3 – цилиндрический электрод, 4 – центральный электрод коаксиального резонатора, 5 – область ЭЦР-взаимодействия.

*Бочаров Г. С.¹, Герасимов Д. Н.¹, Григорьев И. С.¹, Дедов А. В.¹,
Елецкий А. В.^{1,2}*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,
111250, Красноказарменная, 14

² Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская улица, 13,
с. 2 Москва, Россия, 125412

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРИСАДКИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

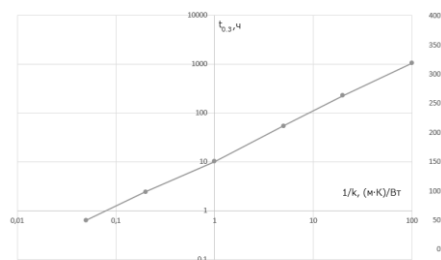
Фазоизменяемые материалы (ФИМ), способны в результате фазового перехода запасать и выделять значительное количество энергии при изменении температуры. Это позволяет использовать ФИМ в качестве основы тепловых аккумуляторов, запасующих тепловую энергию при повышенных температурах и выделяющих ее при снижении температуры ниже точки фазового перехода. Применение покрытий из ФИМ позволяет существенно снизить суточные колебания температуры внутри жилых и производственных помещений без дополнительных затрат энергии. Оценки показывают, что в результате использования в строительстве тепловых аккумуляторов на основе ФИМ может быть достигнута экономия порядка 10% всей вырабатываемой на Земле энергии, что способствует снижению негативного воздействия энергетики на окружающую среду. Подобные тепловые аккумуляторы могут найти свое применение не только в строительстве, но также в солнечной и ветровой энергетике в устройствах для накопления энергии и в системах тепловой защиты сложных технологических систем, суперкомпьютеров и других радиоэлектронных устройств. Перспективы использования ФИМ в тепловой и солнечной энергетике в качестве основы для накопителей энергии, а также в электронике и приборостроении стимулируют активные исследования во многих лабораториях мира.

На пути широкого распространения материалов на основе ФИМ в тепловых аккумуляторах энергии возникает ряд проблем, препятствующих повсеместному использованию таких материалов. Прежде всего следует отметить весьма низкую теплопроводность ФИМ, которая приводит к высокой инерционности тепловых аккумуляторов. Оценки показывают, что прохождение тепла через слой ФИМ толщиной 10 см занимает несколько часов. Тем самым тепловые аккумуляторы на основе ФИМ с большим опозданием реагируют на изменения внешней температуры, что существенно ограничивает возможности использования таких устройств. Отсюда возникает задача повышения теплопроводности материалов на основе ФИМ. Один из подходов к решению этой задачи связан с добавлением в материал, содержащий ФИМ, наночастиц углеродных присадок (нанотрубки, графен, сажа), коэффициент теплопроводности

которых на 4 – 5 порядков превышает соответствующие значения для ФИМ. В данной статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований характера распространения тепла в ФИМ с присадкой углеродных нанотрубок (УНТ).

В качестве ФИМ в работе использовался парафин марки П-2, характеризуемый температурой плавления 52°C, плотностью 870 кг/м³, удельной теплоемкостью 2200 Дж/(кг К), скрытой теплотой фазового перехода (плавления) 157 КДж/кг и коэффициентом теплопроводности 0,267 Вт/м К. В качестве присадки применялись УНТ двух типов:

однослойные УНТ типа TUBALL™ с аспектным отношением $(2,5-4,1) \cdot 10^3$ и многослойные УНТ типа DEALTOM с аспектным отношением 70 -100. В качестве индикатора перколяционного порога для образцов с присадкой УНТ использовалась измеренная



зависимость электропроводности от концентрации присадки. Эксперименты показывают, что существенное снижение теплопроводности материала достигается при условиях, когда парафин заливается в готовую перколяционную структуру, сформированную из УНТ типа DEALTOM, которые, в отличие от УНТ другого типа, не проявляют тенденцию к агрегации (слипанию). Согласно результатам измерений, положение перколяционного порога для электропроводности и теплопроводности образцов находится вблизи 10% (по массе).

Зависимость времени прогрева от величины, обратной коэффициенту теплопроводности.

парафин заливается в готовую перколяционную структуру, сформированную из УНТ типа DEALTOM, которые, в отличие от УНТ другого типа, не проявляют тенденцию к агрегации (слипанию). Согласно результатам измерений, положение перколяционного порога для электропроводности и теплопроводности образцов находится вблизи 10% (по массе).

Моделирование процесса распространения тепла в ФИМ с присадкой УНТ проводилось в зависимости от значений коэффициента теплопроводности и скрытой теплоты фазового перехода с помощью пакета программ COMSOL. В качестве показателя времени прогрева было выбрано время, за которое температура материала на глубине 10 см меняется на 30% от исходного значения. На рисунке представлена вычисленная зависимость времени прогрева от величины, обратной коэффициенту теплопроводности при теплоте фазового перехода 157 КДж/кг. Расчеты показывают, что время прогрева материала пропорционально значению скрытой удельной теплоты фазового перехода и обратно пропорционально значению коэффициента теплопроводности материала. Таким образом, увеличение теплопроводности ФИМ позволяет увеличить его эффективную ёмкость как теплового аккумулятора за счёт увеличения объёма материала, претерпевающего фазовый переход за фиксированное время.

Исследование проведено в НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSWF-2020-0023).

Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Зинина Е.П., Сусский А.В.
ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»,
101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, 4
bmbasar85@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Материалы исследований по изучению воздействия СВЧ газового разряда низкотемпературной плазмы на поверхность металлических изделий различного технологического назначения [1] позволили установить, что оно зависит от значений режимных параметров: анодного тока магнетрона, формирующего уровень подводимой в рабочую камеру СВЧ-мощности, и подаваемого на изделие потенциала смещения. Назначение параметров производится с учетом физико-механических свойств поверхностного слоя (микротвердости и плотности), а также массы и геометрии изделия, но даже при обработке однотипных изделий приводит к разбросу значений параметров, характеризующих сформированные свойства поверхностного слоя. В процессе эксплуатации это приводит к разбросу значений показателей, характеризующих повышение долговечности изделий [2].

Снижение величины разброса возможно на основе учета электрических свойств системы «низкотемпературная плазма – изделие», поскольку их параметры, изменяясь в процессе модификации, отображают его ход количественно [3]. Учет этих свойств на основе регистрации электрических сигналов создает предпосылки для решения комплекса вопросов управления процессом модификации поверхностного слоя. Однако для этого необходимо оценить эффективность управления теоретически, поскольку с физической точки зрения процесс модификации является довольно сложным. Это связано с тем, что в ходе процесса модификации изменяются параметры как самой плазмы, так и поверхностного слоя изделия. Тогда единственным возможным подходом для теоретического изучения процесса модификации становится его моделирование на ЭВМ для получения ответа на вопрос о том, как условия модификации, формируемые значениями режимных параметров, влияют на ее результаты, по крайней мере, в среднем. Если это станет известно, взаимосвязь между условиями и результатами модификации можно считать установленной, и использовать ее для оценивания как возможности, так и эффективности управления процессом модификации.

В докладе представлен подход и разработана модель в виде эквивалентной электрической схемы, позволяющая получать и изучать поведение электрических сигналов, которые возникают при взаимодействии электромагнитного и электростатического полей в газовом разряде

низкотемпературной плазмы, сформированном вблизи поверхности изделия. Проведен анализ блоков модели с точки зрения воспроизведения требуемых выходных сигналов, и выполнена их замена аналогами, обеспечивающими получение сигналов более близких по виду и/или значениям параметров к реальным сигналам и сокращающими время их получения в процессе моделирования. Сравнение сигналов, полученных с помощью модели, с реальными сигналами, возникающими в электрической цепи работающей установки, показало, что на качественном уровне модель отображает закономерности их формирования адекватно. Было также проведено сравнение вольтамперных характеристик: полученной с помощью модели и реальной, снятой на технологической установке. Сравнение показало, что характеристики, во-первых, хорошо согласуются между собой, поскольку коэффициент корреляции между ними имел значение 0,963, во-вторых, являются нелинейными, что закономерно с позиций состава, структуры электрической цепи и диапазонов значений ее параметров, прежде всего параметров системы «низкотемпературная плазма-изделие». Это позволило считать модель адекватной.

Выполнен анализ электрических сигналов. Обоснован показатель, отображающий стабильность процесса взаимодействия плазмы с поверхностью изделия по степени отклонения формы сигнала от синусоидальной.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду, за счет гранта которого (проект №19-19-00101) было выполнено исследование

Список литературы

1. The study of the physical processes of low-temperature plasma formation and its effects on metal product surface / В Brzhozovskii, S Gestrin, V Martynov, E Zinina // Journal of Physics: Conference Series. 2017. **891** (2017) 012297.
2. Composite structure formation on the surfaces of geometrically complex products / В М Brzhozovskii, N S Azikov, V V Martynov and E P Zinina // Journal of Physics: Conference Series. **1281** (2019) 012006.
3. Improved Efficiency of the Process of Low-Temperature Plasma Hardening Based on its Monitoring / N.S. Azikov, B.M. Brzhozovskii, M.B. Brovkova and etc. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. Vol. 46. No. 6. Pp. 582-588.

*Будаев В.П.^{1,2}, Федорович С.Д.¹, Мартыненко Ю.В.², Егорихина М.Н.³,
Алейник Д.Я.³, Карпов А.В.², Лукашевский М.В.¹, Губкин М.К.¹, Будаева
М.В.⁴, Лазукин А.В.¹, Марченков А.Ю.¹*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Красноказарменная, 14, Москва, Россия

² НИЦ Курчатовский институт,
123182, пл. Академика Курчатова, 1, Москва, Россия

³ ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский
университет» Минздрава России, 603005, Нижний Новгород, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет «МФТИ»,
141701, Институтский п.9, г. Долгопрудный, Московская область, Россия
budaev@mail.ru

ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ТИТАНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ НА БИОСОВМЕСТИМОСТЬ

Обработка металлов в современных плазменных установках при мощных плазменных нагрузках приводит к существенному изменению микро- и наноструктуры поверхности [1-2]. Плазменное облучение титана, вольфрама, молибдена, тантала, железа и некоторых других металлов приводит к росту высокопористой наноструктурированной поверхности. Такие материалы характеризуются новыми физическими и химическими свойствами. Металлические материалы широко используются для изготовления имплантатов, заменяющих твердые ткани человека или их функции, электрокардиостимуляторы и т. д. Материалы, предназначенные для биомедицинского использования должны соответствовать множеству требований, таких как биосовместимость, в том числе, отсутствие цитотоксичности, наличие поверхности, обеспечивающей адгезию клеток и позволяющей клеткам сохранять свою функциональную активность при взаимодействии с материалом и т.д [3]. Высокопористые титановые материалы достаточно широко применяются в медицине, в частности в ортопедии. Развиваются плазменные технологии обработки имплантатов с шероховатой и пористой поверхностью, в том числе для изготовления электрокардиостимуляторов с улучшенными характеристиками, см. [4]. Высокопористые титановые материалы могут быть использованы в качестве новых материалов для каркасов в тканевой инженерии и биомедицине. В данной работе описаны

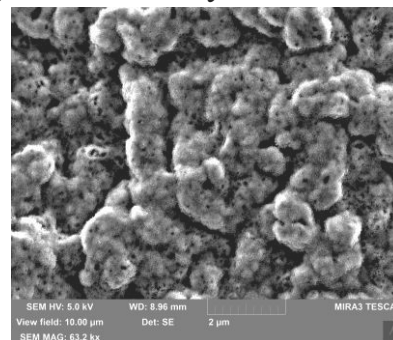


Рис. 1. СЭМ-микрофотографии поверхности титана после облучения плазмой в ПЛМ

образцы титана для каркасов с высокопористой поверхностью, полученные плазменным облучением.

Образцы титана диаметром 8 мм и толщиной 2 мм облучались гелиевой плазмой в плазменной установке ПЛМ с длительностью разряда до 200 мин. Тепловая нагрузка плазмы на образцы титана составляла 0,5 - 1 МВт /м². После плазменной обработки проведен анализ титановых образцов. Анализ образцов с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) подтвердил образование пористой стохастической наноструктурированной поверхности с размером пор и структурных элементов менее 500 нм, Рис.1. Химический анализ поверхности выявил титан и азот (который, видимо, присоединился на поверхность при контакте с атмосферой в период после извлечения из ПЛМ) на поверхности полученных образцов.

Полученные после плазменной обработки титановые образцы будут протестированы на биосовместимость для оценки эффективности высокопористых титановых материалов для изготовления имплантатов.

Будут проведены исследования на цитотоксичность, выраженность адгезии поверхностно зависимых клеток с оценкой жизнеспособности и пролиферативной активности.

Работа поддержана грантом РФФИ 17-19-01469, анализ материала поддержан Министерством науки и высшего образования РФ проект № FSWF-2020-0023.

Список литературы

- [1] Budaev V P et al 2012 JETP Letters 95 (2) 78
- [2] Budaev V P 2017 Physics Letters A 381 3706–13
- [3] Egorikhina M N et al 2019 Bioactive Materials 4 334–345
- [4] Martynenko Yu V, Budaev V P 2019 Journal of Physics: Conference Series 1383 012027

Бухаров А.В.¹, Балашов А.В.¹, Королёв В.Д.², Черненко А.С.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, ул. Красноказарменная, 14

² Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт»,
Москва, 123182, пл. Курчатова, 1
boukharov@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОНОДИСПЕРСНЫХ ГРАНУЛ ЗАМОРОЖЕННОГО ДЕЙТЕРИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Среди разнообразных конструкций лайнеров для сильноизлучающих Z-пинчей наиболее перспективными являются микрогерерогенные полимерные среды.

Такие среды — достаточно новый объект в физике плазмы. Как плазмообразующая, она даёт принципиально новую возможность создания плазмы с высокой начальной плотностью, точными геометрически-

ми характеристиками и управляемым элементным составом, что важно для импульсных источников рентгеновского излучения мультитераваттной мощности. Примером такой среды может служить дейтерированный полиэтилен.

Достоинствами нагрузок из полиэтилена являются: возможность формирования равномерной гомогенной плазмы при нагреве разрядным током вещества мишеней; отсутствие мелкомасштабных неустойчивостей и хаотических выбросов с их поверхности; возможность варьировать плотность, химический состав и геометрические размеры нагрузок.

В серии экспериментов, выполненных на установке Ангара-5-1, по исследованию динамики сжатия

плазмы Z-пинча, с использованием нагрузок из дейтерированного полиэтилена, было установлено, что при протекании через нагрузки разрядного тока до 4 МА формировались локальные плотные, высокотемпературные плазменные образования с максимальным нейтронным выходом 3×10^{10} .

Альтернативой нагрузок из дейтерированного полиэтилена может служить криогенная корпускулярная мишень — поток с гетерогенной структуры, состоящий из монодисперсных гранул замороженного дейтерия с малой усредненной плотностью (0.01 - 0.1) г/см³. Вследствие меньших потерь на излучение и большей почти в четыре раза плотности, по сравнению с мишенью из дейтерированного полиэтилена, плазма в пинче будет иметь более высокую температуру. В результате

нейтронный выход может увеличиться в 16 раз ($Y \sim n^2$) и составит 5×10^{11} нейтронов при токе 3 МА. Такой выход нейтронов на малом токе будет рекордным и сравнимым с результатами, полученными в лаборатории Сандиа (США) при токах в пять раз больших.

*Голубев С.В., Скалыга В.А., Изотов И.В., Шапошников Р.А., Разин С.В.,
Боханов А.Ф., Казаков М.Ю., Лапин Р.Л., Выбин С.С., Шлепнев С.П.,
Киселева Е.М.*

ФИЦ «Институт прикладной физики Российской академии наук»,
603950, Россия, Нижний Новгород, Ульянова, 46

ЩЕЛЕВОЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ СФОКУСИРОВАННОГО ПУЧКА ИОНОВ ДЕЙТЕРИЯ

Данная работа является продолжением исследований, направленных на разработку точечного источника для нейтронной томографии на быстрых нейтронах. Основным элементом данного устройства является сильноточный ионный источник на основе плотной плазмы ЭЦР разряда, удерживаемой в прямой магнитной ловушке [1], [2]. В предложенном типе нейтронного источника генерация нейтронов происходит в результате дейтерий-дейтериевой реакции синтеза, которая протекает при попадании сфокусированного пучка ионов дейтерия на дейтерий-содержащую мишень. При таком подходе качество нейтронографического изображения зависит от размера излучающей области на мишени, который определяется фокусировкой ионного пучка. Таким образом, для достижения наиболее качественных изображений исследуемых объектов необходимо добиться наименьшего размера ионного пучка на мишени. В предыдущих экспериментах удалось сфокусировать пучок в область размером порядка 1 мм. При этом размер пучка определялся по свечению CsI сцинтиллятора. Такой метод не позволил определить размер пучка с точностью выше, чем 1 мм, так как высокоэнергичные нейтроны оставляли дефекты на поверхности сцинтиллятора, что сильно снижает точность измерений за короткое время.

В рамках представленной работы была сконструирована система диагностики ионного пучка на основе подвижных пластин с ортогональными щелями шириной 0.5 мм, как альтернатива использовавшемуся ранее методу определения поперечного размера пучка по свечению сцинтиллятора. Во время экспериментов данная система располагалась в вакуумном объеме внутри диагностической камеры на пути распространения пучка. Конструкция щелевого сканера позволяла сдвигать щели в вертикальном и горизонтальном направлениях с шагом 0.15 мм, за которыми располагался цилиндр Фарадея, принимающий ток части пучка, прошедшей сквозь щели. Таким образом,

данная система позволяла получать поперечные профили плотности тока пучка. Также перед системой щелей располагался электрод, позволявший проводить измерения полного тока пучка, экстрагированного из плазмы. В работе представлены распределения, полученные при оптимальных параметрах напуска рабочего газа в вакуумный объем, магнитного поля фокусирующей линзы и напряжения экстракции.

Также в рамках данных исследований было проведено численное моделирование комбинированной (электростатической и магнитной) системы фокусировки с помощью открытого набора библиотек IBSimu. Добавление дополнительного электрода вблизи области экстракции позволяет сформировать параллельный пучок ионов, который в дальнейшем фокусируется магнитной линзой. В такой системе была исследована зависимость фокусировки пучка от степени компенсации пространственного заряда. Было показано, что увеличение данного параметра позволяет в разы уменьшить размер области, в которую фокусируется пучок. При этом минимальный размер пучка составляет 0.13 мм. Этот эффект может быть объяснен тем фактом, что наличие в пучке дополнительных электронов уменьшает пространственный заряд пучка, в следствие чего снижается влияние сил кулоновского отталкивания.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 16-19-10501.

Список литературы

1. Golubev, S.V., Skalyga, V.A., Izotov, I.V., Sidorov, A.V., Razin, S.V., Shaposhnikov, R.A., Lapin, R.L., Bokhanov, A.F., Kazakov, M.Y., Journal of Instrumentation, **14** (1), C01007.
2. Skalyga, V. A., Golubev, S. V., Izotov, I. V., Shaposhnikov, R. A., Razin, S. V., Sidorov, A. V., Bokhanov, A. F., Kazakov, M. Yu., Lapin, R. L., Vybin, S. S., Review of Scientific Instruments, **91**, 013331.

*Зарвин А.Е.¹, Художитков В.Э.¹, Каляда В.В.¹, Яскин А.С.¹,
Дубровин К.А.¹*

¹ Новосибирский национальный исследовательский государственный
университет,
Новосибирск, 630090, Пирогова, 2
zarvin@phys.nsu.ru

ИНИЦИАЦИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЯХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Сверхзвуковая струя газа или газовой смеси, истекающая из звукового или сверхзвукового сопла в разреженную среду, является чрезвычайно интересным объектом для исследователей по ряду причин. Во-первых, формирующаяся струя, как правило, защищена от внешней среды боковыми и замыкающей ударными волнами, что позволяет изучать процессы, происходящие именно в исследуемом газе или смеси газов, без внешних воздействий. Во-вторых, вследствие резкого расширения газа по мере его движения от сопла, последовательно происходит замораживание колебательных, вращательных и даже поступательных степеней свободы молекул, что позволяет исследовать релаксационные процессы и энергообмен между отдельными степенями свободы молекул. В-третьих, в струе достаточно легко создать условия кластерообразования, причем можно варьировать достигаемый средний размер кластеров от димеров до тысячемеров. Наконец, в-четвертых, воздействие на частицы струи тем или иным разрядом позволяет инициировать столкновения между нейтральными, возбужденными и ионизованными частицами с образованием новых структур.

В настоящей работе приведены результаты исследования ряда процессов, происходящих в сверхзвуковых потоках газовых смесей при воздействии на них высоковольтным (порядка 10 кэВ) электронным пучком. Исследования выполнены на газодинамическом комплексе экспериментальных установок ЛЭМПУС-1 [1], ЛЭМПУС-2 [2] и ПХУ [3] Новосибирского государственного университета. Для диагностирования процессов использованы спектральные методы, а также молекулярно-пучковая масс-спектрометрия.

Регистрация осколков состава кластированного потока аргона. Сравнение результатов измерения квадрупольным масс-спектрометром с собственным ионизатором (энергия электроном 70 эВ) и с отключенным ионизатором при транспорте ионов, образованных пучком электронов непосредственно в струе, показало существенное различие в масс-спектрах. В работе обсуждаются причины отличий.

Конверсия метана в кластированном потоке. Ионизация струи сверхзвуковой метана электронным пучком, дальнейший транспорт ионов

от области ионизации до скиммера в условиях столкновений в струе ионов с нейтральными частицами, дальнейший пролет ионов через коллимирующую диафрагму на детектор масс-спектрометра представил возможность регистрации масс-спектра углеводородного ряда с особенностями, свидетельствующими о возникновении в струе более тяжелых углеводородов. При анализе учтена регистрируемая последовательность кластерных пиков метана.

Возникновение свечения высокой интенсивности в потоке смесей аргона с моносиланом и метаном. Обнаружен и отождествлен механизм внутрикластерного энергообмена с передачей возбуждения, инициированного электронами пучка, атомам аргона с последующим интенсивным излучением на определенных длинах волн нейтрального атома.

Образование аргония в смеси аргон - водород. При сверхзвуковом истечении смеси аргон – водород в условиях ионизации потока высоковольтным электронным пучком при последующей масс-спектрометрии обнаружены интенсивные пики ArH^+ . С ростом плотности газов в потоке, в условиях формирования аргоновых кластеров зарегистрированы также пики Ar_2H^+ , Ar_3H^+ и $(\text{ArH}^+)_2$, т.е. димеры и тримеры аргона с присоединенным ионом водорода, а также димеры протония.

В работе приводятся соответствующие иллюстрации и дается подробное описание процессов.

Список литературы

1. **Зарвин А.Е., Каляда В.В., Коробейщиков Н.Г. и др.** Модифицированная установка для газодинамических исследований и технологических разработок // ПТЭ. 2016. № 2. С. 127-134.
2. **Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С. и др.** Экспериментальная установка для плазмохимических исследований // ПТЭ. 2016. № 6. С. 50-56.
3. **Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh. et al.** Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // IEEE Trans. Plasma Sci. 2017. V. 45. Issue 5. P. 819-827

*Коньков А.А.^{1,3}, Rogozin К.А.^{1,2,3}, Квасков В.С.¹, Будаев В.П.^{1,2},
Федорович С.Д.¹*

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² НИЦ «Курчатовский институт»,
Москва, 123182, пл. Академика Курчатова 1

³ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва, Троицк, 108840, Пушкиных, вл.12

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ МИШЕНИ НА ОСНОВЕ ЛИТИЕВОЙ КАПИЛЛЯРНО – ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Одна из важных проблем на пути к созданию термоядерного реактора – деградация материала первой стенки камеры, обращённой к плазме. В результате неконтролируемых срывов плазмы, стенки камеры подвергается термическим нагрузкам. Взаимодействие с плазмой приводит к образованию наноструктур на поверхности материалов. Наиболее перспективный способ решения данной проблемы – использовать капиллярно – пористые структуры, заполненные жидким металлом. Способность к самовосстановлению и устойчивость к деградации свойств после взаимодействия с плазмой являются основными преимуществами КПС перед твёрдыми материалами [1].

В ходе экспериментальных исследований, проводимых на установке ПЛМ [2] в НИУ МЭИ была экспериментально подтверждена устойчивость литиевых капиллярно – пористых систем на основе лития к стационарным плазменным нагрузкам. Параметры плазмы в ПЛМ: тепловые нагрузки в пределах от 0.1 до 1 МВт/м² ; длительность разряда – до 200 минут и более, плотность плазмы до $5 \cdot 10^{12} \text{см}^{-3}$; температура электронов до 4 эВ с фракцией горячих электронов до 50 эВ, ток разряда до 15 А, рабочий газ – гелий, поток ионов на поверхность КПС до $3 \cdot 10^{21} \text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$. Параметры мишени: диаметр 30 мм, материал сетки – молибден.

Основные требования к параметрам литиевой КПС:

- верхний предел тепловых нагрузок на КПС - 18-20 МВт/м²,
- рабочая температура поверхности, обращенной к плазме, - до 550-600°С,
- длительность плазменной нагрузки 0.5 – 3 часа.

Для расширения рабочих параметров мишени было предложено использование системы водяного охлаждения для отвода части тепловой нагрузки от мишени. В данной работе разработан эскиз такой системы, проведён теплогидравлический расчёт с использованием программных продуктов для численного решения уравнений теплообмена и

гидродинамики на основе результатов предыдущих экспериментов с литиевыми КПС. Моделирование тепловых процессов в мишени показало, что водяное охлаждение эффективно отводит тепло от корпуса мишени.

Список литературы

1. И.Е. Люблинский и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015. Т. 38.1. 7.
2. В.П. Будаев и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017. Т. 40.3. 23.

*Kuznetsov V. E.¹, Dudnik Yu. D.¹, Safronov A. A.¹, Vasilieva O. B.¹,
Shiryaev V. N.¹*

¹ Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences, Russia, 191186 Saint-Petersburg, Dvortsovaya emb., 18
julia_dudnik-s@mail.ru

APPLICATION OF POWERFUL AC PLASMA TORCH WITH RAIL ELECTRODES IN INDUSTRIAL INSTALLATIONS

The paper deals with the study of the possibility to use powerful AC plasma torches in industrial installations, primarily for the utilization and processing of municipal solid waste with the possibility to obtain a useful product - synthesis gas, which can subsequently be used for power engineering needs [1]. The designs and key features of the next-generation plasma equipment created at the IEE RAS for these purposes [2] and options for its application is considered.

One of the significant advantages of plasma torches with rail type electrodes is the low voltage level on the main electrodes, the values of which are 380 / 480V. In this case, the minimum interelectrode distance is ~ 20 mm. In order to ensure the ignition of the arcs of the interelectrode gap at such supply voltage, a single-phase high-voltage injector of charge carriers is used. During its operation in the zone of a minimum distance between the main electrodes of the plasma torch, the necessary conditions are created for the ignition of the main arcs. The mass-average temperature of the plasma flow of this plasma torch model is about 1500-5500 K. These plasma torches are capable of operating over a wide range of gases: CO₂, inert, oxygen-free and oxidizing.

There has been a growing interest in creating environmentally friendly waste processing technologies. Currently, the rate of waste generation and energy consumption per capita are growing steadily. Accordingly, the various waste treatment problem is becoming increasingly relevant and requires immediate and highly effective measures for its solution.

Therefore, on the basis of the IEE RAS plasma torches [3], a laboratory plasma chemical reactor was built, designed to operate as a part of the waste treatment plant. The maximum productivity of the laboratory model of the installation is about 50 kg / h of the processed material. The advantages of the

plasma torches application are that their use provides the high-temperature heating and almost complete decomposition of the organic part of the waste with the formation of minerals and a very high degree of disinfection of the inorganic part, which allows efficient and safe processing of a wide range of materials and significantly reduces the amount of waste to be disposed of.

The experiments on the application of alternating current plasma torches with rail electrodes in plasma-chemical waste treatment plants have shown that it is a promising technique. The depth of carbon and hydrogen transformations reaches 80%, which may confirm the possibility and efficiency of using plasma torches to create plasma-chemical systems and technologies.

Acknowledgments

This work was partially supported by the RFBR grant № 16-08-01073.

References

1. Use of alternating-current plasma torch for processing potentially hazardous substances./Safronov A.A., Vasileva O.B., Dudnik Yu.D., Kuznetsov V.E., Shiryayev V.N., Subbotin D.I., Obraztsov N.V., Surov A.V., Popov V.E.//High Energy Chemistry. 2018. V. 52. №4. P. 319-323.
2. Research and application of ac plasma torch for the processing of potentially hazardous materials./Safronov A.A., Vasilieva O.B., Dudnik Yu.D., Kuznetsov V.E., Shiryayev V.N. // In a book: *Sovremennyye problemy teplofiziki i energetiki Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii: in 2 volumes. (In the book: Modern Problems of Thermophysics and Energy Materials of the International Conference: in 2 volumes.)* 2017. P. 251-252.
3. The investigation of the ac plasma torch working conditions for the plasma chemical supplement./ Safronov A.A., Vasileva O.B., Dudnik Yu.D., Kuznetsov V.E., Shiryayev V.N., Subbotin D.I., Pavlov A.V. // *Proceedings 14th High-Tech Plasma Processes (HTTP14)* 2016. P. 81.

Курашов А.А., Молчанов А.М.,
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»,
Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993
kurashov094@mail.ru

РАСЧЕТ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТЕРМИЧЕСКИ И ХИМИЧЕСКИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ИОНИЗИРОВАННЫХ ПОТОКОВ

В данной работе описана методика расчета ионизированного потока в условиях химической и термической неравновесности, возникающей при полетах на больших скоростях или на больших высотах, с учетом взаимодействия движущейся электропроводящей сплошной среды с электромагнитным полем.

Математическая модель ионизированного потока включает в себя: уравнения неразрывности, количества движения, полной энергии, вращательной энергии, энергии электронов, колебательных энергий, сохранения масс химических компонентов [1]. В уравнения количества движения и энергия введены источники, учитывающие электромагнитные силы.

Для колебательной энергии использовался подход, основанный на модели гармонического осциллятора. Для расчета обмена между различными энергетическими модами использовалась модель Ландау-Теллера.

При расчете высокоэнтропийных течений воздуха учитывались химические реакции, включающие следующие компоненты: N_2 , N , O_2 , O , NO , N_2^+ , N^+ , O_2^+ , O^+ , NO^+ , e^- . В некоторых задачах добавлялись реакции с участием H_2O , H_2 , OH , H , CO_2 , CO , C , а также реакция ионизации цезия.

Расчет электрической проводимости газовой смеси проводился на основе анализа интегралов столкновений молекул и теплового движения электронов.

Предложенный метод был использован для решения ряда известных задач: летного эксперимента Ram-C; эксперимента Цимера; конвергентного магнитно-гидродинамического ускорителя и др.

Полученные результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными и результатами других авторов.

Список литературы

1. **Молчанов А.М.** Математическое моделирование гиперзвуковых гомогенных и гетерогенных неравновесных течений при наличии сложного радиационно-конвективного теплообмена / А. М. Молчанов. - М. : МАИ, 2017. - 159 с.

Лубенченко А.В., Лубенченко О.И., Иванов Д.А., Иванова И.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
LubenchenkoAV@mpei.ru

THINFILMSANALYSISMPEI – ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА МНОГОСЛОЙНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ РФЭС

Одним из неразрушающих методов анализа тонких плёнок является рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). С помощью РФЭС проводят химический и фазовый анализ поверхности.

Требования к программному обеспечению для анализа фотоэлектронных спектров становятся всё более сложными. Для определения послойного химического и фазового состава поверхности необходимо решать задачи разложения спектральной линии на парциальные пики (определение интенсивности и положений пиков) и вычитания фона многократно неупруго рассеянных фотоэлектронов.

В основу существующих программ обработки фотоэлектронных спектров (например, CasaXPS [1], MultiQuant [2], Unifit [3]) не заложены физические принципы, приводящие к сдвигам и уширению пиков упруго рассеянных фотоэлектронов. Для вычитания фона используются методы Ширли и Тугорда. Эти методы не учитывают многослойность и многокомпонентность реальной поверхности твердого тела. В итоге качество разложения линии на составляющие пики зависит от опыта, интуиции и глубины знаний исследователя об особенностях образовании пиков в фотоэлектронном спектре.

В данной работе представлено программное обеспечение ThinFilmsAnalysisMPEI, в котором реализован метод послойного химического и фазового анализ на основе интерпретации фотоэлектронных спектров [4]. Этот метод послойного анализа основан на методе вычитания фона, учитывающий неоднородность неупругого рассеяния по толщине и методе разложения линии на парциальные пики, основанный на физической модели формирования фотоэлектронной линии.



Рис. 1. Блок-схема программного обеспечения ThinFilmsAnalysisMPEI.

ThinFilmsAnalysisMPEI состоит из четырёх блоков: *Методы анализа, Эксперимент, Моделирование спектров, Характеристики вещества* (см. рис. 1). Программное обеспечение написан на объектно-ориентированном языке MatLab и использует матричные библиотеки MatLab. Графический интерфейс пользователя ThinFilmsAnalysisMPEI предоставляет пользователю доступ к различным объектам и функций в виде графических компонентов экрана (окон, кнопок, линий и т. п.).

В работе программное обеспечение ThinFilmsAnalysisMPEI было протестировано путём анализа синтетических спектров, предложенных Си и Браун [5], и реальных экспериментальных спектров окисленной на воздухе тонкой плёнки ниобия на кремниевой подложке (эти спектры были получены с помощью модуля электронно-ионной спектроскопии на базе платформы Нанофаб 25 (НТ-МДТ)). Показана эффективность, точность и производительность программного обеспечения ThinFilmsAnalysisMPEI.

Список литературы

1. Fairley N. CasaXPS Manual 2.3.15 Rev 1.2. Casa Software Ltd., 2009.
2. Mohai M. XPS MultiQuant: multimodel XPS quantification software: 8 // *Surface and Interface Analysis*. John Wiley & Sons, Ltd, 2004. Vol. 36, № 8. P. 828–832.
3. Hesse R., Chassé T., Szargan R. Unifit 2002—universal analysis software for photoelectron spectra: 7 // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2003. Vol. 375, № 7. P. 856–863.
4. Lubenchenko A.V. et al. XPS study of multilayer multicomponent films // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 427. P. 711–721.
5. Seah M.P., Brown M.T. Validation and accuracy of software for peak synthesis in XPS: 1 // *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 1998. Vol. 95, № 1. P. 71–93.

Манухин В.В., Манухин М.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
manukhinvv@mpei.ru

РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСПЫЛЕНИЯ СЛОЁВ SiO₂ С ПОВЕРХНОСТИ Si ИОНАМИ ГЕЛИЯ

В работе предлагается модель распыления слоисто-неоднородных бинарных соединений легкими ионами, основанная на подходе, апробированном для случаев распыления многокомпонентных однородных материалов [1], и слоисто-неоднородных однокомпонентных

мишеней [2], в котором предполагается, что атомы мишени распыляются за счет двух механизмов:

распыление нисходящим потоком ионов: прохождение потока ионов слоя толщиной x ; выбивание первичных атомов отдачи в направлении вглубь слоя; отражение первично выбитых атомов компонент A и B от нижележащих слоев материала (в том числе от подложки), либо распыление нижележащих атомов материала (в том числе и атомов подложки); эмиссия первичных и вторичных выбитых атомов, движущихся на глубине x к поверхности;

распыление восходящим потоком ионов: прохождение потока ионов слоя толщиной x ; отражение потока ионов от нижележащих слоев материала (в том числе от подложки); выбивание ионами, движущимися к поверхности,

первичных атомов отдачи на глубине x (в предлагаемой модели учитываются также атомы выбитые из подложки); эмиссия выбитых атомов, движущихся с глубины x к поверхности.

В результате использования этой модели, получена простая

аналитическая формула, позволяющая рассчитать коэффициенты

распыления слоисто-неоднородных бинарных соединений. Результаты расчетов коэффициентов распыления слоев SiO_2 с поверхности чистого кремния ионами гелия (He^+) в зависимости от толщины слоя оксида кремния (нормальное падение ионов с энергией 1 кэВ) приведены на рис. 1. в сравнении с результатами компьютерного моделирования по программе SRIM-2013pro (<http://www.srim.org/>) [3]. Наблюдается хорошее соответствие расчетных значений и результатов компьютерного моделирования. Причем, необходимо отметить, что наблюдается тот же «эффект зеркала», что и в случае распыления слоисто-неоднородных однокомпонентных материалов [2] – заметное увеличение коэффициентов распыления компонентов слоя (при определенной толщине слоя) в

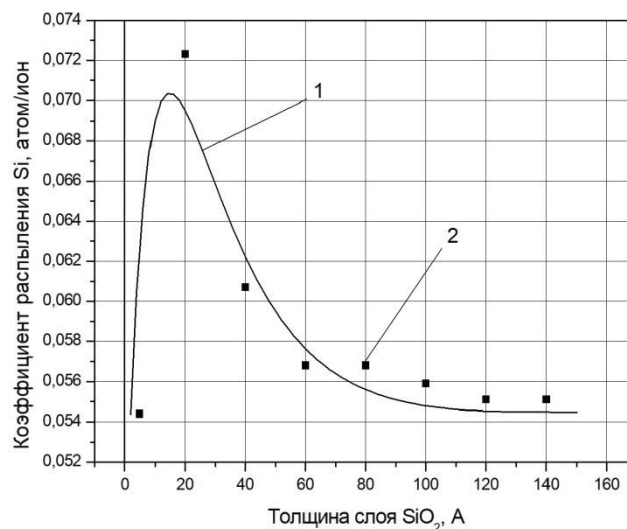


Рис. 1. Результаты расчетов коэффициентов распыления кремния из слоя SiO_2 с поверхности Si ионами гелия в зависимости от толщины слоя SiO_2 : 1 – расчет по формуле, 2 – результаты компьютерного моделирования SRIM-2013pro.

сравнении с коэффициентами распыления чистых материалов. В данном случае эффект, вероятно, обусловлен тем, что эффективная масса верхнего распыляемого слоя меньше массы атомов однородной подложки.

Список литературы

1. Манухин В.В. Распыление двухкомпонентных однородных мишеней легкими ионами // Прикладная физика, 2018, № 6, с.69-73.
2. Манухин В.В. Расчет полных коэффициентов распыления слоистых неоднородных структур при бомбардировке мишеней легкими ионами // Прикладная физика, 2016, № 5, с.5-9.
3. James F. Ziegler, Jochen P. Biersack, Matthias D. Ziegler // SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter // <http://www.srim.org>

Орешко А.Г.¹, Мавлюдов Т.Б.²

¹ Московский авиационный институт-национальный исследовательский университет,

Москва, 125080, Волоколамское шоссе, 4

² Научно-исследовательский институт приборов,
140080, Московская область, г. Лыткарино

A.G.Oreshko@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШАРОВОЙ МОЛНИИ С ДЕЙТЕРИЙ-СОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДОЙ

Проблема энергии является одной из самых актуальных проблем, которые стоят перед человечеством. Отсутствие существенного прогресса при решении этой проблемы с помощью управляемого термоядерного синтеза является причиной поиска альтернативных методов получения экологически чистой энергии. Наблюдателями было установлено, что вход шаровой молнии в емкость с водой приводит к испарению значительного количества воды. Это значит, что шаровая молния обладает значительной энергией. Оценки показывают, что плотность энергии шаровой молнии составляет величину порядка 10^4 Дж/см³[1]. Однако определенная по результатам спектральных измерений температура шаровой молнии в зоне ее генерации составляет только 1.5 эВ. Нет оснований считать, что энергия шаровой молнии накоплена в виде тепла во время ее генерации. Измерения потенциала шаровой молнии и обнаруженное явление генерации нейтронов во время ее формирования из-за ядерного фотоэффекта позволило создать протон-электронную модель шаровой молнии, внешний слой которой состоит из высокоэнергетичных протонов, а ядро из электронов. Кинетическая

энергия вращающихся во внешнем слое шаровой молнии протонов составляет примерно 20 МэВ [2].

Задачей исследования является экспериментальное исследование возможности получения реакции ядерного синтеза, которая должна происходить при взаимодействии частиц шаровой молнии, прошедшей через дейтерий-содержащую среду, находящуюся в камере. Интерес представляет возможность создания мюон-каталитического реактора для осуществления d-t цикла [3]. В качестве дейтерий-содержащей среды в экспериментах использовались вода и водяной пар. Оценки показывают, что концентрация дейтерия в водяном паре является достаточно высокой и составляет порядка 10^{14} см^{-3} . Эксперименты по взаимодействию шаровой молнии с водяным паром, которые были ранее выполнены в [4], косвенно показали на наличие излучения. Однако из-за отсутствия нейтронной диагностики измерения нейтронных потоков в [4] не проводились. Были созданы устройства для измерения нейтронных потоков на основе детекторов СНМ-12, СНМ-42, 2Х701Б-1, а также на основе ФЭУ со сцинтиллятором, который экранирован свинцовыми блоками толщиной 5 см. Так как генератор шаровых молний “Прометей” во время запуска является источником интенсивных электромагнитных помех, то блоки детектирования запитывались через разделительный трансформатор и высокочастотный фильтр. Генерация шаровой молнии осуществлялась при нормальных атмосферных условиях. В серии предварительных экспериментов обнаружена генерация нейтронов в стадии формирования шаровой молнии из-за ядерного фотоэффекта, которая подтверждает результаты, полученные в [2]. Во время разряда по выходу жесткого гамма-излучения обнаружена также реакция безнейтронного синтеза в циклах, в которых участвуют протоны, углерод и азот. Отметим, что углерод имеется в избытке в конструкционном материале разрядной камеры для получения шаровой молнии – сферотроне, а азот – в воздухе.

Список литературы

1. Nikitin, A.I., Bychkov, V.L., Nikitina, T.F., Velichko, A.M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. V. 42. № 12. P. 3906–3911.
2. Oreshko A.G., Oreshko A.A., Mavlyudov T.B. // Journ. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. V.182. P.194-199.
3. Oreshko A.G., Oreshko A.A., Mavlyudov T.B. // In: Proc. 45th Eur. Phys. Soc. Conf. on Plasma Physics. 2018. Prague.
Report P1.2031 <http://ocs.ciemat.es/EPS2018PAP/pdf/P1.2031.pdf>
4. Oreshko A. G. // In: Proc. XXVIII Int. Conf. on Phenomenon in Ionized Gases. 2007. Prague. P.1884-1887.

Прохорова Е.И., Платонов А.А., Назаров А.И.
Петрозаводский государственный университет,
Петрозаводск, 185910, пр. Ленина, 33
prokhorova@petrsu.ru

ЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В АРГОНЕ

Газоразрядные среды с инверсным распределением нейтральных и заряженных частиц представляют большой интерес для науки и практических приложений. Ярким примером этого является работа лазеров. Во второй половине прошлого века в ряде статей рассматривается возможность формирования инверсной функции распределения электронов (ФРЭ), приводящей к отрицательной проводимости плазмы. По аналогии с инверсной заселенностью возбужденных состояний в лазерах, такая среда будет усиливать электромагнитные волны. Одной из первых была работа [1]. Наиболее полное теоретическое исследование проведено в работе [2]. Показано, что при инверсной ФРЭ в низкоэнергетической части в газах с рамзауэровским минимумом сечения упругого рассеяния будет формироваться стационарная абсолютная отрицательная проводимость.

В настоящей работе экспериментально исследовался тлеющий разряд в аргоне. Определялись вторые производные зондового тока по потенциалу зонда, вольт-амперные характеристики, плавающий потенциал, ионный ток. Измерения проводились в цилиндрической стеклянной разрядной трубке (рис. 1) с внутренним диаметром 74 мм с подвижным плоским молибденовым катодом диаметром 56 мм и плоским молибденовым анодом диаметром 60 мм. В трубке располагался подвижный цилиндрический зонд длиной 3 мм и диаметром 0.2 мм, выходящий из центра анода и позволяющий проводить измерения вдоль оси разряда. Максимальное расстояние L между анодом и катодом составляло 165 мм. Исследования проводились при разрядных токах 10–20 мА и давлениях газа 0.2–1.3 Торр. Питание на трубку подавалось от стабилизированного источника тока.

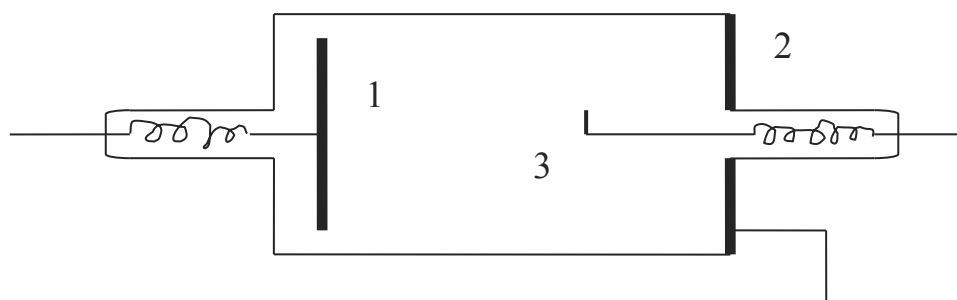


Рис. 1. Схема газоразрядной трубки (1 – плоский холодный молибденовый подвижный катод, 2 – плоский молибденовый анод, 3 – подвижный цилиндрический зонд).

По ионному току определялась концентрация электронов. По нулю второй производной исследовалось аксиальное распределение потенциала пространства. По второй производной исследовалось аксиальное распределение максимумов ФРЭ. В результате исследования были экспериментально установлены условия возникновения инверсной ФРЭ и определена ее локализация в разряде. Установлен формирующийся при этом профиль распределения потенциала.

Для питания зондов использовались стабилизированные источники тока. Для измерения напряжения и тока зонда использовались измерительные приборы класса точности 0.2. Для уменьшения случайных погрешностей измерения проводились в нескольких порциях газа. Измерения повторялись 7-10 раз.

Аргон был выбран для возможности экспериментальной проверки кинетического моделирования газоразрядной плазмы с целью исследования инверсии ФРЭ и отрицательной проводимости электронов как газ с рамзауэровским минимумом сечения упругого рассеяния.

Список литературы

1. G. Bekefi, J.L. Hirshfield and S.C. Brown. Kirchhoff's Radiation Law for Plasmas with Non-Maxwellian Distributions // *Phys. Fluids* 4, 173 (1961). doi: 10.1063/1.1724424.
2. Chengxun Yuan, Jingfeng Yao, E.A. Bogdanov, A.A. Kudryavtsev, and Zhongxiang Zhou. Formation of inverse electron distribution function and absolute negative conductivity in nonlocal plasma of a dc glow discharge // *PHYSICAL REVIEW E* 101, 031202(R) (2020).

Рыжков С.В.

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана,
Москва, 105005, 2-ая Бауманская, 5, стр. 1

HE-3 КАК ИСТОЧНИК ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ: МАЛОРАДИОАКТИВНЫЙ СИНТЕЗ И БОЛЬШИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Рассмотрен D-³He топливный цикл, который представляет компромиссный вариант для термоядерного синтеза – намного чище, чем D-T (почти как безнейтронная p-¹¹B) реакция [1-9]. Интерес к таким малорадиоактивным топливам проявляют венчурные компании, финансируемые из частных источников, такие как Tri-Alpha Energy, Helion Energy, General Fusion Inc., EMC2 Energy Matter Conversion Corporation, Lawrenceville Plasma Physics Inc. и другие [10-14]. Обсуждаются вопросы добычи гелия-3. В недрах и атмосфере Земли необходимые для мировой энергетики запасы изотопа ³He отсутствуют.

Достаточные для соответствующей энергетики запасы имеются в грунте Луны (реголите). Если недавно объявленные планы ряда стран (Китай, Евросоюз, Россия, США, Япония) по созданию баз на Луне и промышленному освоению ее недр начнут реализовываться, то в ближайшем будущем возникнет острая необходимость в проекте промышленного D-³He-реактора. Поэтому большие запасы ³He на Луне и в солнечной системе и сам лунный гелий-3 – это предмет растущего международного интереса. Хотя на данный момент ³He достаточно как топлива для проведения инженерных тестовых программ. Практически все резервы ³He в США переданы для нужд национальной безопасности, т.к. ³He-нейтронные детекторы – очень эффективные и чувствительные к гамма-лучам, что делает Россию страной с наибольшими запасами ³He. В работе также приведена оценка запасов изотопа гелия-3 на планете Земля.

Список литературы

1. **Khvesyuk V.I., Santarius J.F., Emmert G.A., et al.** D-³He field reversed configuration fusion power plant // Fusion Technology. 2001. V. 39, № 1T. P. 410—413.
2. **Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A., Anikeev A.V.** Plasma kinetics models for fusion systems based on the axially-symmetric mirror devices // Fusion Science and Technology. 2011. V. 59, № 1T. P. 39—42.
3. **Ryzhkov S.V.** Compact toroid and advanced fuel - together to the Moon?! // Fusion Science and Technology. 2005. V. 47. № 1T. P. 342—344.

4. **Ryzhkov S.V.** Comparison of a deuterium - helium-3 FRC and mirror trap for plasma confinement // Fusion Science and Technology. 2007. V. 51. № 2Т. P. 190—192.
5. **Кузенов В.В. и др.** Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды. 2-е изд. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 328 с.
6. **Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V.** Formation of a compact toroid for enhanced efficiency // Physics of Plasmas. 2014. V. 21. 022501.
7. **Ryzhkov S.V.** Low radioactive and hybrid fusion - a path to clean energy // Sustainable Cities and Society. 2015. V. 14. P. 313—315.
8. **Romadanov I.V., Ryzhkov S.V.** Compact Toroid Challenge experiment with the *increasing in the energy input into plasma and the level of trapped magnetic field* // Fusion Engineering and Design. 2014. V. 89. P. 3005-3008.
9. **Рыжков С.В., Чирков А.Ю.** Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: Физматлит, 2017. 200 с.
10. <https://tae.com>
11. <https://www.helionenergy.com>
12. <https://generalfusion.com>
13. www.emc2fusion.org
14. <https://lppfusion.com>

Семенёв П.А.^{1,2}, *Токталиев П.Д.*³, *Моралев И.А.*⁴, *Казанский П.Н.*⁴,
*Битюрин В.А.*⁴, *Бочаров А.Н.*⁴

¹ Центральный институт авиационного моторостроения
им. П.И. Баранова,
111116, Москва, Авиамоторная, 2

² Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-ая Бауманская, 5

³ Институт проблем химической физики РАН,
142432, Московская обл., г. Черноголовка, проспект академика
Семенова, 1

⁴ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская, 13, стр.2
semenyov@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ВО ВНЕШНЕМ ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Отрыв потока является одним из основных факторов, увеличивающих потери полного давления в задачах внутренней и внешней аэродинамики дозвуковых скоростей. При течении в агрессивных (сильно изогнутых) каналах турбомашин и переходных каналах авиационного двигателя отрыв потока может приводить к существенному росту потерь полного давления и увеличению степени неравномерности профилей полного давления и скорости ниже по потоку. В связи с актуальностью задачи управления отрывом, существует ряд попыток использовать для управления отрывом, в том числе и плазменные актуаторы. Основными достоинствами плазменных актуаторов являются их малый вес; возможность монтажа электродов практически без внесения возмущений в поток, отсутствие сложных механических или пневматических систем. В настоящей работе проведено исследование перспективной схемы плазменного актуатора на основе дугового разряда во внешнем постоянном магнитном поле.

Для описания процесса движения электрической дуги после ее образования была реализована математическая модель, основанная на магнитогазодинамическом одножидкостном приближении уравнений гидродинамического метода описания плазмы: уравнения Навье-Стокса, дополненные для описания электромагнитной части протекающих процессов источниками членами. Для описания свойств ионизированного воздуха при высоких температурах и давлениях, использовано приближение локального термодинамического равновесия и готовые аналитические представления электрической проводимости, динамической вязкости, теплопроводности и изобарной теплоемкости [1],

потери энергии на излучение задавались с использованием коэффициента поглощения [2].

В работе выполнено численное исследование сеточной сходимости и устойчивости по начальным условиям рассматриваемой задачи. Проведена оценка вклада излучения, моделируемого источником членом в уравнении энергии, в интегральные характеристики дуги - скорость ее движения и напряженность. Проведен анализ образования и движения вихревых структур вблизи области, занятой горячим газом, дана качественная оценка влияния механизмов влияния плазменного образования на поток посредством генерации импульса и Джоулева тепловыделения. Проведено сравнение результатов анализа с имеющимися экспериментальными данными [3], а также с расчетами других авторов.

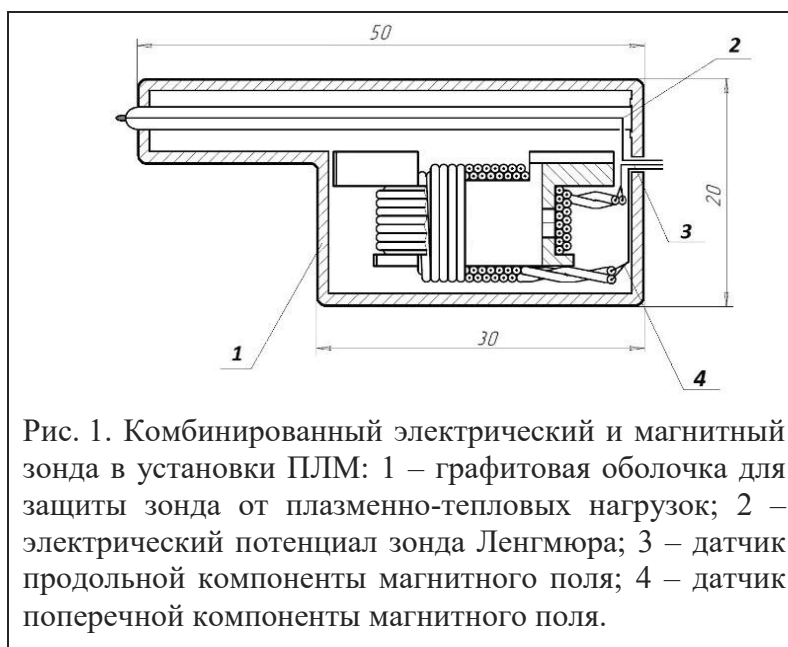
Список литературы

1. **D'Angola A., Colonna G., Gorse C., Capitelli M.** Thermodynamic and transport properties in equilibrium air plasmas in a wide pressure and temperature range // *Eur. Phys. J. D* 46, 129–150 (2008)
2. Оптические свойства горячего воздуха / И.В. Авилова, Л.М. Биберман, В.С. Воробьев. М. Наука, 1970. 320 с.
3. **Moralev I.A., Kazanskii P.N., Bityurin V.A., Bocharov A.N., Firsov A.A., Leonov S.B., Dolgov E.** Gas dynamics of the pulsed electric arc in the transversal magnetic field // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, in review

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДОВ В УСТАНОВКЕ ПЛМ

В токамаках и других термоядерных установках процессы переноса плазмы на стенку зависят от МГД активности и от электрических полей (дрейфы) в периферийной плазме. Необходимо развитие диагностик плазмы для одновременного измерения магнитных и электрических полей на периферии плазменных установок. В работе представлена разработанная в НИУ «МЭИ» система комплексной электромагнитной диагностики плазменного шнура в установке ПЛМ [1, 2] зондовым методом. Предложен электромагнитный зонд с геометрическими параметрами и свойствам, которые соответствуют требованиям работы в объёме плазменного разряда и позволяют измерять изменения параметров плазмы на характерных частотах флуктуаций и турбулентности в плазме. Предложена конструкция комбинированного зонда, Рис.1, для измерения локальных электрических и магнитных полей и схема его установки в разрядной камере

камере ПЛМ. Система будет регистрировать электрические и магнитные поля на малых пространственных масштабах. Созданы методы калибровки и теоретического описания подобной диагностики для измерения свойств дрейфово-диссипативной турбулентности с учетом магнитных колебаний.



Измеряемые системой частоты флуктуаций электрических и магнитных полей достигают 500кГц и 300кГц соответственно. Для калибровки

магнитной компоненты был специально сконструирован калибровочный стенд в НИЦ «Курчатовский институт». Была разработана методика описания влияния проводящей оболочки на амплитуда-частотную характеристику магнитного зонда. Разработана методика учёта поверхностных искажений амплитудно-частотных характеристик зонда с учетом экранирующей оболочки зонда. После апробирования зонда в ПЛМ на его основе будет разработан зонд для измерений свойств турбулентности плазмы и переноса плазмы в токамаке Т-15МД.

Эксперименты на ПЛМ поддержаны грантом РНФ 17-19-01469, испытание материалов зонда поддержано грантом РФФИ 19-29-02020, изготовление АСНИ на ПЛМ поддержано Мегагрантом РФ № 14.Z50.31.0042.

Список литературы

1. В.П. Будаев и др. // ВАНТ сер. термоядерный синтез. 2017, т.40. №3
2. В.П. Будаев и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. том 9. № 3. с. 283-294

Тазмеев Г.Х., Тазмеев Х.К.

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Набережночелнинский институт
Набережные Челны, 423810, проспект Мира, 68/19
GKTazmeev@kpfu.ru

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД С ВОДНОРАСТВОРНЫМ КАТОДОМ КАК ИСТОЧНИК ПОТОКА ПЛАЗМЫ ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Введение. Образование огромного количества бытовых и промышленных отходов является одной из глобальных экологических проблем современности. Для утилизации углеродсодержащих отходов широко используется огневая переработка – сжигание. Однако при сжигании образуется огромное количество вредных газовых выбросов. Плазменные источники позволяют многократно снизить объемы таких выбросов, т.к. исключается воздух, используемый в качестве окислителя. При использовании пароводяной плазмы вредные выбросы могут быть полностью устранены. При этом газообразные продукты плазменной переработки углеродсодержащих отходов могут быть получены в виде синтез-газа, представляющего собой смесь оксида углерода и водорода. Целью данной работы явилось формирование потока пароводяной плазмы из вещества жидкого катода (водного раствора) и исследование газификации углеродсодержащих отходов в таком потоке плазмы.

Результаты исследований. Создан и исследован газовый разряд между жидким катодом и твердотельным анодом в диапазоне токов 10-25 А. Межэлектродное расстояние увеличено до 20 см. В качестве катода были использованы растворы сульфата натрия, хлорида натрия, хлорида калия, гидроксида натрия и гидроксида калия в дистиллированной воде. В опытах фиксировалась динамика изменения физико-химических свойств водного раствора под воздействием газового разряда. Электрические параметры водного раствора хлорида натрия менялись в меньшей степени. Поэтому этот раствор был выбран для создания потока плазмы.

Исследовано влияние концентрации водного раствора хлорида натрия на формирование плазменного потока. Установлено, что энергетические затраты могут снижены при использовании водных растворов хлорида натрия с молярной концентрацией в пределах 0,05-0,2 моль/л. При таких концентрациях водного раствора разряд горел устойчиво без применения балластного резистора в цепи электрического питания.

На базе газового разряда с воднорастворным катодом разработан и создан генератор плазмы. Его мощность в рабочих режимах находилась в пределах 25-30 кВт. Тепловые потери через катод и анод были сравнительно малы. Их суммарное значение не превышало 30% от мощности генератора плазмы. В этом отношении генератор плазмы является вполне приемлемым для практического применения наряду с дуговыми плазмотронами.

Массовый расход потока плазмы принимался равным массовой скорости убыли водного раствора. Его максимальные значения доходили до 1,5 г/с и выше. Расчетное значение среднемассовой температуры составило порядка 3000 К.

Исследовано влияние вдува газа на характеристики генератора плазмы. Воздух от компрессора подавался в разрядный канал на разных участках между катодом и анодом. Установлено, что в генератор плазмы можно подавать газ массовой скоростью, сравнимой с потоком водяного пара, образуемого при горении разряда.

Разработана и создана техническая система для плазменной конверсии углеродсодержащих отходов в синтез-газ. За основу взята двухстадийная схема [1]. На первой стадии сырье подвергалось термической деструкции и диспергированию под воздействием дуговой плазмы. Летучие продукты транспортировались в разрядную камеру генератора плазмы с воднорастворным катодом. В качестве сырья были использованы отходы полиэтилена. Содержание водорода в образовавшемся газе измерялось анализатором водорода АВП-01, а оксид углерода определялся газоанализатором «Автотест».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-42-160011.

Список литературы

1. Фридланд С.В., Тазмеев А.Х., Мифтахов М.Н. Получение синтез-газа плазмохимической переработкой полимерных отходов // Вестник Казанского технологического университета. 2006. № 6. С. 10-15.

Тихонов В.Н.¹, Антипов С.Н.², Иванов И.А.¹, Тихонов А.В.¹, Юсупов Д.И.²

¹ ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии.

249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109-й км

² ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН,
125412 Москва, Ижорская улица, 13 стр.2

v.n.tihonov@yandex.ru

МИКРОВОЛНОВЫЙ ИСТОЧНИК НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НЕДЕСТРУКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

В последние десятилетия ведутся интенсивные разработки плазмохимических методов модифицирования поверхностей материалов, в том числе таких нетермостойких, как синтетические и природные полимеры. В качестве источников неравновесной плазмы атмосферного давления недеструктивного действия изначально использовались слаботочные разряды – коронный и поверхностно-барьерный, имеющие ограниченную эффективность активации газа. Сверхвысокочастотный (СВЧ) разряд атмосферного давления снимает ограничения по удельной мощности. Однако при атмосферном давлении СВЧ плазмотрон «классической» безэлектродной конструкции формирует «чистую» плазменную струю с температурой от нескольких тысяч градусов и более. Известные электродные СВЧ разрядники формируют аргоновую плазму с температурой в десятки градусов Цельсия, но такая плазма может содержать в себе продукты деструкции материала электродов.

Представленный в работе [1] новый тип микроволнового источника неравновесной плазмы недеструктивного действия (Рис. 1) обладает как признаками диэлектрического барьерного разряда (по конфигурации и низкой

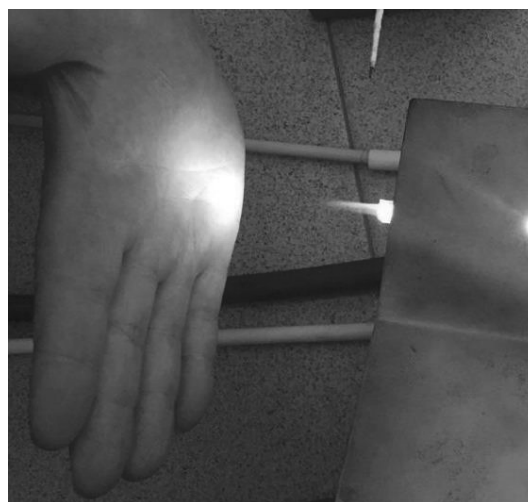


Рис. 1. СВЧ источник неравновесной плазмы.

температуре газа), так и способностью формирования «чистой» плазменной струи подобно классическому СВЧ плазмотрону. Однако необходимость использования циркулятора приводит к значительному росту стоимости и веса установки.

Основу представляемого источника плазмы составляет трехдецибелльный волноводный мост со связью по узкой стенке. Оба выходных плеча моста нагружены на идентичные короткозамкнутые (КЗ) отрезки волноводов. На расстоянии в четверть длины волны от КЗ поперек волноводов проходит разрядная трубка. При этом вектор E -компоненты в пучности стоячей электромагнитной волны оказывается перпендикулярен к оси диэлектрической трубки и, соответственно, выполняются геометрические условия формирования диэлектрического барьерного разряда.

Кроме того, поскольку выходные плечи моста нагружены симметрично, отраженная от КЗ (в отсутствии разряда) либо не поглощенная в разряде СВЧ мощность генератора поступает в развязанное плечо моста и, таким образом, всегда обеспечивается защита магнетрона от отраженной волны без необходимости использования дорогостоящего циркулятора. В качестве источника СВЧ мощности может быть использован бюджетный генератор, построенный на базе комплектующих для бытовых СВЧ печей [2].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00894.

Список литературы

1. Tikhonov V.N., Ivanov I.A. and Tikhonov A.V. A new type of non-thermal atmospheric pressure plasma source // J. Phys.: Conf. Ser. 1393 (2019) 012062 doi:10.1088/1742-6596/1393/1/012062
2. Тихонов В.Н., Иванов И.А., Крюков А.Е., Тихонов А.В. Бюджетные генераторы для микроволновых плазмотронов. // Прикладная физика. 2015. № 5. С.102-106.

Туриков В.А.

Российский университет дружбы народов,
Москва, 117198, Миклухо-Маклая, 6

НАГРЕВ ПЛАЗМЫ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ВЕРХНЕГИБРИДНОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ РЕЗОНАНСЕ В СВЕРХСИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

При резонансном воздействии мощного лазерного излучения на плазму в сверхсильном магнитном поле возбуждаются нелинейные плазменные колебания большой амплитуды, приводящие к сильному нагреву электронов [1, 2]. Нагрев на циклотронном резонансе давно используется в системах с магнитным удержанием плазмы. В таком методе в неоднородной области плазмы вблизи точного резонанса имеют место параметрические распадные процессы, определяющие эффективность нагрева [3]. При этом может происходить распад волны накачки на два верхнегибридных плазмона [4], а также могут возбуждаться моды Бернштейна. Подобные процессы должны происходить и при резонансном воздействии мощного лазерного излучения на плазму в сильном магнитном поле. Однако, амплитуды СВЧ излучения при нагреве в магнитных ловушках на несколько порядков ниже лазерных амплитуд. Это же относится и к величинам соответствующих магнитных полей в резонансных условиях. Поэтому результаты взаимодействия в этих двух случаях могут сильно отличаться друг от друга, что обусловлено влиянием нелинейных эффектов и релятивизма. В работе [2] исследовался процесс электронного нагрева в условиях параметрического резонансного взаимодействия лазерной волны необыкновенной поляризации с однородной плазмой в сверхсильном магнитном поле. В данной работе методом численного моделирования рассмотрено такое взаимодействие в неоднородной плазме при выполнении точного условия резонанса в некоторой точке. Моделирование проводилось помощью электромагнитного релятивистского PIC кода 1D2V, использованного в работах [1, 2]. Численные эксперименты показали, что в таком процессе возникает распад волны накачки на два верхнегибридных плазмона, а также возбуждаются электростатические колебания, представляющие собой нелинейные волны Бернштейна. В результате взаимодействия этих колебаний происходит значительный нагрев электронов. Для начальных температур порядка 1 кэВ средняя энергия электронов может возрасти в несколько раз. При этом эффективность нагрева возрастает по мере увеличения начальной электронной температуры, что связано с ростом амплитуд волн Бернштейна. Показано, что в области перепада плотности возникает отраженная электромагнитная волна на верхнегибридной

частоте. Получены зависимости средней энергии, набираемой электронами от амплитуды волны накачки и от градиента плотности в точке параметрического резонанса.

Список литературы

1. Красовицкий В.Б., Туриков В.А. Стохастический нагрев электронов при распространении в плазме необыкновенной волны большой амплитуды // Физика плазмы. 2010. Т. 36, С. 1085-1091.
2. Красовицкий В.Б., Туриков В.А. Нагрев электронов плазмы лазерным излучением в условиях параметрического резонанса в сильном магнитном поле // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 524-528.
3. Porcolab M., Cohen V.I. Parametric instabilities associated with intense electron cyclotron heating in the MTX tokamak // Nuclear Fusion. 1988. V. 28, P. 239-254.
4. Попов А.Ю., Гусаков Е.З. О возможности снижения порога неустойчивости параметрического распада необыкновенной волны на две верхнегибридные в неоднородной плазме // ЖЭТФ. 2015. Т. 147. С. 165-173.

Федорович С.Д.¹, Карпов А.В.^{1,2}, С.А. Грашин², Будаев В.П.^{1,2}, Губкин М.К.¹, Лукашевский М.В.¹, Воинкова И.В.¹, Rogozin К.А.¹, Коньков А.А.¹, Чан Куанг В¹, Васильев Г.Б.¹, Усманов Р.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная, 14

² НИЦ Курчатовский институт, 123182, Москва, пл. Академика
Курчатова, 1
fedorovichsd@mail.ru

ИСПЫТАНИЕ ГРАФИТОВОЙ ОБЛИЦОВКИ КАМЕРЫ ТОКАМАКА Т-15МД ПЛАЗМЕННЫМИ И ПУЧКОВЫМИ НАГРУЗКАМИ

Тепловые нагрузки на лимитеры и пластины дивертора в крупномасштабном токамаке могут достигать $\sim 2\text{--}5$ МВт/м² и более, приводя к повышению температуры пластин облицовки камеры токамака в среднем до ~ 1000 °С и более; в срывах и ЭЛМах импульсные кратковременные нагрузки на диверторные пластины будут достигать величины субгигаваттного масштаба – более 0,2 ГВт/м², что будет вызывать периодические повышения температуры материала до более высокого значения. При использовании графита в качестве материала облицовки компонент вакуумной камеры в токамаке Т-15МД такие мощные нагрузки могут привести к перегреву поверхности, эрозии, растрескиванию и даже разрушению. При циклических мощных тепловых нагрузках при воздействии ЭЛМов температура поверхности графитовых

пластин может приближаться к температуре сублимации. Поэтому необходимо оценить последствия возможных эффектов интенсивной эрозии поверхностных слоев графитовых материалов, использованных для облицовки компонентов камеры токамака Т-15МД. Определение всех характеристик стойкости графита при мощных стационарных плазменно-тепловых нагрузках важно также для принятия решений по выбору конструкции первой стенки в термоядерных установках следующего поколения, планируемых к сооружению в России (ТИН, ДЕМО).

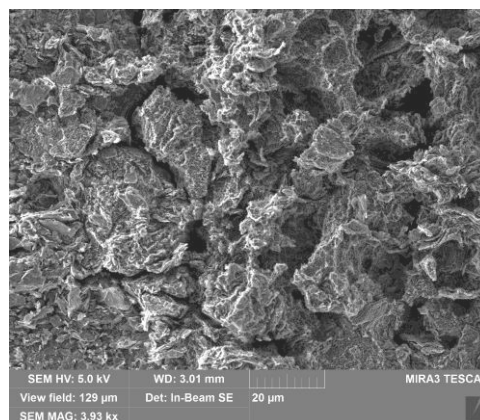


Рис. 1. СЭМ микрофотографии после испытания электроннолучевыми потоками 387 МВт/м²

Для моделирования стационарных плазменных нагрузок на графитовый материал в работе использована плазменная установка ПЛМ [1,2] с параметрами плазмы, релевантными периферийной плазме токамака Т-15МД. Для тепловых испытаний графита, моделирующих нагрузки при ЭЛМах в Т-15МД, в работе использована электронно-лучевая установка, обеспечивающая мощные пучковые нагрузки до ~380 МВт/м².

В плазменной установке ПЛМ проведено облучение графитовой облицовки камеры токамака Т-15МД стационарными плазменными нагрузками в течение более 200 минут, моделирующими условия в периферийной и диверторной плазме токамака. При испытаниях плазменными нагрузками 2 МВт/м² температура поверхности графитовых образцов достигала 1288 °С. Такая нагрузка не приводит к растрескиванию, изменению рельефа и распылению графита. Испытания мощными электронными пучками привели к изменению морфологии поверхности, рис. 1. Максимальные значения температуры поверхности образцов достигали величины от 1600 °С до 2600 °С.

Работа выполнена по договору №09-03/223/74 между НИЦ «Курчатовский институт» и НИУ «МЭИ» в рамках договора с ГК «Росатом» № 1/17519-Д/230/4-19, эксперименты на ПЛМ поддержаны грантом РФФ 17-19-01469, испытание электронными пучками поддержано грантом РФФИ 19-29-02020, изготовление АСНИ на ПЛМ поддержано Мегагрантом РФ № 14.Z50.31.0042.

Список литературы

1. В.П. Будаев и др. // ВАНТ сер. термоядерный синтез. 2017, т.40. №3
2. В.П. Будаев и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. том 9. № 3. с. 283-294

Чан Куанг В.¹, Ячук В.А.¹, Будаев В.П.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, Москва, Красноказарменная, 14

² НИЦ Курчатовский институт, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1
chutichxomray@gmail.com

СИСТЕМА ВЧ-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ГЕЛИКОНОВОГО ТИПА ДЛЯ УСТАНОВКИ ПЛМ-М

Для испытаний материалов как термоядерных, так и гибридных реакторов требуется стационарная замагниченная плазма. Её характеристики должны быть аналогичны периферийной плазме крупного токамака: температура электронов от 1 до ~50 эВ, плотность плазмы (1–10) 10^{18} м^{-3} [1]. Установка ПЛМ-2 [2] – одна из нескольких уникальных плазменных установок, в которой возможно получить данные параметры плазмы. Для достижения таких параметров необходимо решить ряд задач, в их числе – дополнительный нагрев плазмы.

В установке ПЛМ-2 будет создана система ИЦР нагрева плазмы с использованием геликоновой антенны. Геликоновые разряды дают больше плотность плазмы при сравнительно более низкой заданной входной мощности, чем любые другие ВЧ-разряды или DC, а также плазма наименее загрязнена за счет установки антенны вне камеры [3]. Система дополнительного нагрева плазмы состоит из разрядной камеры, которая прозрачна для электромагнитного излучения; геликоновой антенны; ВЧ-источника и системы согласования. Выбор типа антенны: Геометрия геликоновой антенны была выбрана в виде правой спиральной Nagoya III с азимутальной модой $m = +1$. Геликоновая антенна (рис.1) длиной 13 см; внутренним диаметром 7,5 см; внешним диаметром 8,0 см; изготовлена из медной ленты шириной 1,5 см и толщиной 0,5 см. В качестве ВЧ-источника был выбран ВЧ-генератор GHW-50 мощностью 5 кВт с частотой 13,56 МГц,

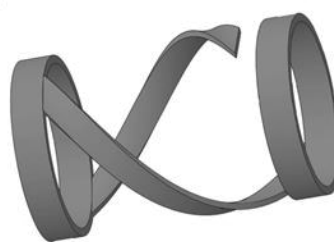


Рис. 1. 3D вид геликоновой антенны

имеющий внутреннее сопротивление 50 Ом. Система согласования (рис.2а) связывает антенну и ВЧ-генератор. Главная задача согласования – приравнять комплексное сопротивление нагрузки сопротивлению ВЧ-генератора для исключения потерь мощности. При описании и определении комплексного сопротивления нагрузки применяются диаграммы Смита (рис.2б). Было выбрано устройство автоматического согласования – Navio Match Network 3155405-300 производства Advanced Energy. Это устройство обладает широким диапазоном подстройки и

находится в области индуктивных нагрузок от $j25$ до $j130$ Ом реактивного сопротивления, а также позволяет гарантированно работать с активной составляющей ВЧ-нагрузки от ~ 1 до 30 Ом.

Ожидаемые параметры плазмы в установке ПЛМ-2: плотность плазмы $(1-10) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; температура плазмы более 10 эВ; диаметр плазменного шнура – 3,5 см; магнитное поле до 2,5 Тл.

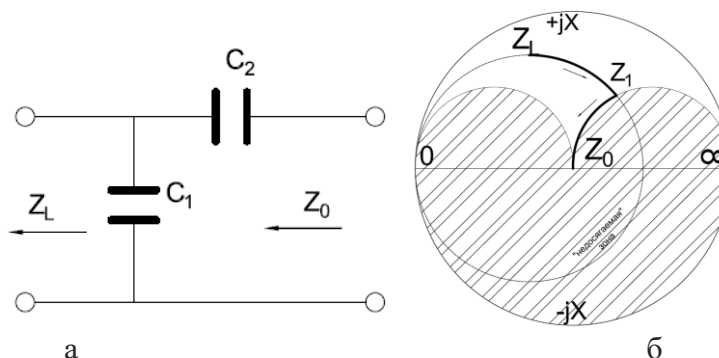


Рис. 2. а) Схема согласования : $C_1 = 1,15 \text{ нФ}$, $C_2 = 233 \text{ пФ}$;
 Z_0 – сопротивление ВЧ-генератора;
 Z_L – сопротивление нагрузки
 б) Диаграмма Смита

Работа поддержана грантом РФ 17-19-01469, изготовление АСНИ поддержано Мегагрантом РФ № 14.Z50.31.0042, изготовление камеры поддержано Росатомом.

Список литературы

- 1 Будаев В.П. и др. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ, 9, 3, 127 (2018)
2. Будаев В.П. и др. ВАНТ сер. Термоядерный синтез, 40, 3, 23 (2017)
3. F.F. Chen, Helicon Plasma Sources, in "High Density Plasma Sources", ed. By Oleg A. Popov // Noyes Publications, Park Ridge, NJ 1995, Chap. 1.

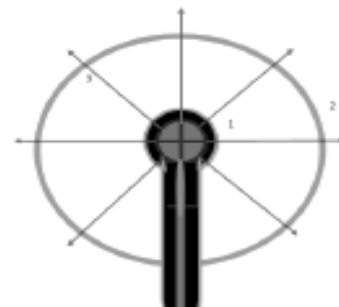
¹Kazan National Research Technical University named by A.N. Tupolev,
420111 Russia, 420111, Kazan, K. Marx str., 10

² City Clinical Hospital №7,
420103, Marshal Chuykov str., 54, Kazan, Russian Federation
optanir@mail.ru

INVESTIGATION OF THE ELECTRIC FIELD OF THE PLASMA BALL

Currently produced plasma balls have various design features and purposes. At the same time, the principle of operation of the plasma ball (PB) is described only in general terms and is of both scientific and practical interest. In order to use PB in various technological fields, including medicine, it is necessary to study the electric field created by this device. In this work, experiments were carried out to study the electric field intensity of the PB.

Plasma ball in working condition and its device are shown in Fig. 1. Structurally, the PB consists of an outer closed glass container 2, inside which there is an inert gas under reduced pressure. In the center of the glass container 2 is a hollow glass sphere 1, which has a conductive coating inside. To this coating, wire 4 is fed from the power source, which is located inside the base of the plasma ball. Voltage of 2 to 5 kilovolts with a frequency of 35 kHz is fed through the wire 4 to the glass sphere 1. The diameter of the glass container 2 we used in the PB tests was 10 cm, the power consumption was 8 W. The device operates from a normal AC 220V. When switched on, the electronic circuit transforms the input signal into a high-frequency voltage of large magnitude.



Inside the glass container 2, an electrical breakdown of the inert gas region occurs. As a result, a gas discharge is ignited, similar in appearance to a glow discharge [1, 2]. The glow of the plasma ball is not uniform and consists of individual filaments. A lot of thin luminous filaments begin with the glass sphere 1 and end at the walls of the glass container 2. The color of the filaments of a glowing cord discharge varies: at the glass walls it is pinkish, and in the middle part of the container it is bluish. The point from which the thread begins at the central electrode constantly wanders over the surface of the glass sphere 1. The thread itself changes its shape and pops up. This is due to the fact that the gas inside the filaments is heated, due to the current flow, and the buoyancy force of Archimedes acts on them. The same effect can be observed if you flip the PB so that its pedestal is at the top, and the glass container at the bottom. We also tried to apply a constant voltage of large magnitude to 30 KV

to the glass sphere 1.

Visually, the electric field around the plasma ball is easily detected by the ignition of a neon bulb. In our experiments we used a TN-0.2 neon light bulb with an ignition voltage of not more than 85 V and an operating current of not more than 0.25 mA. Since the neon lamp is small, it can be used to determine a fairly accurate distance from the plasma ball at which the discharge is ignited. It was found that this distance is 10 cm. If we further bring the neon bulb closer to the PB, then its glow and, consequently, the current through it increase. Using the known volt-ampere characteristic of this bulb, it is possible to calculate the electric field strength of the PB at various distances from its external surface. The electric field of the plasma ball increases with decreasing distance to its outer surface. A more accurate result was obtained using a wire probe connected to an oscilloscope. An alternating voltage was observed on the oscilloscope screen, the value of which increased as the probe approached the PB.

The work was carried out as part of project No. 18-42-161002 with the support of the Russian Federal Property Fund.

References

1. Yunusov R.F., Garipov M.M., Yunusova E.R. Heat Balance in the Positive Column of a Glow Discharge//Journal of Physics: Conf. Series 1058 (2018) 012051.
2. Yunusov R.F., Garipov M.M., Yunusova E.R. Transients in the longitudinal Glow Discharge//Journal of Physics: Conf. Series 1058 (2018) 012050.

Юнусов Р.Ф. , Гарипов М.М.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева ,
Казань, 420111, К.Маркса, 10
optanir@mail.ru

КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Особенностью тлеющего разряда по сравнению с другими видами газовых разрядов является существенная разница между температурой электронов и температурой нейтральной компоненты газа. Эта отличительная черта тлеющего разряда позволяет использовать его в разнообразных технологических операциях, требующих невысоких температур газовой смеси (плазмохимия, катодное распыление металла). Поэтому практический интерес представляют также области тлеющего разряда с малым энерговыделением. В этих областях возможны переходные процессы, возникновение различных неустойчивостей [1-2].

Статья посвящена экспериментальному изучению колебаний напряжения и силы тока в переходной области тлеющего разряда. Продольный тлеющий разряд зажигался в потоке воздуха, движущегося в цилиндрической разрядной камере. Медные полые электроды располагались на расстоянии 4 см друг от друга вдоль оси разрядной камеры. Контролировались давление газа $P = (4,7 - 26)$ кПа и его расход $G = (0 - 0,05)$ г/с. Сила тока разряда и напряжение изменялись соответственно в диапазонах: $I = (20-100)$ мА, $U = (1,5 - 4,2)$ кВ. Наблюдались падающие вольтамперные характеристики. Выявлены три участка ВАХ (рис.1.): в диапазоне токов $I = (100 - 70)$ мА наблюдался светящийся положительный столб разряда вплоть до катода с медленным возрастанием напряжения; в диапазоне токов $I = (70 - 30)$ мА происходит плавный переход к разряду без видимого свечения положительного со значительным увеличением напряжения разряда. При дальнейшем уменьшении силы тока (третий участок) разряд существует почти при постоянном напряжении вплоть до его гашения.

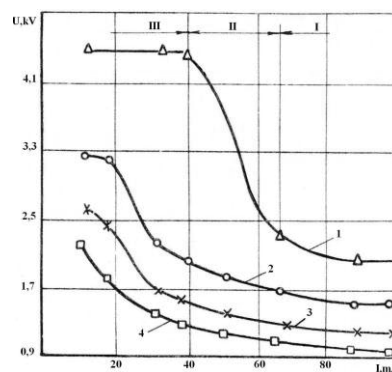


Рис. 1. ВАХ разряда

После зажигания разряда начальная точка попадает на участок I ВАХ. Далее сила тока разряда уменьшается. Кривые 1 и 2 соответствуют давлению $P = 26$ кПа: 1- $G=0,04$ г/с, 2- $G=0$. Кривые 3 и 4 соответствуют давлению $P=6,25$ кПа: 3 — $G=0,01$ г/с, 4 — $G=0$. Эти экспериментальные кривые позволяют сделать вывод о влиянии потока воздуха: из сравнения кривых 1 и 2 следует, что в разряде с потоком воздуха срыв нормального тлеющего разряда в его темную форму происходит при больших силах тока ($I=70$ мА), чем без потока воздуха ($I = 30$ мА). При этом и скачок напряжения получается больше примерно на 1кВ для разряда с потоком воздуха. При более низких давлениях (кривые 3 и 4) эти закономерности также наблюдаются, но становятся менее значительными. На границе второго и третьего участка ВАХ наблюдались низкочастотные и высокочастотные колебания напряжения и тока разряда. Низкочастотные колебания электрических параметров разряда с частотой 300 Гц возникают в неподвижном газе из-за низкочастотных колебаний напряжения источника питания. При подаче воздуха появляются высокочастотные колебания в момент перехода разряда из нормального вида в темную форму. Частота высокочастотных колебаний электрических параметров разряда зависит от расхода воздуха и изменялась в диапазоне $f = (170-100)$ кГц. С увеличением расхода воздуха частота указанных высокочастотных колебаний уменьшается. Работа была выполнена в рамках проекта № 18-42-161002 при поддержке РФФИ.

Список литературы

1. Yunusov R.F., Garipov M.M. Experimental study of voltage fluctuations in the longitudinal glow discharge//Journal of Physics: Conf. Series 927 (2017) 012077.
2. Yunusov R.F., Garipov M.M., Yunusova E.R. Transients in the longitudinal Glow Discharge//Journal of Physics: Conf. Series 1058 (2018) 012050.

Юнусов Р.Ф., Гарипов М.М.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева,
Казань, 420111, К.Маркса, 10
optanir@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Исследование различных режимов горения тлеющего разряда актуально, так как позволяет глубже понять физические процессы, протекающие в нем, а в дальнейшем найти оптимальные параметры разряда, его геометрию для осуществления различных технологических операций [1,2]. В данной работе использовалась разрядная камера, цилиндрический канал которой состоял из чередующихся стеклянных колец и тонких медных пластин. Медные пластины позволяют измерить распределение потенциала по длине разрядной камеры. Медные электроды представляют собой полый катод и сетчатый анод.

Внутренний диаметр катода и расстояние между медными пластинами составляло 10 мм. Газовый поток направлялся через внутренний канал катода к аноду. Расстояние между катодом и анодом составляло 6,5 см. Экспериментально исследовалось распределение потенциала, вольтамперные характеристики разряда, фотографировалась форма плазменной области. Давление газа в разрядной камере измерялось U-образным манометром, а расход газа – реометром РДС-10. Вольтамперная характеристика разряда регистрировалась двухкоординатным самописцем типа Н-306. Измерение плавающего потенциала производилось электростатическим вольтметром типа С-50. Измерения проводились в потоке воздуха в диапазоне давлений $P = 6,4 - 19$ кПа и скоростей $V = 0 - 10$ м/с. Сила тока разряда менялась в диапазоне $I = 0 - 100$ мА, а напряжение разряда $U = 1 - 2$ кВ. Вольтамперная характеристика разряда (рис. 1.) носит падающий характер. Было выявлено, что прямая и обратная ветви вольтамперной характеристики в интервале токов $I = 40 - 80$ мА не совпадают.

Треугольниками на этой кривой отмечены все характерные точки вольтамперной характеристики. Сама характеристика имеет падающий вид, что характерно для этого типа разряда. Видно, что с увеличением напряжения источника

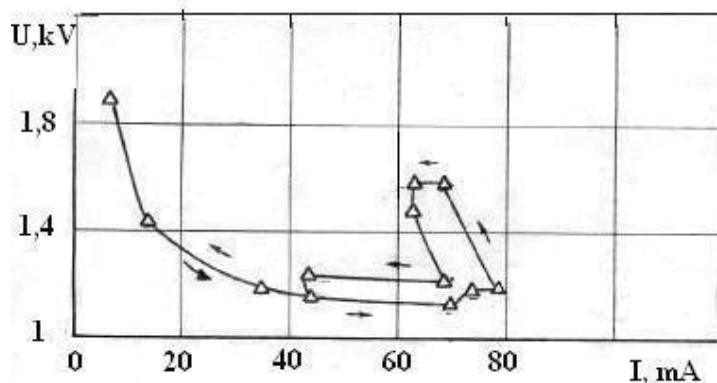


Рис. 2. Вольтамперная характеристика разряда

питания напряжение на разрядном промежутке уменьшается, а сила тока растет до значения $I = 80$ мА. Однако начиная с этого значения, дальнейшее увеличение напряжения источника питания приводит к резкому увеличению напряжения на разрядном промежутке (прямая линия 2-3 на рис.1) и уменьшению силы тока. При этом вкладываемая в разряд мощность увеличивается, разряд приобретает ярко-белый цвет. Перестройка разряда начинается с силы тока $I = 70$ мА. До этого значения силы тока тлеющего разряда имел все характерные для него области: светящиеся пленки на катоде и аноде, темное пространство вблизи катода. В области изменения силы тока $I = (70 - 80)$ мА напряжение на разрядном промежутке начинает незначительно возрастать (участок 1-2 на рис.1). Затем идет подъем напряжения в диапазоне $U = (1.2 - 1.6)$ кВ (участок 2-3). Затем с уменьшением силы тока наблюдается уже падение напряжения (участок 3-4-5 на рис. 1.). При этом изменялась форма разряда, распределение по длине темных и светлых пространств, интенсивность свечения.

Работа была выполнена в рамках проекта № 18-42-161002 при поддержке РФФИ.

Список литературы

1. Yunusov R.F., Garipov M.M. Experimental study of voltage fluctuations in the longitudinal glow discharge//Journal of Physics: Conf. Series 927 (2017) 012077.
2. Yunusov R.F., Garipov M.M., Yunusova E.R. Transients in the longitudinal Glow Discharge//Journal of Physics: Conf. Series 1058 (2018) 012050.

Лопез И.Э.¹, Орозко Э.А.¹, Чирков А.Ю.², Федюнин Д.Е.²

¹ Индустриальный Университет Сантадера,
Колумбия, Сантадер, Букараманга

² МГТУ им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-ая Бауманская, 5, стр. 1
chirkov@bmstu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛОВ МГД-УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА РЕАКТОРНЫХ МАСШТАБОВ

Сферический токамак с дейтериевым топливом (без внешнего трития) потенциально может быть источником нейтронов в гибридном термоядерно-ядерной реакторе [1]. Параметры такого токамака в принципе соответствуют умеренной экстраполяции технологий, принятых в проекте ITER. Была показана возможность реализации режимов с усилением в плазме $Q \sim 0.5$ при аспектном отношении $A \sim 2$, магнитных полях на оси плазменного шнура $B_0 \sim 4$ Тл и малом радиусе плазменного шнура $a \sim 2$ м [1]. Для реактора с $Q \sim 10$ требования к параметрам магнитной системы существенно превосходят сегодняшний уровень технологических возможностей [2]. Настоящая работа направлена на обоснование предельных параметров сферического токамака, соответствующих режимам с $Q \sim 0.5-1$.

Одна из актуальных задач заключается в исследовании условий МГД-устойчивости плазмы в режиме улучшенного удержания. В частности, параметры токамака ограничены развитием периферийно локализованных мод (ELM). Исследования режимов, которые смягчают эти явления, требуют установления пределов устойчивости на основе геометрических факторов и соответствующих значений поля. В недавних экспериментах на токамаке DIII-D показано существенное улучшение удержания в режимах с отрицательной треугольностью.

В настоящей работе рассматриваются основные различия и сходства равновесных конфигураций и их устойчивости для случаев с противоположными по знаку значениями треугольности. Приведено численное исследование динамики плазмы сферического токамака для условий реактора с использованием МГД-кода [3]. Равновесие рассматривается на основе уравнения Грэда–Шафранова. Анализ возмущений позволяет определить пределы МГД-устойчивости и предельные значения параметров для реакторных режимов.

Список литературы

1. **Chirkov A.Yu., Fedyunin D.E.** On the feasibility of fusion–fission hybrid based on deuterium fuelled tokamak // *Fusion Engineering and Design*. 2019. V. 148. 111302 (5 pp).
2. **Chirkov A.Yu.** Low radioactivity fusion reactor based on the spherical tokamak with a strong magnetic field // *Journal of Fusion Energy*. 2013. V. 32. P. 208–214.
3. **Lopez J.E., Orozco E.A., Dougar-Zhabon V.D.** Fixed boundary Grad–Shafranov solver using finite difference method in nonhomogeneous meshgrid // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1159. 012017 (6 pp).

Секция 3
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ В ЭНЕРГЕТИКЕ

*Алифанов О.М., Будник С.А., Моржухина А.В., Ненарокомов А.В.,
Нетелев А.В.*

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993

РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАДИЕНТНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Основная особенность градиентных материалов заключается в том, что их свойства зависят от координаты. Такая зависимость может существовать для физических, тепловых, химических и электромагнитных характеристик. Градиентные материалы могут эффективно использоваться в качестве теплозащитных покрытий, теплонагруженных силовых элементов, конструкций элементов двигательных установок [1] и т.д.

В докладе представлены результаты экспериментов и их обработки с целью определения комплекса теплофизических характеристик (теплоемкость и теплопроводность) градиентного материала. В эксперименте использовался высокотемпературный эластичный волокнистый материал Cerablanket на основе смеси керамических волокон SiO₂ и Al₂O₃ производства компании ООО "Морган Термал Керамикс Сухой Лог" (РФ-США) [2]. Данный материал выпускается промышленно с плотностями 64кг/м³, 96кг/м³, 128 г/м³ и 160кг/м³.

Эксперименты были проведены на тепло-вакуумном стенде ТВС-2М тепловой лабораторией НИО-601 МАИ [3].

На первом этапе работы была проведена серия экспериментов с целью определения теплофизических характеристик исходного материала полученного от производителя. Результаты исследования показали хорошее совпадение расчетных характеристик с данными представленными производителем [2] для всех образцов за исключением образца с плотностью 160кг/м³.

На следующем этапе работы был проведен эксперимент с образцами, в которых свойства менялись в зависимости от координаты. Изменение свойств образца по толщине было достигнуто за счет набора слоев с разным значением плотности.

Оба этапа испытания проводились с использованием симметричной схемы нагрева двух одинаковых образцов. Контактный нагрев осуществлялся плоским нагревательным элементом, установленным между исследуемыми образцами. Все эксперименты были проведены на воздухе при атмосферном давлении и в вакууме при давлении $\sim 1 \times 10^{-7}$ бар. Для описания теплопереноса в градиентном материале использовалась одномерная математическая модель, в которой теплофизические коэффициенты являются функциями координаты.

$$C(x) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right), \quad x \in (0, L), \tau \in (0, \tau_{\max}] \quad (1)$$

$$a_1 \lambda(0) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} + b_1 T(x, \tau) = q_1(\tau), \quad x = 0, \tau \in (0, \tau_{\max}] \quad (2)$$

$$a_2 \lambda(L) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} + b_2 T(x, \tau) = q_2(\tau), \quad x = L, \tau \in (0, \tau_{\max}] \quad (3)$$

$$T(x, 0) = T_0(x), \quad x \in (0, L), \quad (4)$$

Комплекс характеристик градиентного материала определялся посредством решения обратной задачи методом итерационной регуляризации [4].

Список литературы

1. Functionally graded materials/ Rasheedat Modupe Mahamood, Esther Titilayo Akinlabi, Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering, Springer International Publishing, 2017, 103p
2. <http://thermal.slsoz.ru>
3. Экспериментально-вычислительный комплекс для исследования теплофизических свойств теплотехнических материалов/ Алифанов О.М., Будник С.А., Михайлов В.В., Ненарокомов А.В..- Космонавтика и ракетостроение, 2006, т.42, N 1 с.126-139.
4. О.М. Alifanov, Inverse Heat Transfer Problem, Springer-Verlag, New York, 1994.

Бабенко Д.Д., Дмитриев А.А., Дмитриев А.С., Михайлова И.А.
 Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
 Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГИБРИДНЫХ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСНЫХ ГРАФЕНОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

В настоящее время растет интерес к новым термоинтерфейсным материалам (ТИМ), которые широко используются для термостабилизации и термоменеджмента электронных и энергетических устройств [1]. В работах [2-4] проведены исследования новых гибридных графеновых наноконпозитов, которые могут быть весьма эффективно использованы в качестве ТИМ нового поколения. В данной работе продолжено изучение указанных материалов, в частности, их теплофизических свойств и возможностей использования для термостабилизации процессоров.

В работе проведено изучение смачиваемости и растекания капель рабочих жидкостей (в случае капельно-струйного испарительного охлаждения электроники) на поверхностях гибридных графеновых

нанокompозитов. Представлены зависимости контактных углов и времени испарения капель на указанных поверхностях в широком диапазоне температур (от комнатных до 300⁰С). При этом, в качестве основы гибридных композитов были использованы различные полимеры (эпоксидная резина, полиуретан, высокотемпературные смолы и т.п.). Отмечены особенности эффекта Лейденфроста на таких поверхностях, в частности, изменение температуры Лейденфроста и частичная потеря левитации капель при касании перегретых поверхностей гибридных композитов.

Проведены исследования теплопроводности гибридных графеновых нанокompозитов различными методами (метод нагреваемых ячеек, метод сенсора теплового потока и метод лазерных вспышек). Все отмеченные методы показали близкие результаты. В качестве примера, на рис.1 показана оптическая фотография гибридного композита с полиуретаном, микросферами металла, покрытые графеновыми хлопьями, а также теплопроводность подобного композита как функция концентрации графеновых хлопьев в композите. Следует заметить, что теплопроводность базового полимера близка к величине 0,2 Вт/м·К, поэтому хорошо видно, что при концентрациях, близких к 0,225 г/мл теплопроводность гибридного нанокompозита возрастает примерно в 4,6 раза до 0,926 Вт/м·К. Это позволяет надеяться, что подобные нанокompозиты смогут быть эффективными ТИМ для термостабилизации энергетических устройств и электронных компонент.

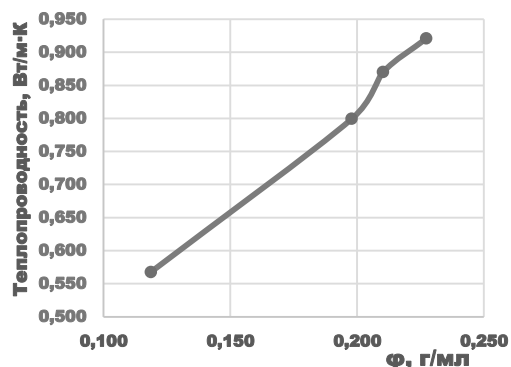


Рис.1. Гибридный графеновый нанокompозит (слева) и зависимость теплопроводности от концентрации графеновых хлопьев (справа)

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФ № 17-19-01757.

Список литературы

1. Введение в нанотеплофизику / А.С. Дмитриев. М.: Изд. БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015. 792 с.

2. **A. S. Dmitriev.** Hybrid Graphene Nanocomposites: Thermal Interface Materials and Functional Energy Materials. In: Graphene Production and Application// Ed. Prof. Sadia Ameen. 2019. InTechOpen.
3. **A. A. Dmitriev, A. S. Dmitriev, I. Mikhailova.** New Nanocomposite Thermal Interface Materials Based on Graphene Flakes, Mesoscopic Microspheres and Polymers. MATEC Web of Conferences. 2018. 207. 04002.
4. **D. D. Babenko, A. S. Dmitriev, V. V. Mikhailov, I. A. Mikhailova.** Physical features of Leidenfrost effect on the surface of a graphene nanocomposite for the problems of thermal and nuclear energy. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. 447. 012044.

Базаев А.Р., Базаев Э.А., Османова Б.К.

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал
ФГБУН ОИВТ РАН
367030, Махачкала, пр. Шамиля, 39А

***P, ρ, T* - ЗАВИСИМОСТЬ ЭКВИМОЛЯРНОЙ ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ ВОДА–1-ПРОПАНОЛ–Н-ГЕКСАН В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ**

Приведены новые значения параметров критического состояния (510,85 К, 255,7 кг/м³, 6,09 МПа.) и *p, ρ, T*-зависимости в сверхкритической области тройной гомогенной системы вода–1-пропанол–н-гексан состава 0.333... мольных (0.1097, 0.3658, 0.5246 массовых) долей компонентов, полученные методом пьезометра постоянного объема по изохорам. Установлено, что экспериментальная фазовая диаграмма на *p, T* - плоскости исследованной гомогенной тройной системы в сверхкритической области (**510,86–673.15 К, 255,7–615.62 кг/м³, 6,09–60 МПа**) по характеру *p, ρ, T*-зависимости, такая же, что и фазовые диаграммы составляющих ее чистых жидкостей (рис.1), что позволяет применять известные уравнения состояния для индивидуальных жидкостей и для описания тройной гомогенной системы.

Зависимость давления от плотности и температуры в сверхкритической области описана полиномиальным уравнением состояния – разложением фактора сжимаемости $Z = pV_m/RT = p/RT\rho_m$ в ряды по степеням приведенной плотности $\omega = \rho/\rho_k$ и приведенной температуры $\tau = T/T_k$ вида:

$$Z = p/RT\rho_m = 1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} \omega^i / \tau^j; \quad p = RT\rho_m \left[1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} \omega^i / \tau^j \right], \quad \text{где } \rho_m \text{ – молярная}$$

плотность (моль/м³), R=8.314 Дж/(моль*К) – универсальная (молярная) газовая постоянная. Средняя относительная погрешность рассчитанных значений давления от экспериментальных не превышает 0.6%.

Сделан вывод о том, что зависимость p, ρ, T в сверхкритическом состоянии многокомпонентных гомогенных жидких систем, состоящих из полярных и неполярных молекул, отличающихся структурой и температурами

кипения, с достаточной для инженерных расчетов точностью можно описать полиномиальным уравнением состояния – разложением фактора сжимаемости $Z = pV_m/RT = p/RT\rho_m$ в ряды по степеням приведенного давления $\omega = \rho/\rho_k$ и приведенной температуры $\tau = T/T_k$ для значений состава, при которых многокомпонентная смесь в сверхкритическом состоянии становится гомогенной.

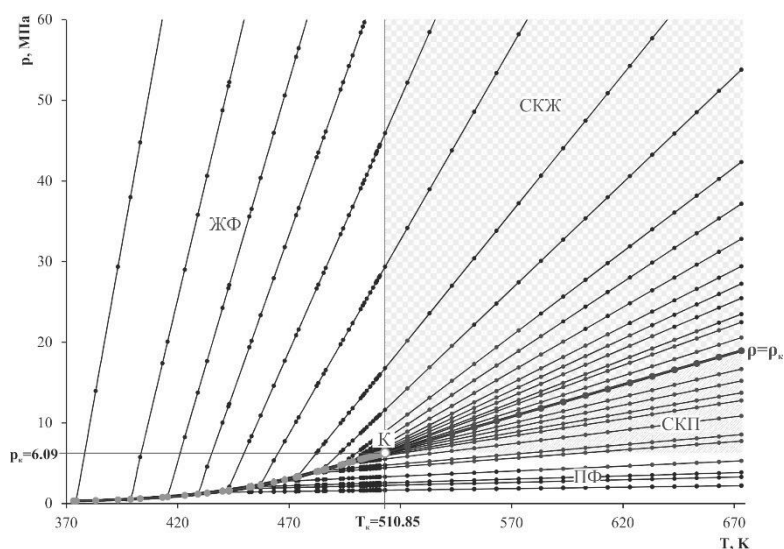


Рис. 1. Изохоры зависимости давления от температуры эквимольной гомогенной тройной системы вода–1-пропанол–н-гексан. ЖФ – жидкая фаза, ПФ – паровая фаза, СКЖ – сверхкритическая жидкость, СКП – сверхкритический пар, К – критическая точка.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№18-08-00124 А).

Список литературы

1. **Карабекова Б.К., Базаев Э.А.** Уравнение состояния для смесей вода–спирт в широком диапазоне параметров состояния // Журнал физической химии. 2015. Т. 89. № 9. С. 1386-1396.
2. **Сычев В.В., Вассерман А.А.** и др. Термодинамические свойства азота. М.: Изд-во стандартов. 1977. 352 с.

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ СИСТЕМЫ Н-ГЕКСАН – ВОДА СОСТАВА 0.5 МОЛЬНЫХ ДОЛЕЙ КОМПОНЕНТОВ

Методом пьезометра постоянного объема по изохорам получены новые значения p, T - и p, ρ, T - зависимостей системы н-гексан – вода состава (х) 0.5 мольных долей компонентов в трехфазной (ЖЖП) и двухфазной (ЖЖ и ЖП) областях параметров состояния в диапазоне температур 373.15–673.15 К, давлений 0.25–56 МПа и плотностей 55–554 кг/м³.

По изломам (изгибам) изохор фазовой диаграммы на p, T - плоскости определены значения параметров точек фазовых превращений: ЖЖП \rightleftharpoons ЖЖ, ЖЖП \rightleftharpoons ЖП и ЖЖ \rightleftharpoons ЖП, по которым построены кривые сосуществования фаз в различных сечениях термодинамической поверхности $(p, \rho, T)_x$.

Полученные параметры фазовых превращений системы н-гексан – вода состава 0.5

мольных долей компонентов хорошо согласуются с данными литературных источников [1-2].

Зависимость давления системы н-гексан – вода от плотности и температуры вдоль кривых

сосуществования фаз ЖЖП \rightleftharpoons ЖЖ, ЖЖП \rightleftharpoons ЖП и ЖЖ \rightleftharpoons ЖП описана

полиномиальным

уравнением состояния – разложением фактора сжимаемости $Z_s = p_s / RT_s \rho_{ms}$ в ряды по степеням приведенной плотности $\omega = \rho / \rho_k$ и приведенной температуры $\tau = T / T_k$ вида [3]:

$$Z_s = p_s / RT_s \rho_{ms} = 1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} \omega^i / \tau^j, \text{ откуда } p_s = RT_s \rho_{ms} \left[1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} \omega^i / \tau^j \right].$$

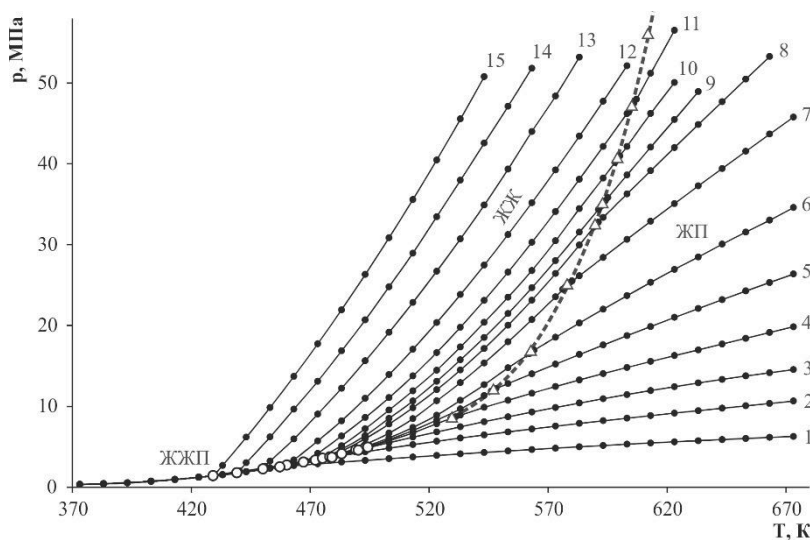


Рис. 1. Изохоры 55-554 кг/м³ (1-15) p, T - зависимости системы н-гексан–вода состава 0.5 мол.доли компонентов. Кривая сосуществования фаз: ЖЖП \rightleftharpoons ЖЖ, ЖЖП \rightleftharpoons ЖП (○) и ЖЖ \rightleftharpoons ЖП (△).

Здесь: ρ_m —молярная плотность (моль/м³); $R=8.314$ —универсальная (молярная) газовая постоянная (Дж/моль·К). Коэффициенты a_{ij} уравнения определены обобщенным методом наименьших квадратов [4].

Средняя относительная погрешность отклонений рассчитанных значений давления от экспериментальных не превышает 0.1 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№18-08-00124 А).

Список литературы

1. T.Yiling, Th. Michelberger and E.U. Franck. High-pressure phase equilibria and critical curves of (water+n-butane) and (water+n-hexane) at temperatures to 700 L and pressures to 300 MPa // J.Chem. Thermodynamics. 1991. V.23. P.105-112.
2. Charles J. Rebert and Kenneth E. Hayworth. The Gas and Liquid Solubility Relations in Hydrocarbon-Water Systems // A.I.Ch.E. Journal January. 1967. V.13. N 1. P.118-121.
3. Карабекова Б.К., Базаев Э.А. Уравнение состояния для смесей вода–спирт в широком диапазоне параметров состояния // Журнал физической химии. 2015. Т. 89. № 9. С. 1386-1396.
4. Сычев В.В., Вассерман А.А. и др. Термодинамические свойства азота. М.: Изд-во стандартов. 1977. 352 с.

Базаев Э.А., Базаев А.Р., Османова Б.К., Джаппаров Т.А.-Г.

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал
ФГБУН ОИВТ РАН
367030, Махачкала, пр. Шамиля, 39А

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И КРИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИНАРНЫХ СИСТЕМ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ВОДЫ, СПИРТОВ И УГЛЕВОДОРОДОВ

Методом пьезометра постоянного объема по изохорам получены значения p, ρ, T -зависимостей двухкомпонентных систем $H_2O-C_nH_{n+2}OH$, (метанол, этанол, 1-пропанол), $C_2H_4OH-C_nH_{2n+2}$ (н-пентан, н-гексан, н-гептан, н-октан) и $C_3H_7OH-C_nH_{2n+2}$ (н-пентан, н-гексан, н-гептан) для значений концентраций второго компонента 0.2, 0.5, 0.8, 0.9 мольных долей в субкритической, околокритической и сверхкритической областях параметров состояния.

По изломам (изгибам) изохор зависимости давления от температуры определены параметры точек фазовых превращений $ЖП \rightleftharpoons Ж$ и $ЖП \rightleftharpoons П$ p_s, ρ_s, T_s .

По полученным данным о p, ρ, T -зависимостях в однофазной области (паровой, жидкой) определены значения фактора сжимаемости $Z = pV_m/RT = p/RT\rho_m$.

Зависимость давления систем от плотности, температуры и состава вдоль кривых сосуществования фаз вдали от их критических точек описана трехпараметрическим полиномиальным уравнением состояния – разложением фактора сжимаемости в ряды по степеням приведенной плотности $\omega = \rho/\rho_k$, приведенной температуры $\tau = T/T_k$ и состава вида [1]:

$$Z = p / RT\rho_m = 1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^s a_{ijk} \omega^i \cdot x^k / \tau^j, \text{ откуда}$$

$$p = RT\rho_m \left[1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^s a_{ijk} \omega^i \cdot x^k / \tau^j \right] \quad (1)$$

В (1): ρ_m – молярная плотность (моль/м³); x (мольные доли) – концентрация второго компонента; $R=8,314$ – универсальная (молярная) газовая постоянная (Дж/моль·К). Коэффициенты уравнения (1) a_{ij} определены обобщенным методом наименьших квадратов [2]. Средняя относительная погрешность отклонений, рассчитанных по (1) значений давления от экспериментальных не превышает 2.0 %

Для описания экспериментальных данных о p_s, ρ_s, T_s, x -зависимостях систем в критической области, т.е. в симметричной части кривой сосуществования фаз ($\tau=0-0.01$) использовано уравнение [3]:

$$(\rho_{sc} - \rho_n) / 2\rho_k = B_0\tau^{\beta_0} + B_2\tau^{\beta_2} + B_4\tau^{\beta_4} + \dots \quad (2)$$

В (2): β_0 – критический показатель, определяющий форму кривой сосуществования при приближении температуры к критической $T \rightarrow T_k$; β_i – учитывают отклонения формы КС от симметрии относительно КТ; B_i – коэффициенты (амплитуды).

Результаты исследования будут представлены таблицами и графиками в различных сечениях термодинамической поверхности $(p, \rho, T)_x$.

Список литературы

1. **Карабекова Б.К., Базаев Э.А.** Уравнение состояния для смесей вода–спирт в широком диапазоне параметров состояния // Журнал физической химии. 2015. Т. 89. № 9. С. 1386-1396.
2. **Сычев В.В., Вассерман А.А.** и др. Термодинамические свойства азота. М.: Изд-во стандартов. 1977. 352 с.
3. **Шиманский Ю.И., Шиманская Е.Т.** // ЖФХ. 1996. Т.70. №3. С.443.

Базюк С.С., Бахин А.Н., Беспечалов Б.Н., Вишневецкий В.Ю., Гармай Ю.В., Зайцев Д.А., Киселев Д.С., Котов А.Ю., Репников В.М., Стойков К.В., Титкова Е.М.

ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ», г. Подольск, Российская Федерация

ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ РЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ УРАН-ЦИРКОНИЕВОГО КАРБОНИТРИДНОГО ТОПЛИВА

Во ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» разработано плотное высокотемпературное топливо на основе уран-циркониевого карбонитрида (UZr(CN)). Топливо на основе уран-циркониевого карбонитрида (КНТ) является логической модификацией UN, практически сохраняющей все положительные качества мононитрида. Это топливо обладает достаточно высокой ураноемкостью ($c_U \sim 10,5 - 12,0 \text{ г/см}^3$) и теплопроводностью ($28-32 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) [1,2]. Уран-циркониевое карбонитридное топливо более безопасно, поскольку обладает повышенной устойчивостью к развитию аварийных процессов. Благодаря своим характеристикам, UZr(CN) является привлекательным кандидатным материалом для использования в различных типах реакторных установок, в том числе - реакторах на быстрых нейтронах и высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах. Основным недостатком UZr(CN) является ограниченный объем данных о характеристиках и поведении этого топлива при облучении, особенно при больших уровнях выгорания. В настоящее время для устранения данного недостатка осуществляется подготовка к проведению реакторного эксперимента, направленного на изучение свойств КНТ при достижении выгорания до 8 % тяжелых атомов. Параметры эксперимента: температура на оболочке – не более 1400 К, энерговыделение – не более 600 Вт/см^3 . Для выполнения реакторных испытаний UZr(CN) таблеток разработана экспериментальная капсула, устанавливаемая в облучательное устройство.

Правильность выбора конструкций экспериментальной капсулы и облучательного устройства обоснованы теплофизическими расчетами и подтверждены экспериментально в соответствии с программой вне реакторных испытаний. В докладе обсуждаются результаты претестовых расчетов, которые показывают обоснованность запланированных реакторных испытаний.

Список литературы

1. Нитридное топливо для ядерной энергетики / Алексеев С.В., Зайцев В.А. М.: Техносфера, 2013. 240 с. ISBN 978-5-94836-374-5
2. Бахин А.Н., Вишневецкий В.Ю., Тухватулин Ш.Т., Галев И.Э., Котов А.Ю. “Изучение свойств уран-циркониевого карбонитрида: подготовка реакторного эксперимента”// Естественные и технические науки. Изд. «Спутник плюс», 2019 г. №3. с. 92-96.

Базюк С.С.

Научно-исследовательский институт
Научно-производственное объединение «ЛУЧ»,
Подольск, 142103, Железнодорожная, 22
bazukss@sialuch.ru

РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В СРЕДЕ MATHCAD

Обоснование инновационных конструкций твэлов для высокотемпературных газоохлаждаемых ядерных реакторов 4-го поколения требует надежного прогнозирования свойств теплоносителя. Реалистичное прогнозирование температурных режимов твэлов легководных реакторов в условиях длительного облучения также связано с вычислением коэффициентов переноса среды гелия и газообразных продуктов деления (ГПД) ядерного топлива (ксенон, криптон). Наконец, в целях экспериментального исследования поведения новых видов ядерного топлива при высоких температурах и выгораниях необходима информация о свойствах смесей ГПД и технологических газов. Данные о термодинамических и теплофизических свойствах газовых смесей переменного состава в широком диапазоне давлений и температур ограничены, поэтому их расчетное прогнозирование является актуальной научно-технической задачей. В настоящей работе представлен набор подпрограмм, реализованных в среде MathCAD v.15 в едином файле, позволяющих вычислять свойства индивидуальных газов и их смесей, содержащих неограниченное число компонентов, в диапазоне температур от 298 К до 3000 К и давлений – до 20 МПа.

В расчет свойств индивидуального газа заложено межмолекулярное взаимодействие, описываемое потенциалом Леннарда-Джонса (12-6). Термодинамические свойства рассчитываются в программе на основании уравнения состояния, содержащего четыре вириальных коэффициента (A, B, C, D). Прогнозирование теплофизических свойств индивидуального газа основано на решении кинетического уравнения Больцмана в рамках теории Чепмена-Энскога с поправкой Эйкена (для случая многоатомного газа). Вычисление свойств газовых смесей проводится методами решений интегралов столкновений, изложенным в классической монографии [1].

В рамках единого файла вычисляются термодинамические свойства (плотность, энтальпия, энтропия, изобарная и изохорная теплоемкости, коэффициент адиабаты, скорость звука), а также теплофизические (динамический коэффициент вязкости, коэффициент теплопроводности и производная величина – число Прандтля). В качестве исходных данных задаются в онлайн-режиме температура (T), давление (p), а также параметры межмолекулярного взаимодействия индивидуального газа (ε ,

b_0) или компонентов смеси – из текстового файла библиотеки в соответствии с [2]. В настоящее время в библиотеку внесены одноатомные газы He, Ar, Kr, Xe, Ne и двухатомные - H₂, O₂, N₂, F₂. В приближении среды с осредненными сосредоточенными параметрами программа позволяет рассчитывать свойства воздуха и водяного пара. В качестве выходных данных допустима выдача результатов расчетов в виде:

- таблицы в текстовом файле;
- графической зависимости свойства от переменной T и/или p ;
- таблицы в текстовом файле и графической зависимости совместно.

Результаты расчета по данному набору подпрограмм верифицированы и вычислены термодинамические и теплофизические свойства трехкомпонентных газовых смесей He-Xe-Kr переменного состава в диапазоне температур от 298 К до 2273 К и давлений – до 0,5 МПа.

Список литературы

1. Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд. Молекулярная теория газов и жидкостей. Изд. Иностран. лит-ры, Москва, 1961
2. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Спр. / В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др. – Энергоатомиздат, 1989 – 232 с.

Байрамов А.Н.

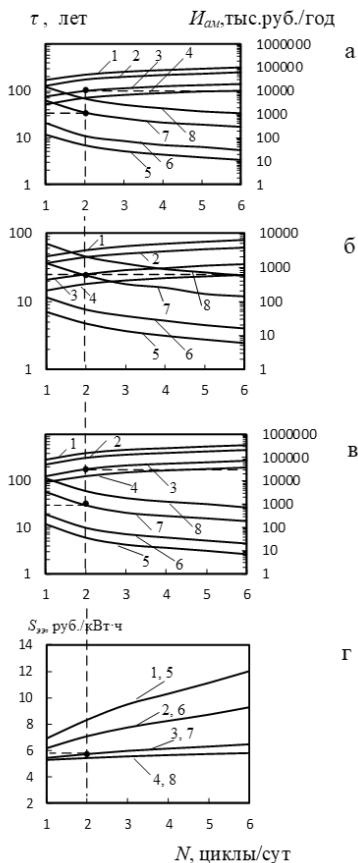
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Саратовский научный центр РАН
Саратов, 410028, ул. Рабочая, 24
oergran@inbox.ru

ОЦЕНКА РАБОЧЕГО РЕСУРСА ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОДОРОДНОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ УСТАЛОСТНОГО ИЗНОСА

В условиях увеличения доли АЭС в энергосистемах Европейской части страны проблема обеспечения их базисной электрической нагрузкой приобретает актуальность. С этой целью наряду с использованием ГАЭС разрабатываются научные основы использования водородного комплекса на базе внепиковой электроэнергии АЭС [1, 2]. Преимуществом водородного комплекса является возможность потребления электроэнергии непосредственно от АЭС по себестоимости в то время как ГАЭС заряжается от энергосистемы по тарифу в 2-4 раза превышающему себестоимость электроэнергии АЭС. Эффективно выработка пиковой электроэнергии на АЭС за счёт комбинирования с водородным комплексом может осуществляться при использовании паро-водородного перегрева свежего пара перед основной турбиной.

Специфика комбинирования с энергоблоками АЭС заключается в неизбежности циклических пусков и остановов основного оборудования водородного комплекса вследствие разновременности получения и использования водорода и кислорода. В этой связи циклическое нагружение оборудования обуславливает рост усталостных трещин. Учёт усталостного износа при оценке эффективности водородного комплекса предполагается за счёт величины амортизационных затрат в структуре себестоимости электроэнергии. В этой связи представлены результаты оценки по определению себестоимости пиковой электроэнергии водородного комплекса в зависимости от времени роста усталостной трещины при соответствующих амортизационных затратах основного оборудования и числа циклических нагружений в сутки.

Увеличение числа циклов нагружений в сутки приводит к заметному снижению времени роста усталостной трещины до критического значения и вместе с тем обуславливает рост амортизационных затрат. При этом на основании выполненных расчетов по определению коэффициента интенсивности размаха напряжений и диаграммы усталостного разрушения [3] выявлено, что для основного оборудования водородного комплекса значение коэффициента интенсивности размаха напряжений соответствует начальной скорости роста усталостной трещины $5 \cdot 10^{-8}$ мм/цикл (поз. 4, 8 номограммы). Из этого следует, что в случае увеличения числа пусков свыше 1, но не более 6 в сутки относительный прирост себестоимости электроэнергии в среднем составит 1,8 %.



Номограмма себестоимости электроэнергии водородного комплекса: $I_{ам}$ – амортизационные затраты (кривые 1-4); τ – время роста усталостной трещины до критической длины 0,1 мм (кривые 5-8); N – число циклов пуск-останов в сутки; $S_{ээ}$ – себестоимость электроэнергии; 1, 5 – начальная скорость роста усталостной трещины $5 \cdot 10^{-7}$ мм/цикл; 2, 6 – то же $3 \cdot 10^{-7}$ мм/цикл; 3, 7 – то же $1 \cdot 10^{-7}$ мм/цикл; 4, 8 – то же $5 \cdot 10^{-8}$ мм/цикл; а – стенка рабочего сосуда электролизёра; б – стенка рабочего сосуда ёмкости для хранения водорода (кислорода); в – стенка водород-кислородной камеры сгорания; г – себестоимость электроэнергии водородного комплекса

Список литературы

1. Аминов Р.З., Байрамов А. Н. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями. М.: Наука, 2016. 254с
2. Аминов Р. З., Юрин В. Е., Егоров А. Н. Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками. М.: Наука, 2018. 238с.
3. Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие / Под общ. ред. В.В. Панасюка. Т.4. Киев: Наук. думка, 1990. 680с.

Бахин А.Н., Беспечалов Б.Н., Вишневский В.Ю., Зайцев Д.А., Киселев Д.С., Козлов В.В., Котов А.Ю., Марушкин Д.В., Репников В.М.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт

Научно-производственное объединение «ЛУЧ»,

Московская обл., г. Подольск, 142100, Железнодорожная, 24

d_sk86@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УРАН-ЦИРКОНИЕВОГО КАРБОНИТРИДА В КАЧЕСТВЕ КЕРНА МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПИВА

Обеспечение безопасности является одной из основных задач при проектировании и эксплуатации АЭС. Аварийные события, произошедшие на ядерных энергоблоках Чернобыля и Фукусимы, наглядно продемонстрировали разрушительные свойства пароциркониевой реакции, проявляемой в условиях тяжелых аварий с потерей теплоносителя: при длительном прекращении необходимого теплосъема в активной зоне происходит самопроизвольный разогрев ядерного топлива за счет остаточного тепловыделения, приводящий к разрушению ТВЭлов, водородному взрыву и утечке радиоактивности. Эти обстоятельства послужили активизации работ по созданию принципиально нового топлива, способного противостоять условиям тяжелых аварий при сохранении или повышении экономических показателей и безопасности при нормальной эксплуатации, которые получили название Accident Tolerant Fuel - топливо с повышенной устойчивостью к авариям [1].

Очевидно, что самым надежным решением избавления от воздействия пароциркониевой реакции является замена основного конструкционного материала оболочек ТВЭлов - циркония - на более инертный. Таким материалом является графит, используемый в концепции высокотемпературных реакторов с гелиевым теплоносителем в отечественных проектах ВГР-50, ВГ-400 и ВГМ. В этих реакторах применяются сферические микротвэлы, состоящие из миниатюрного

топливного ядра с защитным углеродным покрытием. Однако существует ряд проблем, препятствующих развитию этого перспективного направления атомной энергетики [2].

В данной работе будет предложена альтернативная конструкция микротвэла с использованием в качестве ядра из уран-циркониевого карбонитридного топлива вместо традиционного диоксида урана. Будет показано, что это топливо в составе четырехслойного TRISO-микротвэла создает значительно меньшее давление газа под покрытием, хорошо совместим с пироуглеродным покрытием и не растрескивает его, обладает высокими теплофизическими свойствами, в значительно меньшей мере подвержен «амеба»-эффекту. Представленные доводы дадут основание рассматривать это топливо в качестве перспективного для использования в сферическом микро топливе высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, позволяющим, помимо решения основных проблем совместимости топлива с покрытием, повысить эксплуатационные характеристики.

Список литературы

1. Базюк С.С., Киселев Д.С., Кузма-Кичта Ю.А., Мокрушин А.А., Паршин Н.Я., Попов Е.Б., Солдаткин Д.М., Федик И.И. Исследование теплофизических и коррозионных характеристик оболочек эксплуатируемых и перспективных ТВЭЛов легководных реакторов при аварии с потерей теплоносителя // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. №1. С. 247-255
2. Поведение высокотемпературного ядерного топлива при облучении / Ю.Г. Дегальцев, Н.Н. Пономарев-Степной, В.Ф. Кузнецов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 208 с.

Билалов Т.Р., Гумеров Ф.М.

¹ «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
Казань, 420015, К. Маркса, 68
t.bilalov@yandex.ru

ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА СИСТЕМЫ ЭТИЛКАРБИТОЛ – СК СО₂

Одним из перспективных пластификаторов, идущих на смену спирто-эфирной смеси при пластифицировании полимеров, в том числе и наполненных масс, является этилкарбитол (моноэтиловый эфир диэтиленгликоля) [1]. Поскольку он обладает достаточно высокой температурой кипения (475 К [1]) и, как следствие, низкой упругостью паров, его удаление из изделия методом конвективной сушки (провялки) занимает достаточно большой промежуток времени. С другой стороны,

этилкарбитол растворяется в воде в любых соотношениях, поэтому его удаление проводят путем экстракции водой. В то же время, полученные ранее результаты по экстракции спирта [3] из охотничьего пороха позволяют сделать предположение о том, что подобный процесс можно реализовать и для наполненных масс на основе этилкарбитола. В этом случае, помимо решенной ранее задачи сохранения стабилизатора химической стойкости дифениламина [2], необходимо изучить фазовую диаграмму этилкарбитол-СО₂, на основе которой можно будет подобрать оптимальные параметры процесса экстракции с сохранением ключевых компонентов. В работе [3] проведено исследование растворимости СО₂ в этилкарбитоле на изотермах 308 и 318 К и давлении до 5 МПа. Эти результаты были дополнены нами данными по растворимости этилкарбитола в диоксиде углерода на тех же изотермах. Кроме того, была дополнительно исследована взаимная растворимость этилкарбитола и СО₂ на изотерме 323 К. Результаты исследований представлены на рисунке 1. Максимальная неопределенность результатов измерений растворимости, рассчитанная в соответствии с ГОСТ 34100-2017 составила 5,3%. Исследование фазовой диаграммы проводилось на установке, подробно описанной в работе [2] в соответствии с описанной в этой работе методикой.

Результаты исследований были описаны с использованием уравнения состояния Пенга-Робинсона и правила смешивания Мухопадхьяи и Рао в соответствии с методикой, представленной в работе [2]. Ранее нами было установлено [2], что один из ключевых компонентов наполненных

пластифицированных полимеров – стабилизатор химической стойкости дифениламин – хорошо растворяется в сверхкритическом диоксиде углерода. Однако при увеличении температуры растворителя при давлениях до 15 МПа происходит существенное (до 300%) снижение его растворимости, которое объясняется так называемым кроссоверным эффектом и наблюдается для любых веществ, растворяемых в сверхкритических флюидах. Таким образом, в соответствии с фазовой диаграммой бинарной смеси СО₂ – этилкарбитол и результатами проведенного ранее исследования растворимости дифениламина в СК СО₂, можно сделать вывод, что оптимальным диапазоном режимных параметров для удаления

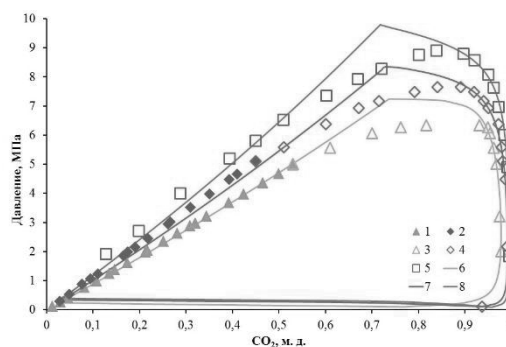


Рис. 1. Фазовая диаграмма этилкарбитол-СО₂. 1, 2 – [4], 2, 3 – н.р.; 1, 3 – 308 К, 2, 4 – 318 К, 5 – н.р., 323 К, 6-8 – описание фазового равновесия

этилкарбита из полимеров при их пластификации являются температура 323 К и диапазон давлений от 9 до 12 МПа.

Авторы настоящего исследования выражают свою благодарность Российскому научному фонду (РНФ) за финансирование этих исследований в рамках проекта 19-73-10029.

Список литературы

1. Коновалов В. И., Ляпин Н. М., Коробкова Е. Ф., Хацринов А. И., Краснопёрова Л. А., Гатина Р. Ф., Михайлов Ю. М. Неоднородности конденсационных структур, возникающие в процессе водной экстракции растворителя из нитратцеллюлозных пороховых элементов // Вестник Казанского технологического университета. 2010. №8, С. 209-215
2. Экстракция спирто-эфирной смеси из охотничьих порохов с использованием сверхкритического CO₂ на примере пороха «Сунар 308WIN». / Т.Р. Билалов, Ф.М. Гумеров, Р.Ф. Гатина. // "Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика", 2018, Т 13, № 1. С. 40-50
3. Wei Wang, Zhi Yun, Zhigang Tang, Xia Gui, Solubilities of CO₂ in some glycol ethers under high pressure by experimental determination and correlation, In Chinese Journal of Chemical Engineering, Volume 24, Issue 3, 2016, P. 373-378, ISSN 1004-9541.

Блинов Д.В.^{1,2}, Бездудный А.В.², Борзенко В.И.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

D.V.Blinov.IHTRAS@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОРОДПОГЛОЩАЮЩИХ СВОЙСТВ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ $LaNi_{4.4}Fe_{0.3}Al_{0.3}$ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДОРОДА

Водород играет важную роль в качестве экологически чистого, высокоэффективного и перспективного энергоносителя для энергетики, автотранспорта и мобильных применений. Актуальность проблемы создания эффективных систем обратимого твердофазного хранения водорода определяется ростом потребления высокочистого водорода в различных высокотехнологичных производствах и широким распространением энергоустановок на базе топливных элементов (ТЭ) [1,2]. Однако, несмотря на перспективность использования водорода в качестве энергоносителя, низкая плотность газообразного водорода, низкая температура его ожижения, водородное охрупчивание

конструкционных материалов и высокая взрывоопасность определяют необходимость разработки технически и экономически эффективной и безопасной системы хранения водорода.

Интерметаллические сплавы (ИМС) позволяют обратимо поглощать водород и безопасно хранить его в твердой фазе. Способность ИМС к избирательному поглощению водорода делает их источниками газа высокой чистоты и позволяет использовать также для очистки водорода [3,4]. Перспективными материалами для комплексного решения проблем аккумулирования, очистки и повышения давления водорода могут быть сплавы семейства LaNi_5 .

Разработка и исследование новых ИМС способных эффективно очищать водород от газообразных примесей является одной из важнейших задач при разработке производительных металлгидридных устройств.

В работе представлены экспериментальные исследования водородпоглощающих свойств ИМС $\text{LaNi}_{4.4}\text{Fe}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$, предназначенного для извлечения водорода из газовой смеси, содержащей водород, имеющий парциальное давление до 10 атм. Получены диаграммы (P-C-T) давление – концентрация – температура (Рис.1), данные рентгенофазового состава, распределение размеров частиц и площадь поверхности пористого образца сплава.

В работе также представлены экспериментальные исследования тепловых процессов, происходящих при абсорбции/десорбции водорода в металлгидридном реакторе очистки водорода проточного действия РХО-8, заполненном исследуемым ИМС $\text{LaNi}_{4.4}\text{Fe}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ в количестве 1 кг.

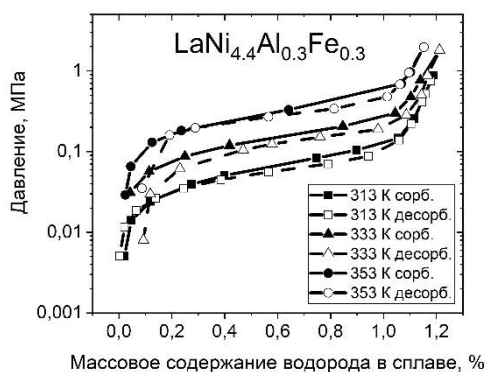


Рис. 1. P-C-T диаграммы сплава $\text{LaNi}_{4.4}\text{Fe}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$

Список литературы

1. Barreto L, Makihira A, Riahi K. The hydrogen economy in the 21st century: a sustainable development scenario // International Journal of Hydrogen Energy. 2003. Volume 28. Issue 3. Pages 267-284.
2. Jain I. P. Hydrogen the fuel for 21st century // International Journal of Hydrogen Energy. 2009. Volume 34. Issue 17. Page 7368–7378.
3. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумулирования водорода // Российский Химический Журнал. 2006. Т. L. № 6. С. 34.

4. **Dunikov D., Borzenko V., Blinov D., Kazakov A., Lin C.-Y., Wu S.-Y., Chu C.-Y.** Biohydrogen purification using metal hydride technologies // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Volume 41. Issue 46. Page 21787-21794.
5. **Blinov D.V., Borzenko V.I., Dunikov D.O., Romanov I.A.** Experimental investigations and a simple balance model of a metal hydride reactor // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. Volume 39. Issue 33. Page 19361-19368.

Бороновский Е.Г.^{1,2}, Лола Д.Е.¹, Ло Т.¹, Чирков А.Ю.¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-ая Бауманская, 5, стр. 1
² ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова,
111116, Москва, Авиамоторная, 2
chirkov@bmstu.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ РАБОЧИХ ТЕЛ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ

Одним из актуальных решений эффективного использования энергии является использование установок с так называемым органическим циклом Ренкина (ОЦР) для утилизации сбросового низкопотенциального тепла. Такие системы сегодня разрабатываются для энергетических, транспортных и других систем [1–3]. В качестве рабочего тела ОЦР-установки используют относительно низкокипящие вещества и иногда смеси веществ. К рабочим телам предъявляется довольно много различных требований, как с точки зрения теплофизических свойств, так и технологических особенностей, связанных с конструкцией установки, ресурса, безопасности и минимального влияния на окружающую среду. Поэтому круг возможных веществ для применения в конкретной области весьма ограничен. Иногда практически невозможно выбрать рабочее тело из числа хорошо известных веществ, чтобы выполнялись требования безопасности эксплуатации установки для персонала. Поэтому актуальной остается задача создания новых соединений и их композиций для ОЦР-установок, в частности, для их использования на транспорте и в других областях, сопряженных с повышенными эксплуатационными требованиями. Можно сказать, что ситуация аналогична тому, что имеет место для хладагентов.

В настоящей работе рассматривается влияние теплофизических свойств рабочих тел на эффективность рабочего цикла установки, а также на возможные ее массогабаритные характеристики (прежде всего, – размеры

теплообменников). Для выяснения влияния различных теплофизических параметров проанализированы соотношения, определяющие указанные характеристики установки заданной мощности, а также их взаимосвязь. Для обобщения применены методы расширенного термодинамического подобия [4], позволяющие в общем виде определить значимые факторы с учетом природы (молекулярных особенностей) рабочего тела. Также рассматриваются возможности применения данного подхода для смесей [5]. Разработанная методика [6] на основе высокоточных уравнений состояния [7] позволяет оценить точность более простых методов на основе уравнений состояния с простыми правилами смешения. Анализ был проведен в общем виде, а также для ряда конкретных рабочих тел, имеющих близкие температуры кипения (при нормальном давлении). Как показали расчеты, термодинамическая эффективность рассмотренных циклов сравнительно слабо зависит от типа рабочего тела при близких значениях температур подвода и отвода тепла. Более сильное влияние термодинамических и кинетических свойств рабочего тела проявляется в размерах теплопередающих поверхностей.

Список литературы

1. **Chen H., Goswami D.Y., Stefanakos E.K.** A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. V. 14. P. 3059–3067.
2. **Sprouse C., Depcik C.** Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2013. V. 51. P. 711–722.
3. **Белов Г.В., Дорохова М.А.** Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике // *Наука и образование*. 2014. № 2.
4. **Морачевский А. Г., Сладков И. Б.** Физико-химические свойства молекулярных неорганических соединений. 2-ое изд. СПб: Химия, 1996.
5. **Брусиловский А.И.** Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. - М.: Грааль, 2002.
6. **Luo T., Chirkov A.Yu.** Phase equilibrium modelling for multi-component mixtures using highly accurate Helmholtz energy equation of state // *Int. J. Eng. Systems Modelling and Simulation*. 2020. V. 12.
7. **Kunz O., Wagner W.** The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: An Expansion of GERG-2004 // *Journal of Chem. Eng. Data*. 2012. V. 57. P. 3032–3091.

Вассерман А.А., Мальчевский В.П.
Одесский национальный морской университет,
Украина, Одесса, 65029, ул. Мечникова, 34
avas@paco.net

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВАЖНЫХ ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ ВЕЩЕСТВ

В последние три десятилетия созданы банки данных (БД) и автоматизированные информационные системы (АИС), предоставляющие пользователям сведения о свойствах веществ и материалов. Среди отечественных наиболее известны банки ТЕРМАЛЬ и ИВТАНТЕРМО, разработанные в ОИВТ РАН. Они содержат описания около 80000 статей и сведения о физических константах и термодинамических свойствах порядка 15000 веществ. Из банков и систем дальнего зарубежья широко известна БД термодинамического исследовательского центра (TRC) и автоматизированные системы NIST Chemistry WebBook и REFPROP. Последняя версия системы REFPROP позволяет рассчитывать свойства 147 чистых веществ и смесей, число компонентов которых может быть до 20.

Анализ достоинств и некоторых недостатков указанных выше БД и АИС стимулировал разработку авторами доклада в Одесском национальном морском университете АИС для расчета теплофизических свойств технически важных для теплоэнергетики веществ: воздуха и его компонентов (азота, кислорода, аргона, гелия, неона, криптона и ксенона), двуокиси углерода, воды и водяного пара. Несмотря на наличие мощных российских и зарубежных банков данных и систем, наша разработка является актуальной по ряду причин. Банки данных содержат готовые таблицы свойств, доступ к которым возможен только при подключении к сети интернет. В нашей системе, содержащей уравнения состояния и уравнения для расчёта транспортных свойств веществ, свойства могут быть рассчитаны в режиме off-line, в неограниченном количестве. Разработанная автоматизированная система так же позволяет вводить в неё новые уравнения для расчета по ним таблиц теплофизических свойств исследуемых веществ.

В представленной нами системе свойства можно определять при температурах от тройной точки до 1500 К и давлениях до 100 МПа при 11 комбинациях независимых переменных, которыми могут быть как термические, так и калорические свойства. Расчёт производится при заданных двух независимых переменных для однофазной и двухфазной областей и одной независимой переменной для расчёта свойств на кривой насыщения. Набор теплофизических свойств и их единицы измерения (массовые либо мольные для калорических свойств, градусы Цельсия и

Кельвина для температуры) могут быть выбраны в соответствии с поставленной задачей. Рассчитанные свойства могут быть сохранены в виде текстового файла либо электронной таблицы MS Excel.

Автоматизированные системы, позволяющие оперативно определять свойства при различных сочетаниях независимых переменных и заменять при расчетах диаграммы состояния, имеют заметные преимущества по сравнению с обычными справочниками. Целесообразно создавать специализированные системы, объединяющие программы расчета свойств и прикладные программы для проектирования криогенных, химических и энергетических установок.

Городнов И.С.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Объединенный институт ядерных исследований,
141980, Дубна, Жолио-Кюри, 6
GorodnovIS@ya.ru

КРИОСТАТ РАСТВОРЕНИЯ ДЛЯ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ МИШЕНИ ЗАМОРОЖЕННОГО ТИПА

В физике элементарных частиц широко распространены поляризационные эксперименты, когда поляризованный пучок элементарных частиц взаимодействует с поляризованными частицами неподвижной мишени. В таких экспериментах исследования эффектов в основном применяются поляризованные мишени замороженного типа (Frozen Spin Polarized Target) [1], которые представляют собой комплексную систему обеспечивающую накачку поляризации, её измерение, а также удержание поляризации во время проведения эксперимента.

Основным узлом таких мишеней являются рефрижераторы растворения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, обеспечивающие достижение сверхнизких температур (<50мК). При таких температурах возможно сохранение высокого уровня поляризации мишени, достигнутого методом динамической накачки поляризации, при относительно слабых магнитных полях (≥ 0.3 Тл) достаточное для проведения эксперимента время (недели).

Применение именно этого типа криостатов обусловлено возможностью достижения сверхнизких температур при лучшей для данного уровня температур холодопроизводительности для, а также возможностью проведения непрерывных длительных экспериментов (до нескольких месяцев).

В 2020 году планируется завершить работы по сборке, наладке и запуску в работу криостата растворения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ для ускорителя «ELSA»,

университета г. Бонн, Германия, силами Сектора Низких Температур Лаборатории Ядерных Проблем Объединённого Института Ядерных Исследований, г. Дубна.

Целевые параметры криостата растворения:

- Температура образца <30 мК, при размере образца $L=20$ мм, $\varnothing=20$ мм.
- Холодопроизводительность на температурном уровне 300 мК >30 мВт при циркуляции ^3He ~ 10 ммоль/с.
- Потребление жидкого ^4He <4 л/ч.

На базе данного криостата, помимо основного его предназначения, готовится проведение теплофизических экспериментов и исследование работы отдельных его узлов. Конструкция данного криостата является оригинальной, при его разработке применялось большое количество эмпирических данных и допущений в проектировании узлов, и в особенности сложных многопоточных теплообменников в широком интервале температур. В данной работе также будут представлены первые экспериментальные данные по испытанию криостата растворения и его отдельных узлов.

В Секторе Низких Температур Лаборатории Ядерных Проблем Объединённого Института Ядерных Исследований в 1966 году был впервые в мире реализован метод растворения. До сегодняшнего дня сектор создаёт установки мирового уровня. На сегодняшний день наши установки работают в ИФВЭ (Протвино), в Праге (Чехия), в Бонне и в Майнце (Германия).

Список литературы

1. **Усов Ю.А.** Разработка и создание криогенных установок для мишеней с замороженной поляризацией ядер водорода и дейтерия: автореферат диссертации на соискание учёной степени к.т.н. по специальности: 01.04.01, Дубна, 2000

Guluzade A.N.¹, Safarov J.T.², Bashirov R.J.¹, Hassel, E.P.²

¹ Institute of Hydraulic and Heat Techniques, Azerbaijan Technical University,
Huseyn Javid Avn. 25, AZ1073, Baku, **AZERBAIJAN**

² Institute of Technical Thermodynamics, University of Rostock, Rostock,
Albert-Einstein-Str.2, D-18059, Rostock, **GERMANY**
javid.safarov@uni-rostock.de

IONIC LIQUIDS AND ALCOHOL SOLUTIONS AS WORKING FLUIDS IN ENERGY SYSTEMS

Renewable energy resources have received growing attention in recent years, especially the aspects of energy saving and protection of the environment. The number of investigations in this field, concerning the processes and design of renewable energy systems and technologies has increased. The solar heating systems and absorption refrigeration machines are playing an important role as renewable energy technologies. These systems are using a various liquids and mixtures as heat transfer fluids. The interest towards alternative heat transfer fluids has increased considerably due to the extreme necessity of more effective use of heat, the creation of wasteless technology, and economy of fuel and energy resources. Traditional as the heat transfer fluids are using a water for solar heating systems and aqueous solutions of ammonia, LiBr, LiCl for absorption refrigeration machines. The freezing of water below $T=273.15$ K, crystallization and corrosion for the aqueous LiBr and LiCl solutions, dangerous of using ammonia in domestic absorption refrigeration machines etc. make problems of using of these heat transfer fluids in under today's strong ecological protection laws.

The heat transfer fluids of these systems must be thermal stability during all working range of temperatures. The reaction with metals, corrosion and consolidation materials should be minimal. The crystallization of a solution during the working time of the systems is inadmissible. One of the common methods to reduce crystallization of the heat transfer fluid is to add a small amount of an organic substance having nonvolatile and hygroscopic properties have been used. The search for new heat transfer agents for these systems, and the development of efficient processes of their use, becomes scientifically and practically important. The efficiency of solar heating systems and absorption refrigeration machines is largely dependent on the physical and chemical properties of the heat transfer fluids. A number of studies also have appeared in the last decades for the development of new heat transfer fluids for these systems in order to reduce the cost and size of them. The ionic liquids and their organic solutions can be use also as heat transfer fluids in the solar heating and absorption refrigeration systems. They are green chemistry chemicals, salts that are liquids at ambient temperatures, ecological pure, have good solubility in organic substances in all concentration range, have very small vapor

pressure, low melting point, high solvating capacity, high ionic conductivity and high thermal stability, which make them attractive for practical applications.

In this presentation, the thermophysical properties of ionic liquids and methanol binary mixtures investigated as new heat transfer fluids in solar heating and absorption refrigeration systems using a high pressure – high temperature Anton Paar DMA HPM vibration tube densimeter. The density values at ambient or saturated pressures $\rho(p_{0 \text{ or } s}, T)/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ and in all range of experimental temperatures were investigated using the Anton Paar DMA 5000M, DSA 5000M and DMA HPM vibration tube densimeters with an uncertainty of $\Delta\rho = \pm (5\cdot 10^{-3} \text{ to } 3\cdot 10^{-1}) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. These values are necessary to check the accuracy of the investigated high pressure – high temperature (p, ρ, T) data using the small extrapolation of them to $p = 0.101 \text{ MPa}$ or p_s/MPa and also to define the saturated density $\rho(p_s, T)$. Vapor pressure values P/Pa of these heat transfer fluids were measured using the two high-accuracy static experimental installations at $T=(274.15 \text{ to } 468.55) \text{ K}$. The speed of sound values $u(p_0, T)/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ at $p=0.101 \text{ MPa}$ and $T = (278.15 \text{ to } 348.15) \text{ K}$ were investigated using the Anton Paar DSA 5000 M vibration tube densimeter and sound velocity meter.

The obtained experimental results were analysed and fitted to various empiric equations of state. The values of isothermal compressibility $\kappa_T(p, T)$, isobaric thermal expansibility $\alpha_p(p, T)$, difference in isobaric and isochoric heat capacities $(c_p - c_v)(p, T)$, thermal pressure coefficient $\gamma(p, T)$, internal pressure $p_{\text{int}}(p, T)$, isobaric heat capacity $c_p(p, T)$, isochoric heat capacity $c_v(p, T)$, speed of sound $u(p, T)$ and isentropic exponent $\kappa_s(p, T)$ of aliphatic alcohols were calculated using the fundamental equations of thermodynamics. The excess $V_m^E/\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$ and apparent molar volumes $V_\phi/\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$ were calculated from these experimental values.

*Дмитриев С.Ф.¹, Маликов В.Н.¹, Ишков А.В.², Шевцова Л.И.³,
Катасонов А.О.¹, Фадеев Д.А.¹*

¹ Алтайский государственный университет
Барнаул, 656070, Ленина, 61

² Алтайский государственный аграрный университет
Барнаул, 656070, Красноармейский, 98

³ Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, 630087, Немировича-Данченко, 136
osys11@gmail.com

КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Проблемы контроля качества проводящих материалов занимают важное место в современной прикладной физике и промышленном производстве. В этой связи актуальной задачей становится разработка сверхминиатюрных вихретоковых измерительных систем для локальных измерений электропроводности в неоднородных материалах, поиска дефектов в сплавах. Тенденция миниатюризации ВТП связана с необходимостью проведения локальных измерений. В последнее время разработаны ВТП, имеющие габаритные размеры 5×5 мм с диаметром используемой проволоки рабочей области 0.15 мм.

Цель данной работы - разработка сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей, обеспечивающих глубину проникновения до 5 мм и локализацию в 2500 мкм² и работающих под управлением персонального компьютера через микроконтроллер платформы Arduino Uno.

Контролируемым параметром является величина электропроводности материала и ее распределение по поверхности и толщине исследуемого объекта. В соответствии с реализуемой авторами концепцией виртуализированных приборов, предназначенных для исследования однородных и неоднородных электропроводящих сред, токовихревой преобразователь подключен к плате Arduino Uno, работающей под управлением специального программного обеспечения (ПО). ПО управляет подачей напряжения на генераторную обмотку преобразователя, а также считывает значения напряжения с измерительной обмотки в условных единицах, которые далее, с учетом предварительной калибровки, переводятся в значения электропроводности.

Разработанная измерительная система работает следующим образом: персональный компьютер управляет генератором прямоугольных импульсов напряжения с частотой следования f_1 и амплитудой U . Частота следования и амплитуда импульсов задается в программе, в соответствии с измерительной задачей. Сгенерированные импульсы напряжения поступают на два последовательно включенных интегратора для преобразования сигнала в синусоидальный. После преобразования мощность сигнала увеличивается в блоке усиления мощности. Усиленный сигнал поступает на возбуждающие обмотки индуктивности ВТП. Синусоидальный ток, действующий в обмотках ВТП, создаёт электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на измерительные обмотки ВТП, наводя в них электродвижущую силу, несущую информацию о структурных неоднородностях объекта контроля, попадающих в зону действия ВТП и усиливающуюся в специальном селективном усилителе, основанном на двухкаскадном модифицированном фильтре Дельяна с многопетлевой обратной связью. В работе использовали сердечники различной формы: трапециевидной и сердечник, выполненный в виде заостренного конуса. В качестве образцов использовали пластину из сплава Al-Mg (Al-94 %, Mg-3 %) с толщиной 5.5 мм. Пластина содержала 6 дефектов в виде прорезей толщиной 0.25 мм на глубине 1; 2; 3; 4; 5; 5.3 мм. Результаты сканирования представлены на рисунке 2: U – напряжение, вносимое на измерительную обмотку датчика; 1 – положение датчика относительно начала объекта.

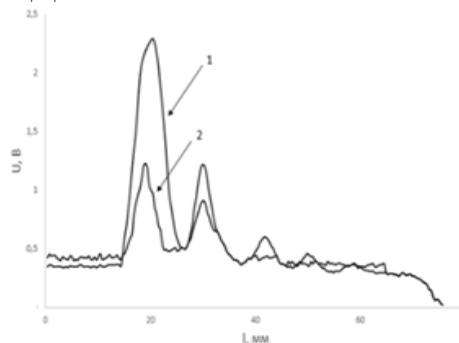


Рис. 1. Результаты измерений образца № 1: 1 – измерение с использованием ВТП-1, 2 – измерения с использованием ВТП-2.

Дудкин К.К.¹, Алифанов О.М.²

¹ АО «НПО Лавочкина»,

г. Химки, Московская область, 141402, Ленинградская 24

² ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,

Волоколамское шоссе 4, г. Москва, 125993

lord-konst@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛУННОГО ГРУНТА ЗАГЛУБЛЯЕМЫМИ ТЕРМОЗОНДАМИ

Определение теплофизических характеристик (ТФХ) лунного грунта является важной научной задачей. Понимание распределения этих характеристик может применяться при определении плотности внутреннего теплового потока Луны. Помимо научного интереса, ТФХ реголита представляют ценность для решения таких практических задач, как, например, строительство лунной базы или ведение горнодобывающей деятельности на поверхности Луны.

Непосредственное измерение ТФХ лунного грунта в реальных условиях было проведено в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17». В них использовалась схема термозонда, представляющая из себя стержень, на котором закреплены нагреватели и термодатчики. Зонд погружался в заранее пробуренную скважину.

Однако, имитационное моделирование работы такого термозонда показывает, что совмещение нагревателя и термодатчиков в одном конструктивном узле создает искажение распределения температуры. Тем самым увеличивается ошибка при определении ТФХ лунного грунта. Разница температур с учетом в модели влияния конструкции термозонда и без учета составила 4,3 °С. Это является существенной величиной при решении обратной задачи теплопроводности.

Были предложены 2 схемы, где нагреватель и термодатчики конструктивно не связаны друг с другом.

Первая схема представляет собой усовершенствованный стержневой термозонд, однако, на нижнем конце находится отделяемый нагреватель с автономным источником питания. Такой зонд показал себя лучше. Разница температур с учетом в модели влияния конструкции термозонда и без учета составила уже 3,1 °С.

Вторая схема представляет собой сложную конструкцию из серии автономных конструктивно не связанных друг с другом нагревателей и термодатчиков, которые фиксируются в заранее пробуренной скважине. Термозонд такой схемы может измерять ТФХ на разных глубинах.

Отклонение температуры от невозмущенного распределения составило 2,3 °С. Это почти в два раза лучше, чем у стержневого термозонда.

Таким образом, разделение нагревателя и термодатчика в термозонде позволяет уменьшать влияние конструкции на распределение температуры, тем самым создавая меньше различных возмущающих факторов при измерении ТФХ лунного грунта. Это, в конечном итоге, положительно сказывается на точности решения обратной задачи теплообмена.

Емельянов А.Н., Шахрай Д.В., Ким В.В.

Институт проблем химической физики РАН

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛЬФРАМА И МЕДИ В ОКОЛОКРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ-ПАР

Задача определения положения на фазовой диаграмме границ двухфазной области и критической точки перехода жидкость-пар для металлов привлекает внимание физиков длительное время [1]. Для большинства металлов из-за высоких параметров критической точки по температуре и давлению околокритические состояния можно достигать только с помощью динамических экспериментов. В основном это методы электрического взрыва проводников и метод изоэнтропического расширения ударно-сжатых образцов в динамически более мягкую среду.

В представленной работе были проведены эксперименты по изоэнтропическому расширению ударно-сжатых пористых образцов меди и вольфрама в плоской геометрии. Исследуемые образцы после ударного сжатия расширились в гелиевую среду с различным начальным давлением (от вакуума до 150 атм.). Излучение от исследуемого образца регистрировалось с помощью оптических пирометров на основе пин-диодов. В экспериментах использовали плоские пористые образцы вольфрама ($m=2.6, 3.1$) и меди ($m=2.3$) (средний размер частиц $\sim 10\text{мкм}$, $m=\rho/\rho_0$ (ρ_0 - нормальная плотность, ρ - плотность образца)). Образцы представляли собой диски диаметром 15-20мм и толщиной 300-400мкм. Из полученных экспериментальных данных определяли скорость ударной волны, давление и температуру на свободной поверхности образца. Для регистрации электропроводности и оценки плотности металлов после расширения в экспериментальную сборку были введены электроды для контактного измерения электропроводности. В процессе проведения эксперимента через электроды пропускали импульс тока $\sim 9,5\text{А}$ и регистрировали падение напряжения на электродах.

Результаты оценки плотности для меди для разных давлений в области входа изоэнтропы в двухфазную область имеет место хорошее согласие с расчетными данными, полученными с помощью одномерного гидродинамического моделирования по методике [2]. Для вольфрама, наоборот, получено сильное различие полученной оценки плотности из экспериментальных данных и с помощью гидродинамического расчета и уравнения состояния [3]. Это позволило предположить, что в экспериментах по изоэнтропическому расширению ударно-сжатого изначально пористого вольфрама при расширении в околоскритической области фазового перехода жидкость-пар происходит расслоение на две фазы, что существенно меняет характер испарения и параметры критической точки фазового перехода жидкость пар.

[1] Физика неидеальной плазмы / Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т.; М.: Физматлит, 2004.

[2] **Ким В.В.** Дисс. канд. физ.-мат. наук. Черноголовка, 2005, 131с.

[3] **Ломоносов И.В.** Фазовые диаграммы и термодинамические свойства металлов при высоких давлениях и температурах. Дис.... док. физ.- мат. Наук, ИПХФ РАН, Москва, 2000. 173с.

*Зайцев Д.А., Бахин А.Н., Беспечалов Б.Н., Вишневский В.Ю.,
Киселев Д.С., Колесников Е.Г., Котов А.Ю., Кочнов В.Ю.,
Репников В.М., Сериков В.С.,*

¹ ФГУП «Научно-исследовательский институт
Научно-производственное объединение «Луч»,
Подольск, 142103, Железнодорожная, 24
dmrzaytsev@gmail.com

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОПЛИВНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ УРАН-ЦИРКОНИЕВОГО КАРБОНИТРИДА С ТУГОПЛАВКИМИ КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Уран-циркониевый карбонитрид $U,Zr(C,N)$, представляет собой высокоплотное, высокотемпературное топливо с высокой теплопроводностью, и высоким содержанием делящегося материала в единице объема, что делает его перспективным для применения в реакторах различных типов, в том числе и в высокотемпературных. На пути к широкому использованию представленной топливной композиции стоит много исследовательских задач, ключевыми из которых являются реакторные эксперименты. Одним из основных условий проведения реакторного эксперимента является герметичность оболочки твэла, т.е. фиксация ГПД в газовом тракте. Поэтому в настоящее время стоит задача выбора материалов корпуса твэла, а также оценка возможности его

работоспособности в условиях реакторного эксперимента на протяжении 5 лет.

В работе приведены результаты материаловедческих исследований, нацеленные на изучение контактной совместимости топливных таблеток на основе уран-циркониевого карбонитрида с выбранными тугоплавкими конструкционными материалами, в условиях высокотемпературных, дореакторных испытаний. Контактными парами для топливных таблеток послужили монокристаллические проставки из W-3Ta с ориентациями [110], [123], [112] и поликристаллические проставки из W и Mo. Топливные и конструкционные материалы были подвержены отжигам при различных температурах значительно превышающих 1200°C. Продолжительность экспериментов для контактных пар с монокристаллическими проставками составила 80 и 300 часов, для поликристаллических материалов выдержка осуществлялась в течение 50, 100 и 150ч. Методами рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии установлена высокая стабильность микроструктуры и состава композиции на основе U,Zr(C,N), во всем температурно-временном диапазоне испытаний. В контактной зоне не обнаружено образования промежуточных фаз, способных повлиять на герметичность и работоспособность оболочечных материалов. Методами послойного радиометрического контроля и микрорентгеноспектрального анализа исследовалась глубина диффузии атомов урана в матрицу конструкционных материалов. В результате проведенных исследований установлено, что ориентация монокристаллов, изготовленных из W-3Ta не влияет на интенсивность диффузии. Глубина проникновения атомов урана в монокристаллические образцы, во всем температурно-временном диапазоне не превысила 15 мкм. Для поликристаллических материалов это значение составило 40 и 350 мкм для W и Mo соответственно.

Zarichnyak Yu.P. ¹, Ivanov V.A. ², Marova A.A. ¹, Khodunkov V.P. ³

¹ ITMO National Research University,
Russia, 197101 St. Petersburg, Kronverksky Avenue, 49

² Institute of Physical and Technical Problems of the North Russia, 677980
Yakutsk, Oktyabrskaya street, 1

³ D.I. Mendeleev Institute for Metrology, Russia, 190005 St. Petersburg,
Moskovsky pr., 19

STRUCTURE AND THERMAL CONDUCTIVITY OF MULTI-LAYER BORON NITRIDE NANO-ONIONS MEDIUM SIZE GROUPE

In 2013-2014, physicists at Yanshan University, China, by sintering boron nitride BN nano-onions(boron nitride nano spheres, BN NS) shown in Fig. 1, at high pressures of 108 GPa and temperatures of 1000 -1600 °C created a superhard material superior to diamond in heat resistance and hardness and promising as a heat-resistant structural material, as well as for cutting tools.

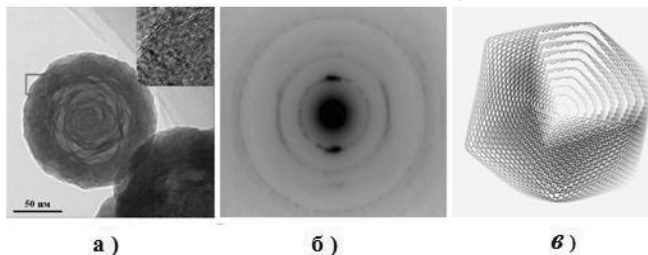


Fig. 1. a - multilayer boron nitride nanosphere $D = 50$ nm [1], б - its microelectron diffraction pattern [1, 2]; в - icosahedral multilayer model of the structure [2]

A model of the structure and a method for calculating (predicting) the thermal conductivity of nanoscale boron nitride multilayer concentric ("onion") structures are developed taking into account the size of the internal cavity d , the interlayer distance, the number N of layers, the outer diameter D and the thermal conductivity of the layers of hexagonal boron nitride h -BN in the longitudinal and transverse direction. Figure 2 shows the results of calculating the thermal conductivity λ of medium-sized boron nitride onions ($d \geq 30$, $D \leq 100$ nm), with the number of layers up to 100.

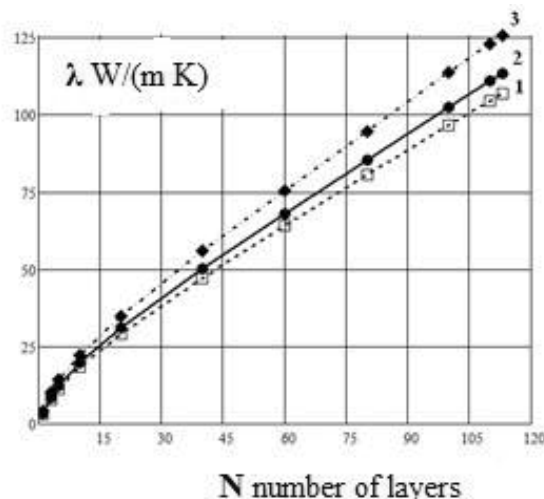


Fig. 2. The thermal conductivity λ of the "onion" structures of the average size range, depending on the number N of layers in the "nanobulbs" and the thermal conductivity of boron nitride along the λC layers: 1 - $\lambda C=400$ W/(m·K); 2 - $\lambda C=600$ W/(m·K); 3 - $\lambda C=1000$ W/(m·K)

List of references

1. **V. I. Lyashenko** et al. Features of the structure of boron nitride particles obtained by carbothermic synthesis // Superhard materials. 2008. № 5. P. 3-6.
2. **Yongjun Tian, Bo Xu, Dongli Yu, Yanming Ma** and others. Ultrahard nanotwinned cubic boron nitride // Nature. 2013 . V. 493. P. 385-388.

*Заричняк Ю.П.*¹, *Ходунков В.П.*²

¹ Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр., 49

² Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева, Санкт-Петербург, 190005, Московский пр., 19

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ НАГРЕТЫХ ТЕЛ

Рассматривается новый метод измерения спектральной излучательной способности нагретых тел, который может быть использован для прецизионных теплофизических исследований различных тел, а также - сплошных и дискретных сред, находящихся как в статическом, так и в динамическом состоянии [1]. За основу метода взята линейная зависимость спектрального распределения интенсивности собственного излучения объекта (тела, среды) в заданном коротком интервале длин волн ближнего инфракрасного спектра. В докладе представлено подробное теоретическое обоснование метода,

сформулированы допущения, показана их правомерность. Уравнение измерения метода получено из общеизвестного соотношения между откликом фотодиода на падающее на него излучение, и мощностью данного излучения. Экспериментально находят нормализованную производную отклика фотодиода по длине волны и относят ее к аналогичной расчетной производной для идеального абсолютно черного тела, находящегося при той же самой термодинамической температуре, при которой находится объект. Представлен один из вариантов аппаратной реализации предложенного метода – принципиальная схема устройства и его структурный состав. Рассмотрена методика выполнения измерений и представлены результаты экспериментальной проверки. В частности, дано значение спектральной излучательной способности вольфрама, измеренное при термодинамической температуре $T=1358$ К на длине волны $\lambda=656$ нм, которое составило $\varepsilon=0.4413$ (справочное значение из [2] равно $\varepsilon=0.4428$, расхождение составило $\delta\varepsilon=\Delta\varepsilon/\varepsilon=(0.4428-0.4413)/0.4428\approx 0.13\%$). Кроме того, впервые в измерительной практике измерена спектральная излучательная способность модели абсолютно черного тела (тип ВВ3500УУ), значение которой составило $\varepsilon=0.9996$ (расчетное справочное значение из [3] равно $\varepsilon=0.9997$, расхождение составило $\delta\varepsilon=\Delta\varepsilon/\varepsilon=(0.9996-0.9997)/0.9997\approx 0.01\%$). Представлена оценка неисключенной систематической погрешности (НСП) метода в относительных единицах $\delta\varepsilon=1.8\cdot 10^{-3}$ (0.18%). Среднеквадратическое отклонение, наблюдавшееся в опытах, составило 0.15 %, а расширенная неопределенность метода (с коэффициентом охвата $k=2$) составила 0.5%.

Неопределенность измерения спектрального коэффициента излучения не превышает 0.5%. Поэтому, вполне правомерно утверждать, что метод позволяет измерять спектральный коэффициент излучения с точностью, близкой к эталонной, и одновременно обеспечивает возможность измерений в широком температурном и волновом диапазоне, для широкой номенклатуры тел, в том числе – для моделей абсолютно черного тела, применимость других известных методов для которых ограничена или невозможна.

Список литературы

1. **Ходунков В.П.** Способ измерения спектрального коэффициента излучения тела. Патент РФ №2685548, опубл. 22.04.2019. Бюл. №12.
2. **Larrabee R.D.** The spectral emissivity and optical properties of tungsten // Technical report. Massachusetts: Institute of Technology Cambridge, 1957. P. 39 - 43.
3. **Ogarev S.A., Khlevnoi B.B. etc.** High-temperature blackbody models for use in photometry, radiometry and radiation thermometry // Measurement Techniques. 2016. V.58. № 11. P. 1255-1260.

Казаков А.Н.¹, Бодиков В.Ю.², Блинов Д.В.^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная, 14
kazakoffalex09@gmail.com

ВОДОРОДОПОГЛОЩАЮЩИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ АВ₅ И АВ₂ ТИПОВ

На протяжении последних десятилетий ведутся активные исследования многокомпонентных металлгидридных материалов для практического применения в стационарном и портативном хранении водорода, термосорбционных компрессорах, хранении тепловой энергии и никель-металлогидридных аккумуляторах [1]. Для использования металлгидридных материалов в электрохимических источниках энергии необходимо, чтобы они обладали высокой обратимой водородная емкостью (>1 %масс), высокой каталитической активностью, устойчивостью к коррозии в электролите и механической стабильностью, длительным сроком службы. Наиболее распространенными металлгидридными материалами являются интерметаллические соединения (ИМС) АВ₅ и АВ₂ типов. ИМС АВ₅ типа отличаются высокой каталитической активностью, легкостью активации и циклической стабильностью, но рабочая электрохимическая емкость ограничена. ИМС АВ₂ типа обладают более высокими емкостными характеристиками, но также этим сплавам присущи трудности при активации и низкая циклическая стабильность.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований водородпоглощающих и электрохимических свойств интерметаллических соединений АВ₅ (La_{0.8}Ce_{0.2}Ni₄Co_{0.5}Mn_{0.3}Al_{0.2}) и АВ₂

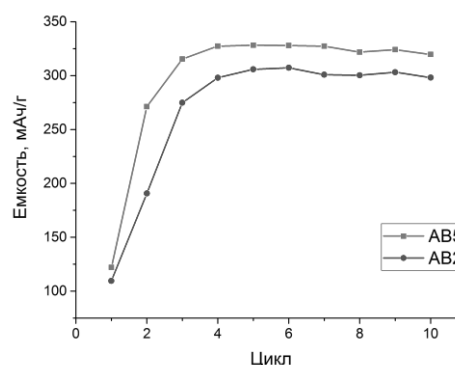


Рис. 1. Активация образцов АВ₅ и АВ₂ сплавов

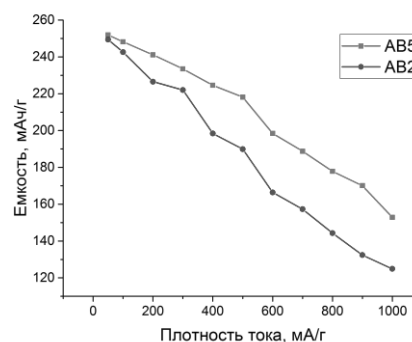


Рис. 2. Производительность электродов при высоких плотностях тока

(Ti_{0.2}Zr_{0.8}NiMn_{0.7}V_{0.2}Fe_{0.1}). Отжиг выплавленных сплавов проводился в атмосфере аргона при 950°C в течение 10 часов с последующим закаливанием в холодной воде. Для исследования электрохимических свойств металлгидридных (МН) электродов были приготовлены таблетки смешением порошков сплавов (20 масс.%) и карбонильного никеля (80 масс.%) с последующим прессованием (25 МПа). Активация образцов проводилась в щелочном электролите 6М КОН циклами заряд-разряд при плотности тока 100 мА/г (Рис.1). Электрохимическая емкость достигает 300-320 мАч/г на 3-5 цикле активации. Следует отметить, что АВ₂ сплав показывает более низкую емкость по сравнению с АВ₅, тогда как в газофазной реакции водородная емкость АВ₂ сплава выше. Это возможно обусловлено с большим наклоном плато равновесного давления для АВ₂ сплава, который ограничивает возможность

использования максимальной емкости в электрохимических исследованиях. Производительность при высоких плотностях тока немного выше для сплава АВ₅. Общая тенденция для обоих сплавов – значительное падение емкости более 50% при плотности тока 1000 мА/г (Рис. 2).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20413)

Список литературы

1. Gary, S., A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view. Journal of Alloys and Compounds, 1999. 293-295(0): p. 877-888.

Камалов Р.Ф., Здор В.О.

Институт энергетики и перспективных технологий
ФИЦ Казанский научный центр РАН,
Казань, 420111, Лобачевского, 2/31
rustemran@mail.ru

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАЗУТА М100

Основным параметром, который характеризует возможность транспортировки и сжигания мазута, является вязкость. К способам снижения вязкости относят подогрев и предварительную обработку мазута ультразвуком. Однако, подогрев мазута достаточно затратная процедура, в связи с чем одним из перспективных способов обработки мазута является ультразвуковое воздействие, которое направлено на изменение физических и химических свойств мазута. В результате ультразвуковой обработки мазута происходит разрыв межмолекулярных связей, вследствие возникновения кавитационных процессов, и снижение вязкости.

Для определения реологических характеристик мазута использован вибрационный вискозиметр SV-10 (A&D, Япония). В качестве источника ультразвукового воздействия использован аппарат УЗТА-0,2/22-ОМ серии «Волна-Т». Непосредственно после обработки образцов проведены экспериментальные исследования по определению вязкости мазута. Для выявления повторяемости полученных результатов было проведено два опыта на двух образцах мазута.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости динамической вязкости мазута М100 при ультразвуковом воздействии равном 1 и 2 мин и без него. Как видно из рисунков происходит снижение вязкости мазута. Так, при ультразвуковом воздействии на мазут равном 1 мин, максимальное снижение вязкости составляет 14,2 %, минимальное – 5,6 %, среднее значение – 9 %. А при ультразвуковом воздействии равном 2 мин, максимальное уменьшение вязкости составляет 7,5 %, минимальное – 5,5 %, среднее значение – 6,4 %.

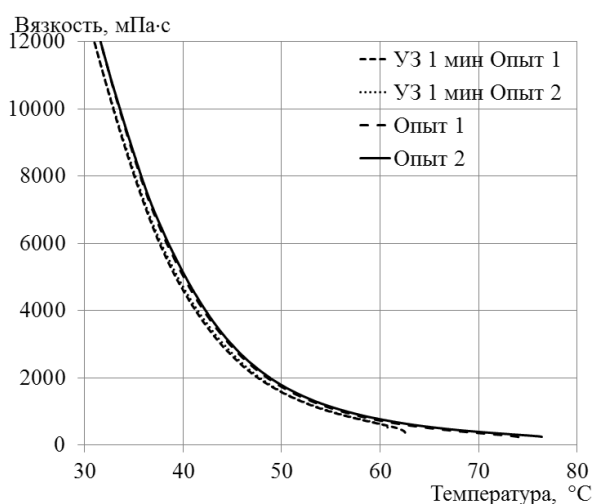


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости мазута М100 от температуры при ультразвуковом воздействии равном 1 мин

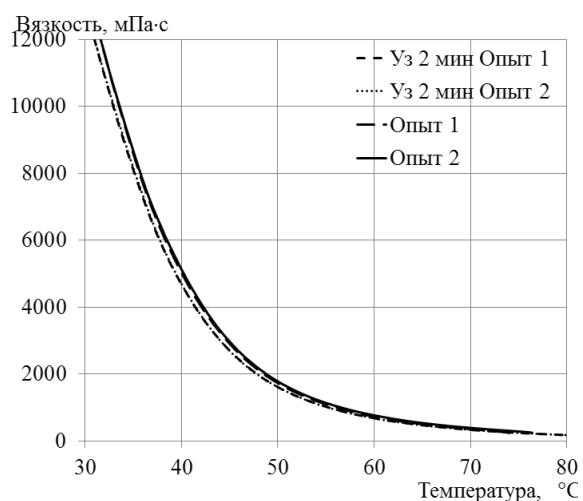


Рис. 2. Зависимость динамической вязкости мазута М100 от температуры при ультразвуковом воздействии равном 2 мин

В итоге проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что уменьшение вязкости характерно для всех опытов, которые отличаются временем ультразвукового воздействия. Это означает, что ультразвуковая обработка способна эффективно снижать вязкость тяжелых нефтепродуктов в течение периода времени, достаточного для их производства, а также для транспортировки на значительные расстояния.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-48-160035.

Клинков А.Е.

ТЕРМОЭМИССИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕПЛА В ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ДЛЯ ТЕМПЕРАТУР МЕНЕЕ 900°С.

Приведены схемы термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) с межэлектродным зазором менее 10мкм для создания малогабаритных источников тока. Вследствие высокой эффективности преобразования тепла в электричество 10-12% показана возможность снижения температуры эмиттера до 850-900°С для получения электрической мощности ТЭП 0.2-0.3 Вт/см². На материалах ранее проведенных испытаний рассматриваются автономные электрические ячейки плоской и цилиндрической геометрии, в том числе каскадные схемы термоэмиссионный преобразователь – термоэлектрический генератор для разных источников тепла: жидкий теплоноситель, радиоактивные изотопы, тепло горения углеводородов, солнечное излучение. Ставятся задачи, которые необходимо решить при разработке конструкций ТЭП практического применения.

Колесников Б.П., Арушанян Р.Р.

Кубанский государственный технологический университет
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2
gradient06@mail.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОВОДИМОСТИ N-КОМПОНЕНТНОЙ МАКРОСКОПИЧЕСКИ НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ СРЕДЫ

Прогнозирование эффективных кинетических коэффициентов многокомпонентных макроскопически неупорядоченных сред (МНС) остается актуальным на протяжении длительного периода времени в связи созданием и использованием всё новых материалов с требуемыми уникальными свойствами. Подавляющее большинство моделей и подходов прогнозирования эффективных кинетических коэффициентов разработаны для двухкомпонентных сред, которые, как правило, применяют и для многокомпонентных МНС путем последовательного приведения их к двухкомпонентной структуре либо, используют «самосогласованный» метод [1]. Однако в первом случае полученные результаты отличаются в зависимости от выбора порядка сочетания компонентов, во втором – расчёт проводится в несколько этапов с разбиением МНС на n-компонентную слоистую систему, что значительно усложняет расчёт.

В процессе развития подхода к многокомпонентной макроскопически неупорядоченной среде как к совокупности перколяционных кластеров, составленных из одноименных компонентов и конечных кластеров,

составленных из различных сочетаний компонентов [2], получена формула для расчета (прогнозирования) эффективной проводимости (тепло- и электропроводности) n -компонентной МНС

$$\Lambda_e = \sum_{i=1}^n \Lambda_{0i} v_i + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \frac{v_j \left[\left(\vartheta_k - \Lambda_{0k} - \sum_{i=1}^n \vartheta_k \vartheta_i + \vartheta_k^2 + \vartheta_k \vartheta_j \right) + \left(\vartheta_j - \Lambda_{0j} - \sum_{i=1}^n \vartheta_j \vartheta_i + \vartheta_j^2 + \vartheta_j \vartheta_k \right) \right]^2}{v_j \left(\vartheta_k - \Lambda_{0k} - \sum_{i=1}^n \vartheta_k \vartheta_i + \vartheta_k^2 + \vartheta_k \vartheta_j \right) + v_k \left(\vartheta_j - \Lambda_{0j} - \sum_{i=1}^n \vartheta_j \vartheta_i + \vartheta_j^2 + \vartheta_j \vartheta_k \right)}$$

где: $\Lambda_e = \lambda_e / \lambda_1$, $\Lambda_{0i} = \lambda_{0i} / \lambda_1$, $v_i = \lambda_i / \lambda_1$, λ_e – эффективная проводимость МНС, λ_{0i} – эффективная проводимость перколяционного кластера i -го компонента, λ_i – проводимость i -го компонента; ϑ_i – объёмная концентрация i -го компонента, $v_1 = 1 \geq v_2 \geq \dots \geq v_n$, $\sum_{i=1}^n \vartheta_i = 1$, при $\vartheta_i = 0 \rightarrow \Lambda_{0i} = 0$ и $v_i = 0$.

Представленная формула не имеет внутренних противоречий, учитывает все вероятностные сочетания компонентов, что даёт однозначность результата расчета, выдерживает предельные переходы при подстановке значений $v_i = 1$ и $v_2 = v_3 = \dots = v_n = 0$, при $n = 2$ совпадает с выражением для двухкомпонентной среды [2], которое в свою очередь трансформируется в ряд известных формул при соответствующих значениях Λ_{0i} . Так как Λ_{0i} – интегральная структурно-топологическая характеристика МНС, то достоверность результата расчёта зависит от достоверности используемых значений Λ_{0i} , полученных либо экспериментально, либо аналитически. Приведены результаты расчётов по представленной формуле с применением значений Λ_{0i} , полученных на основе положений теории перколяции, фрактальной геометрии, теории физики и статистики пористых тел [3, 4], а также анализ их согласованности с экспериментальными данными и результатами расчётов по формулам ряда авторов.

Список литературы

1. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В. В. Новиков. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 246 с.
2. Колесников Б.П. Прогнозирование эффективной проводимости многокомпонентных макроскопически неупорядоченных сред посредством математического моделирования // Науч. тр. КубГТУ. 2016. № 16. С. 461 – 468.
3. Колесников Б.П. Проводимость предельно неоднородных гетерогенных систем // В сборнике: Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ сборник трудов III Международной научно-технической конференции. 2015. С. 237-245.

4. **Kolesnikov B P** Influence of fractal substructures of the percolating cluster on transferring processes in macroscopically disordered environments // Journal of Physics: Conference Series. 2017. T. 891. С. 012355.

Костановский А.В.^{1,2}, Зеодинов М.Г.^{1,2}, Костановская М.Е.¹, Пронкин А.А.^{1,2}

¹ Учреждение Российской Академии наук Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 2200-3200К

Для пиролитического графита характерна резко выраженная анизотропия значений удельного электрического сопротивления. Удельное электрическое сопротивление ПГ параллельно r^a и перпендикулярно r^c плоскости осаждения было исследовано при максимальном значении определяющей температуры 2500К. Ранее было установлено, что отношение r^c/r^a зависит от температуры нагрева материала. В данной работе исследовано влияние температуры нагрева на удельное электрическое сопротивление r^c пиролитического графита марки УПВ-1 в диапазоне $T=2200-3200$ К. Показано, что при нагреве до $T=2700$ К температурная зависимость электрического сопротивления r^c совпадает со справочными данными, при нагреве $T=3000$ К становится подобной зависимости для монокристалла.

Кудрявцева И.В.¹, Рыков С.В.¹, Рыков В.А.¹, Свердлов А.В.^{1,2}
¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Кронверский, 49
² FlaktGroup RUS, Москва, 117997, Профсоюзная, 23
 rykov-vladimir@rambler.ru

ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ R1234UF, УЧИТЫВАЮЩЕЕ СЛЕДУЮЩЕЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ МАСШТАБНОЙ ТЕОРИИ

Обсуждается подход к построению фундаментального уравнения состояния (ФУС), основанный на следующем представлении масштабной гипотезы:

$$\Delta S = X^{-\frac{1-\alpha}{\chi}} \left(\varphi_1 + \varphi_2 \cdot m^2 + \varphi_3 X^{-\frac{\Delta}{\chi}} + \varphi_4 X^{-\frac{\Delta}{\chi}} m^2 \right), \quad m = \Delta \rho \cdot X^{\beta/\chi}, \quad (1)$$

где $\Delta S = (\rho_c T_c / \rho_c) [S(\rho, T) - S_r(\rho, T)] / \phi(\rho)$; $S_r(\rho, T)$ и $\phi(\rho)$ – регулярные функции; ρ_c , p_c , T_c – критические параметры; α , β и Δ – критические индексы; χ – индекс, который совпадает с критическим индексом соответствующей термодинамической функции X ; φ_i ($i=1,2,3,4$) – постоянные коэффициенты.

Для того, чтобы найти из (1) зависимость $S = S(\rho, T)$, мы воспользовались гипотезой Бенедика [1], согласно которой поведение термодинамических функций X , имеющих особенность в критической точке, на критической и околокритических изохорах описывается зависимостью:

$$X = A |\Delta \rho|^{-\frac{\chi}{\beta}} |x + x_1|^{-\chi}. \quad (2)$$

Используя известное термодинамическое равенство $S = (\partial F / \partial T)_\rho$ из (1) и (2) мы получили выражение для свободной энергии Гельмгольца:

$$\frac{F(\rho, T)}{RT} = \frac{F_r(\rho, T)}{RT} + t^{-1} \phi(\rho) |\Delta \rho|^{\delta+1} [a_0(x) + a_1(x)] \quad (3)$$

где $a_0(x)$ и $a_1(x)$ – масштабные функции; $F_r(\rho, T)$ – регулярная функция; $t = T/T_c$; $\Delta \rho = \rho/\rho_c - 1$; δ – критический индекс.

В (3) учтено следующее приближение масштабной теории [2], а параметры функции $a_0(x)$ мы рассчитали, используя соотношения теории подобия [3, 4]. На основе (3) мы разработали фундаментальное уравнение R1234uf и рассчитали термодинамические таблицы для давления p , изохорной и изобарной теплоемкости и скорости звука. Проведено сравнение с экспериментальными данными. Показано, в частности, что отклонения от данных [5, 6] лежат в пределах их экспериментальной неопределенности.

Список литературы

1. **Бенедек Дж.** Спектроскопия оптического смещения и ее применения к задачам физики, химии, биологии и техники // УФН. 1972. Т. 106. № 3. С. 481—504.
2. **Ма Ш.** Современная теория критических явлений. –М.: Мир.-1980.-298 с.
3. **В. Ф. Лысенков, В. А. Рыков** Связь параметров линейной модели решеточного газа и уравнения состояния реальной жидкости // ТВТ. 1991. Т. 29. № 6. С. 1236—1238.
4. **Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A.** Method for constructing fundamental equation of state that satisfies the scaling theory and applicable for substances insufficiently explored in the critical point vicinity // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1385. № 1. pp. 012014.
5. **Yin J., Zhao G., Ma S.** Experimental measurements of saturated vapor pressure and gaseous pVT property for 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf) // International Journal of Refrigeration. 2019. V. 107. № 11. P. 183-190.
6. **Zhong Q., Dong X., Zhao Y., Wang J., Zhang H., Li H., Guo H., Shen J., Gong M.** Adiabatic calorimeter for isochoric specific heat capacity measurements and experimental data of compressed liquid R1234yf // J. Chem. Thermodynamics. 2018. V. 125. № 10. P. 86-92.

Кульков В.Г., Султанов М.М., Чубко Ю.М., Сыщиков А.А., Курьянов В.Н.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Волжский, 404110, проспект Ленина, 69
vikulkov@yandex.ru

МЕХАНИЗМЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Конструкционные материалы, используемые при проектировании и изготовлении теплоэнергетического оборудования, зачастую работают в тяжелых условиях. Они обусловлены одновременным воздействием химически агрессивных сред, высоких температур и давлений, а также значительного уровня вибраций. Способность материала противостоять действию повторно-переменных напряжений называется его выносливостью. Это свойство ухудшается, если материал дополнительно подвержен длительной статической нагрузке при повышенных температурах эксплуатации. Снижение вредного воздействия вибрации является актуальной проблемой эксплуатации энергетического оборудования.

Демпфирование нежелательных колебательных процессов, присущих работе энергетических машин, можно осуществлять двумя принципиально различными способами. Первый из них является

конструктивным и заключается в использовании в конструкции специально предусмотренных устройств демпфирования на стадии проектирования оборудования. К таким устройствам относятся различного рода демпферы в виде узлов с вязким сопротивлением деформированию, упругие элементы, сопрягающие узлы с разными источниками вибрации и оказывающие сопротивление для их взаимной передачи. Недостаток этого метода заключается в том, что его невозможно использовать на действующем оборудовании, поскольку требует внесение изменений в его конструкцию. Второй метод, более приемлемый на стадии использования оборудования, заключается в применении при изготовлении или замене элементов конструкции материалов с высокими демпфирующими свойствами. Демпфирующие свойства металлов и сплавов определяются их микроструктурой. Среди специальных материалов следует отметить сплавы с термоупругим мартенситом, с магнитной составляющей в структуре, со значительной гетерогенностью фаз. Приготовление таких материалов сопряжено, как правило, с достаточно сложными технологическими процессами. Условия работы их зачастую имеют ограничения по температуре и химическому составу агрессивной среды.

Все процессы диссипации колебательной энергии внешнего воздействия на материал, приводящие в конечном итоге к преобразованию их во внутреннюю энергию, обозначаются как внутреннее трение. Можно не принимать во внимание достаточно экзотические механизмы демпфирования с использованием фазовых переходов термоупругого мартенсита и магнитной структуры, поскольку соответствующие материалы пока еще не нашли достаточного применения в теплоэнергетике. Обратим внимание на возможность решения указанной проблемы, рассматривая микроструктуру традиционно используемых в этой отрасли металлов и сплавов. Достаточно эффективного рассеяния колебаний можно добиться применением определенной дефектной структуры однородных и неоднородных по фазе материалов. Важнейшими элементами дефектной структуры являются дислокации в объеме зерна, межзеренные границы с содержащимися на них зернограницными дислокациями, дисклинациями, ступеньками, выводящими плоскость границы в параллельное расположение, а также наличие в них микронесплошностей на самой границе и в месте расположения тройных стыков, изломов и фасеток. Основным механизмом диссипации энергии колебаний в поликристаллических материалах можно считать зернограницное проскальзывание и формоизменение зерен вследствие движения дислокаций. Роль первого из этих процессов преобладает в мелкозернистых структурах, механические характеристики которых принято считать улучшенными.

Спектр внутреннего трения состоит из ряда пиков, накладывающихся на монотонно возрастающий с температурой фон. В основе механизма высокотемпературного фона лежат диффузионные процессы с участием вакансий. Температурно-частотная зависимость величины логарифма внутреннего трения имеет вид монотонной функции с двумя или несколькими линейными участками, соответствующими различной энергии активации процесса. В работе обсуждаются механизмы процесса с участием дефектов различного типа, зависимость положения точек излома и величина энергии активации в каждом интервале частот вибрации и температуры. Понимание этих процессов необходимо для правильной эксплуатации материалов в теплоэнергетическом оборудовании и увеличении его надежности.

Курьяков В.Н.¹, Седенков П.Н.², Иванова Д.Д.²

¹ Институт проблем нефти и газа РАН,
Москва, 119333, ул. Губкина, 3

² Московский государственный педагогический университет,
Институт биологии и химии,
Москва, 129164, ул. Кибальчича, 6к2

³ Российский химико-технологический университет имени
Д.И. Менделеева,
Москва, 125047, Миусская пл.9
Vladimir.kuryakov@gmail.com

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ПАРАФИНОВЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Повышение эффективности процессов теплообмена, транспортировки и аккумуляции тепловой энергии – актуальные задачи современной промышленности и энергетики. Во многих технологических процессах возникает потребность интенсивного отведения тепла. Для данной задачи используется различного рода теплообменное оборудование. При этом помимо рационализации конструкций теплообменников повышение эффективности отвода тепла может быть достигнуто за счет использования модернизированных теплоносителей, например, наножидкостей (НЖ). Наножидкость или нанофлюид – это жидкость, содержащая частицы или агломераты частиц с характерным размером 0,1—100 нм. Такие жидкости представляют собой коллоидные растворы наночастиц. В одном случае присутствие таких частиц может существенно повышать эффективность теплообмена, а в другом, добавление в теплоноситель наночастиц, способных при определенных температурах претерпевать фазовый переход (плавление, кристаллизация), позволяет повысить количество тепловой энергии

переносимой в единице объема жидкости за счет скрытой теплоты фазового перехода материала наночастиц. Эмульсия парафина в воде является одним из перспективных вариантов теплоносителя с частицами, претерпевающими фазовый переход в интервале рабочих температур. В данном выступлении представлен краткий обзор существующих на данный момент типов теплоносителей, содержащих наночастицы с изменяющимся фазовым состоянием в процессе рабочего цикла. Описана методика получения устойчивых парафиновых эмульсий в воде без добавления поверхностно-активных веществ (ПАВ) с характерным размером дисперсной фазы 100 нм. Представлены результаты исследований физико-химических свойств приготовленных эмульсий индивидуальных *n*-алканов. Определены температуры плавления, кристаллизации и температуры ротаторных фаз, исследованных *n*-алканов предложенным авторами новым оптическим методом. Исследовано влияние размера капель эмульсии на температуры фазовых переходов [1-3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 20-08-00984

Список литературы

1. **Kuryakov V.N., Ivanova D.D.** Determination of melting point of n-alkanes by means of light scattering technique // J.Phys. Conf. Ser. 2019. Vol. 1385. P. 12045.
2. **Kuryakov V.N., Ivanova D.D.** Crystallization Behavior of Pure n-Alkane (n-Nonadecane) in a form of Nanoemulsion // Int. J. Nanosci. 2019. Vol. 18. P. 1940032.
3. **Kuryakov V. N., De Sanctis Lucentini P.G., Ivanova D.D.** Tricosane (C₂₃H₄₈) and Octacosane (C₂₈H₅₈) mixture phase transition insight via Light scattering techniques // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 347. P. 012034.

Лепешкин А.Р.^{1,2}

¹ «МАИ» Национальный исследовательский университет,
Москва, 125993, Волоколамское шоссе, 4

² ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,

111116, Москва, Авиамоторная, 2

lepeshkin.ar@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ В ДЕТАЛЯХ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

В данной работе предложены методики исследований электрических сигналов в деталях и нестационарного теплового состояния детали - рабочей лопатки турбины ГТД (из никелевого сплава) и определения ее температуропроводности в поле действия высокочастотных (ВЧ) механических колебаний. В работе [1] был обнаружен электрический сигнал (переменная ЭДС) в полупроводниковом материале (германии) при воздействии ультразвуковых (УЗ) колебаний. В данной работе регистрируются электрические сигналы (переменные ЭДС, возникающие при действии УЗ волн на электроны) в деталях из разных стальных и никелевых сплавов и проводниках из медных, алюминиевых, титановых и никелевых сплавов при воздействии УЗ колебаний. Ранее проводилось исследование влияния УЗ колебаний на температуропроводность стальных деталей [2]. Разработано устройство для определения указанных характеристик, которое представляет собой ВЧ генератор, конструкцию с УЗ преобразователем с закрепленным на нем лопаткой турбины и систему измерения температур. Внутри средней части корпуса преобразователя расположено магнитострикционное устройство, работающее на частоте 20 кГц с интенсивностью 50 Вт. Методика исследований теплового состояния детали предусматривала закрепление в средней части лопатки электронагревателя с теплоизоляцией и установку четырех термопар ХА с диаметром 0,2 мм по длине лопатки. Две термопары установлены по разные стороны от нагревателя и другие в корневой и концевой частях лопатки. В основной точке концевого сечения лопатки исследовались температура (ее изменение) и, соответственно, передача тепла от электронагревателя при воздействии механических колебаний и без них. Проводились исследования кривых изменения температуры концевого сечения лопатки в зависимости от времени при передаче тепла от электронагревателя в экспериментах с включенным УЗ преобразователем и без него. Анализ скоростей нагрева по кривым температуры концевого сечения лопатки показал, что температуропроводность материала лопатки турбины ГТД с учетом влияния ВЧ колебаний увеличивается в 2 раза. Распределения температур по длине лопатки исследовались и сравнивались по указанным термопарам также с учетом влияния

механических колебаний и без их учета. На установившемся тепловом режиме на 40 сек. (электронагреватель был выключен на 10 сек.) были получены указанные распределения температур в двух экспериментах с включенным УЗ преобразователем и без него. Из анализа указанных экспериментов следует, что уровни температур в четырех точках измерений при воздействии механических колебаний меньше, чем уровни температур в эксперименте без них. При этом наблюдалась максимальная разность температур 40 °С между указанными кривыми распределений температур. Кроме того, из этого анализа следует, что выравнивается распределение температуры и снижаются перепады температур (при повышении эффекта теплопроводности) по лопатке турбины при воздействии УЗ. Указанное снижение температуры на 20-35 °С на лопатке турбины ГТД (при низких частотах колебаний - 500 Гц) было обнаружено автором в 1990 г. и было опубликовано в техническом отчете ЦИАМ в 1994 г., но тогда физика этого явления была не ясна. Указанный УЗ эффект повышения теплопроводности может быть использован, например, для повышения эффективности работы противообледенительных систем и др. устройств в авиационной технике и др. технических приложениях.

Список литературы

1. Weinreich G., White H.G. Observation of the Acoustoelectric Effect // Phys. Rev. 1957. No. 106. pp. 1104—1106.
2. Lepeshkin A.R., Shcherbakov P.P. Investigation of thermal conductivity of metal materials on view of influence of ultrasonic waves // Journal of Physics: Conf. Series. 2017. V. 891. No. 012342

Магомадов А.С., Вайниловский Э.К.

Кубанский государственный технологический университет
350075, Краснодар, Московская, 2

ИЗУЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГАЗОВЫХ КОНДЕНСАТОВ НА ПСЕВДОКРИТИЧЕСКОЙ ИЗОБАРЕ

Ранее нами в работе [1] были выполнены экспериментальные исследования коэффициента теплопроводности (λ) стабильных газовых конденсатов различных месторождений России. Там же представлены физико-химические свойства изученных конденсатов, измеренные в соответствии существующими в нефтехимии ГОСТами.

Измерения λ выполнены на установке в которой был реализован метод нагретой нити. Опыты проводились в интервале температуры от минус 40 до 200 °С и давлений до 60 МПа. Температура в опытах измерялась образцовым платиновым термометром сопротивления типа

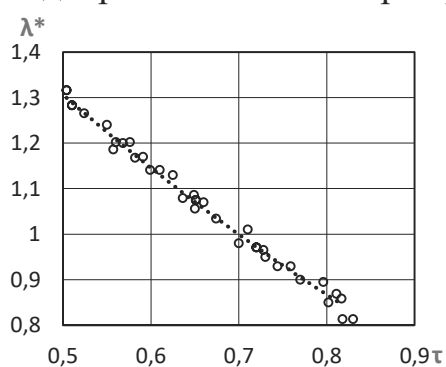
ПТС-10. Измерительная ячейка помещалась в пьезометр, высокого давления который термостатировался в термостате с погрешностью $\pm 0,05$ °С. Все электрические измерения выполнялись на потенциометре Р-348 класса точности 0,001.

Давление в пьезометре создавалось и измерялось грузопоршневым манометром типа МП – 600 класса точности 0,05. Средняя относительная погрешность измерения λ газовых конденсатов оценивается в пределах до $\pm 1,5$ %.

Экспериментальная установка апробировалась на измерениях λ толуола. Полученные результаты по λ толуола в пределах погрешности совпадают с наиболее точными данными других авторов.

Для обобщения опытных данных по теплофизическим свойствам веществ в широких интервалах температуры и давления методами термодинамического подобия нами были использованы псевдокритические давления p_{pc} и температуры T_{pc} . Указанные величины рассчитывались по методике, приведенной в работе [2]. Кроме того, было показано эффективность использования в качестве опорных при обобщении опытных данных коэффициентов теплопроводности газовых конденсатов псевдокритические изобары.

Ниже на графике в приведенных координатах представлены экспериментальные данные о коэффициенте теплопроводности исследованных газовых конденсатов. На графике: $\lambda^* = \lambda_{\pi=1; \tau} / (\lambda_{\pi=1; \tau=0,7})$ – приведенный коэффициент теплопроводности; $\tau = T/T_{pc}$ – приведенная температура; $\pi = p/p_{pc}$ – приведенное давление; T_{pc} – псевдокритическая температура; p_{pc} – псевдокритическое давление; $\lambda_{\pi=1; \tau}$ – коэффициент теплопроводности на псевдокритической изобаре в зависимости от температуры; $\lambda_{\pi=1; \tau=0,7}$ – коэффициент теплопроводности на псевдокритической изобаре при $T = 0,7T_{pc}$.



Из экспериментальных данных выведена формула для нахождения коэффициента теплопроводности

$$\lambda_{\pi=1; \tau=0,7} = 0,368 T_{pc}^{-0,277} p_{pc}^{0,03} M^{-0,167}.$$

Приведенное значение коэффициента теплопроводности конденсатов на псевдокритической изобаре описывается уравнением вида

$$\lambda^* = 2,389 - 2,597\tau + 0,869\tau^2.$$

Как видно на графике и установлено расчетными методами экспериментальные данные λ газовых конденсатов на псевдокритической изобаре описываются единой кривой. Средняя относительная погрешность расчета составляет $\pm 2,3$ %.

Список литературы

- [1] Магомадов А.С., Вайниловский Э.К., Герасимова В.В. Изучение коэффициента теплопроводности газовых конденсатов в широкой области температур и давлений // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте - 2017: Труды XXV Международной конференции / Под ред. В.Е. Привалова. Новороссийск: Изд-во РИО ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2017. С. 158-159.
- [2] Филиппов Л. П. Методы расчета и прогнозирования свойств веществ. – М.: Изд-во МГУ, 1988.

Медников А.Ф., Тхабисимов А.Б., Дасаев М.Р.

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 20Х13 С КОМБИНИРОВАННОЙ УПРОЧНЕННО-ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В настоящее время известны различные способы борьбы с каплеударной эрозией, которые основаны на применении различных сепарационных устройств (активные способы), расположенных на периферии сопловых лопаток и удаляющих часть влаги из двухфазного потока, а также формировании различных типов покрытий или модификаций функциональных поверхностей (пассивные способы), которые позволяют повысить эрозионную стойкость лопаточных аппаратов, воспринимающих ударное воздействие капель, не уловленных сепарационными устройствами.

Для решения актуальной проблемы каплеударной эрозии необходимо понимать не только физику быстропротекающих процессов износа, но и влияние на их интенсивность геометрии рельефа поверхности, а также её свойств и характеристик. В связи с этим на сегодняшний день в мире проводятся исследования по изучению и созданию «smart» поверхности [1], способной противостоять или снижать последствия высокоскоростного ударного воздействия капель жидкости в условиях меняющихся эксплуатационных нагрузок. В качестве одного из путей решения данной проблемы может выступать проведение исследований по выбору оптимальных характеристик структурированного рельефа [2] и разработке защитного покрытия или способа модификации поверхности, способных в

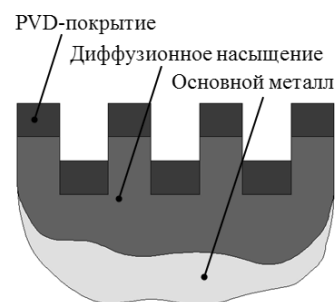


Рис. 1. Схема создания комбинированной упрочненно-текстурированной поверхности

совокупности противостоять разрушающим нагрузкам. Разработка качественно нового способа защиты позволит достичь существенных научных достижений по созданию стойкой к каплеударному воздействию «smart» поверхности, а также результатов, применимых в прикладной сфере с учетом развития энергетической отрасли и новых технологических «вызовов».

Применение разрабатываемого перспективного способа защиты невозможно без проведения регламентированных исследований его износостойкости, в том числе к каплеударному воздействию. С использованием уникального гидроударного стенда «Эрозия-М» НИУ «МЭИ» проведены экспериментальные исследования образцов из лопаточной стали 20X13 с различными комбинациями способов защиты от эрозионного износа, включая текстурирование рельефа, модификацию поверхности путем диффузионного насыщения и формирование защитного ионно-плазменного покрытия.

Список литературы

1. **Wei Su, Ti Zhou, Peng Zhang, Hong Zhou, Hui Li, Qi Sui** Effect of the orientation of laser stripes on the abrasion resistance of biomimetic laser textured surfaces. *Optics and Laser Technology*. 2018;(107):380-388.
2. **Emelyanenko A.M., Shagieva F.M., Domantovsky A.G., Voinovich L.B.** Nanosecond laser micro- and nanotexturing for the design of a superhydrophobic coating robust against long-term contact with water, cavitation, and abrasion. *Applied Surface Science*. 2015;(332):513–517.

Милютин В.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
mva.z@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ПЛОТНОСТИ ГАЗОВОЙ СИСТЕМЫ ГЕЛИЙ – АЗОТ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЕ ЭТОЙ СИСТЕМЫ

На кафедре ТОТ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» была создана экспериментальная установка по исследованию плотности бинарных и тернарных газовых смесей при низких температурах [1-3]. В установке реализован метод пьезометра постоянного объема, количество вещества в пьезометре определялось волюметрическим методом. Смесь для исследования приготавливалась в специальном узле – смесителе. Проверка работоспособности и точности приготовления смеси в смесителе была произведена весовым способом. Тем же способом была

проведена оценка возможности расслоения смеси в пьезометре во время р-в-Т эксперимента. На данной установке были получены экспериментальные удельные объемы для газовых систем бинарной He – N₂ [4] и тернарной He – N₂ – Ne [3] в диапазоне температур 100 ÷ 300 К и при давлении до 16 МПа. В эксперименте для бинарной системы были исследованы смеси четырех составов, для тернарной – трех составов.

Для бинарной системы He – N₂ было получено два уравнения состояния. Первое уравнение было построено в вириальной форме методом определения параметров потенциала межмолекулярного взаимодействия для всей смеси (заданного состава). А с помощью параметров потенциала описывается термодинамическая поверхность всей смеси. Для описания, как чистых компонент, так и смеси, использовался потенциал Леннарда-Джонса (12-6). Параметры потенциала описываются соотношениями $\epsilon_{см} = f_1(x_{He}, x_{N_2})$, $\sigma_{см} = f_1(x_{He}, x_{N_2})$. Эти зависимости близки к линейным зависимостям $\epsilon_{см} = x_{He} \cdot \epsilon_{He} + x_{N_2} \cdot \epsilon_{N_2}$, $(b_0)_{см} = x_{He} \cdot (b_0)_{He} + x_{N_2} \cdot (b_0)_{N_2}$. Вириальное уравнение состояния построенное таким образом удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными [4], [6-7] в диапазоне температур 100 – 300 К и давлениях до 16 МПа. Разумеется, самое плохое описание термодинамической поверхности было около критической области.

Было построено второе уравнение в вириальной форме методом статистической обработки экспериментальных данных. Второй перекрестный вириальный коэффициент получались из экспериментальных данных [4], [6]. Аналитическая зависимость всего второго вириального коэффициента смеси определялась перед статистической обработкой и использовалась в получении уравнения состояния газовой системы. Данное уравнение состояния описало опытные данные [4], [6-7] в пределах экспериментальной погрешности.

Список литературы

1. **Зубарев В.Н., Прусаков П.Г., Барковский В.В., Милютин В.А.** Экспериментальная установка для исследования плотности смеси гелий - азот при температуре 80 – 300К и давлениях до 20 МПа. // Тр. Моск. энерг. ин-та. 1984. Вып. 622. С.94 – 101.
2. **Milyutin V.A.** Experimental study of the density of the helium-nitrogen gas system at low temperatures. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012345, - 6 p.
3. **Milyutin V.A.** An experimental study of the density of the helium – neon – nitrogen gas system at low temperatures. // Journal of Physics: Conference Series 1385 (2019) 012007, - 7 p.

4. **Зубарев В.Н., Милютин В.А., Прусаков П.Г.** Экспериментальное исследование плотности смеси гелий-азот при низких температурах. // М.: 1990. 26 С. – Деп. В ВИНТИ 12.12.90, №6210-В 90.
5. **Зубарев В.Н., Сергеева Л.В., Милютин В.А.,** Расчет вириальных коэффициентов газовых смесей. // ТВТ, 1997, Т 35, №5, С. 712-715
6. **F. V. Canfield, T. W. Leland, Riki Kobayashi.** Compressibility Factors for Helium-Nitrogen Mixtures. // J. Chem. Eng. Data, 1965, 10 (2), pp 92–96.
7. **J. E. Miller, Lowell Stroud, L. W. Brandt.** Compressibility of Helium-Nitrogen Mixtures. // J. Chem. Eng. Data, 1960, 5 (1), pp 6–9.

*Молотова И.А.^{1,2}, Забиров А.Р.^{1,2}, Ягов В.В.¹, Виноградов М.М.¹,
Беляев И.А.²*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
irina_molotova1705@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ГОРЯЧИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ В ЖИДКОСТЯХ

Исследование процессов охлаждения высокотемпературных тел имеет большую значимость для различных отраслей промышленности, таких как теплоэнергетика, металлургия, ядерная энергетика. В случае тяжелой аварии на АЭС наискорейшее охлаждение разогретых топливных элементов – единственный способ предотвращения катастрофы. Возникновение тяжелой аварии с расплавлением активной зоны ядерного реактора и взаимодействие расплава с охлаждающей водой чревато опасностью парового взрыва.

Если начальная температура тела превышает критическую температуру охлаждающей жидкости, то имеет место пленочный режим кипения, характеризующийся низкими коэффициентами теплоотдачи. Во многих технологических процессах стараются избежать или сократить длительность режима плёночного кипения и добиться перехода к более интенсивному режиму. Многочисленные отечественные и зарубежные исследования, а также исследования авторов [1] свидетельствуют о прямом влиянии свойств поверхности на теплообмен при охлаждении высокотемпературных тел в жидкостях. Изменение параметров поверхности путем их модификации или нанесения различных покрытий может существенно повысить температуру перехода к интенсивному режиму охлаждения.

Основной целью данной работы является экспериментальное исследование влияния свойств поверхностей на теплообмен при охлаждении высокотемпературных цилиндрических тел в жидкостях с различными теплофизическими свойствами. На кафедре инженерной теплофизики НИУ МЭИ был создан экспериментальный стенд для проведения экспериментов в интервале температур от -80 до 100 °С и интервале давлений от атмосферного до 10 МПа. Описание экспериментальной установки приведено в [2, 3]. Рабочие образцы представляют собой цилиндры из различных металлов со сферической головкой диаметром 10 мм и длиной 50 мм.

Экспериментально было подтверждено, что процесс охлаждения зависит от многих факторов, таких как температура охлаждающей жидкости, материал покрытий (теплофизические свойства и шероховатость), недогрев жидкости и давление. Подтверждено существование особого режима теплообмена с высокой интенсивностью, возникающего в воде с большими недогревами.

Исследования были проведены при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект №19-38-60057.

Список литературы:

1. Yagov, V. V., Zabirov, A. R., Kanin, P. K. Heat Transfer at Cooling High-Temperature Bodies in Subcooled Liquids // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2018. V. 126, Part A. P. 823–830.
2. Yagov, V. V., et al. Film Boiling of Subcooled Liquids. Part I: Leidenfrost Phenomenon and Experimental Results for Subcooled Water // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2016. V. 100. P. 908-917.
3. Yagov, V. V., et al. Heat Transfer during Cooling of High Temperature Spheres in Subcooled Water at Different Pressures // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2017. V. 110. P. 219-230.

Москаленко Н.И., Додов И.Р., Ахметшин А.Р.

Казанский государственный энергетический университет «КГЭУ»
Казань, 420066, Красносельская, 51

СПЕКТРАЛЬНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ

Анализируются результаты многолетних исследований спектральных радиационных характеристик оптически активных ингредиентов продуктов сгорания энергетических топлив и антропогенных выбросов в атмосферу, выполненных с высоким и средним спектральным разрешением на измерительных комплексах различного функционального

назначения. Выполнена параметризация функций спектрального пропускания (ФСП) ингредиентов газовой фазы продуктов сгорания двухпараметрическим методом эквивалентной массы для неоднородных по давлению и температуре сред [1]. Рассматривается применение метода тонкоструктурной спектроскопии для определения ингредиентного состава продуктов сгорания топлив и антропогенных выбросов в атмосферу. Для получения ФСП при высоких температурах использован метод численного моделирования с применением высокотемпературных атласов параметров спектральных линий. Отмечается, что селективность излучения газовой фазы продуктов сгорания в условиях структурно-неоднородной по температуре среды вносит дополнительные ошибки при решении задачи радиационного теплообмена, обусловленные проявлением эффекта температурного самообращения спектральных линий при высоких температурах.

Разработанные измерительные комплексы имеют модульную конструкцию и вспомогательное оборудование для полного метрологического обеспечения. Спектральная область измерений 0,2÷100 мкм обеспечивается сменой оптических элементов, модулей приема излучения. Изменение оптического пути в средах достигается применением многоходовых оптических схем. Для регистрации спектров поглощения и излучения используются модернизированные дифракционные спектрометры ИКС-24, ИКС-31, ДФС-1, ДСЛ-3, растровый спектрометр Жерара, фурье-спектрометры ФС-01, УФС-02 разработки ЦКБ уникального приборостроения АН СССР. Для снижения шумов используется многократное сканирование спектров и математическая обработка измеренных спектров сплайном в виде полинома пятого или седьмого порядков.

Для создания высоких температур 1500-3000 К используется пламенный измерительный комплекс со встроенной оптической системой Уайта многократного прохождения пламени. Корпус высокотемпературного излучателя и зеркала охлаждаются водой. Установка работает в режимах регистрации спектров поглощения и спектров излучения пламени. В качестве топлива используется водород и метан. Другие оптически активные компоненты вводятся в пламенную зону.

Для определения параметров спектральных линий спектры высокого спектрального разрешения разделяются на отдельные контуры спектральных линий методом дифференциальных моментов с последующим их восстановлением на влияние аппаратной функции спектрометра [2].

Список литературы

1. Москаленко Н.И., Мирумянц С.О., Локтев Н.Ф., Мисбахов Р.Ш. Равновесные и неравновесные процессы излучения: высокотемпературные среды, радиационный теплообмен. Казань, изд. КГЭУ. 2014. 264 стр.
2. Москаленко Н.И. и др. Идентификация ингредиентов и определение ингредиентного состава атмосферных выбросов и продуктов сгорания методом тонкоструктурной спектроскопии//Альтернативная энергетика и экология. 2010. №2. 43-54 с.

*Мотовой И.В., Железный В.П., Хлиева О.Я., Мельник Е.Ю.,
Дьяченко И.А., Дмитриев Е.Д.*

Одесская национальная академия пищевых технологий, Институт
холода, криотехнологий и экоэнергетики,
Украина, г. Одесса, 65082, ул. Дворянская, 1/3
khliyev@ukr.net

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ, ТЕПЛОЕМКОСТИ И ВЯЗКОСТИ РАСТВОРОВ ФУЛЛЕРЕНА C₆₀ В ТЕТРАЛИНЕ

Повышение эффективности солнечных энергетических установок является важной и актуальной задачей. При этом, одним из перспективных и развивающихся на сегодняшний день направлений является исследование целесообразности применения теплоносителей с прямой абсорбцией лучистой энергии солнца, что достигается за счет присутствия в них наночастиц (углеродных наноструктур, наночастиц металлов, оксида меди и др.). Дополнительным преимуществом таких теплоносителей является способность обеспечивать более высокие (по сравнению с базовой жидкостью) значения конвективного коэффициента теплоотдачи. Исходя из сказанного, очевидна потребность в наличии достоверной информации о теплофизических свойствах таких теплоносителей.

Тетралин (CAS# 119-64-2) по совокупности теплофизических свойств может рассматриваться в качестве перспективного высокотемпературного теплоносителя для систем солнечной энергетики. Одним из его преимуществ является способность, в силу химической структуры молекулы, образовывать растворы с относительно высокой концентрацией фуллерена C₆₀. Исследование теплофизических свойств растворов тетралин/фуллерен C₆₀ является актуальной задачей, которой посвящено представленное исследование.

В докладе приводятся результаты экспериментального исследования, плотности, вязкости, теплоемкости растворов фуллерена C₆₀ в тетралине, а так же результаты апробации модели расширенного скейлинга для прогнозирования термодинамических свойств исследованных растворов.

Измерение плотности растворов C_{60} в тетралине проводились пикнометрическим методом. Эксперименты проводились в интервале температур от 285 до 353 К при содержании фуллерена C_{60} в тетралине 0,199, 0,501 и 0,702 масс.%. Исследование двухфазной изохорной теплоемкости выполнено методом непрерывного нагрева в адиабатном калориметре. Измерения теплоемкости были проведены в интервале температур от 237 до 333 К при содержании фуллерена C_{60} в тетралине 0,501 и 1,043 масс.%. Кинематическая вязкость измерялась с использованием капиллярных вискозиметров. Эксперименты проводились в интервале температур от 304 до 434 К при содержании фуллерена C_{60} в тетралине 0,253, 0,519 и 0,699 масс.%. Выполненный анализ показывает, что расширенная неопределенность измерения плотности не превышает 0,04 %, теплоемкости 0,5%, вязкости 0,5%.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что примеси фуллерена C_{60} в тетралине приводят к повышению плотности, уменьшению теплоемкости и незначительно влияют на кинематическую вязкость тетралина. Выполнен детальный анализ избыточных значений мольного объема и теплоемкости растворов тетралин/фуллерен C_{60} , а так же рассчитаны значения энергии активации.

Значительная часть выполненного исследования посвящена моделированию плотности и теплоемкости растворов тетралин/фуллерен C_{60} . Показано, что существующие методы расчёта плотности, вязкости и теплоемкости нанофлюидов не обеспечивают адекватное согласование с полученными экспериментальными данными. Показано, что помимо присутствия в растворах фуллерена C_{60} , вторым по важности фактором, определяющим теплофизические свойства растворов C_{60} в тетралине является изменение структуры жидкой фазы, вызванное присутствием примесей фуллерена. Проведена апробация предложенной ранее в работе [1] модели расширенного скейлинга для прогнозирования термодинамических свойств растворов C_{60} в тетралине в диапазоне температур его использования в качестве теплоносителя в солнечных энергетических установках.

Список литературы

1. **Zhelezny V.P.** The Methods of Prediction of the Properties for Substances on the Coexistence Curve Including Vicinity of the Critical Point// Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Nonlinear Dielectric Phenomena in Complex Liquids. Jaszowiec-Ustron, Poland. 10-14 May 2003. P.163-175.

¹Ойматова Х.Х., ¹Сафаров Ш.Р., ¹Собиров Дж. Ф., ¹Хусайнов З. К.,
²Сафаров М.М.

¹ Бохтарский государственный университет имени Носира Хусрава,
г.Бохтар, Таджикистан

² Филиал МГУ имени М.В.Ломоносова в г. Душанбе, Таджикистан

ВЛИЯНИЕ НАНОПОРОШКА ГИДРАЗИНА НА ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ТЕРНАРНЫХ СИСТЕМ.

Целью данной работы является исследование и выявление особенностей изменения удельной теплоёмкости тернарных систем, при условии которых, один из компонентов тернарных систем является нанопорошок, гидразина.

В данной работе была использована концентрация, который состоит из 25г (69,1%) кремниевой кислоты, 10г (27,6%) гидразина и 1,2г (3,3%) многослойной углеродной нанотрубки.

Для определения удельной теплоёмкости тернарных систем используется аддитивный метод:

$$C_p = n_1 C_1 + n_2 C_2 + n_3 C_3 , \quad (1)$$

Здесь $n_{г}$ - это концентрация гидразина, $n_{к.к}$ - концентрация кремниевой кислоты и $n_{умнт}$ - концентрация многослойной углеродной нанотрубки, а $C_{г}$ -удельная теплоёмкость гидразина, $C_{к.к}$ - удельная теплоёмкость кремниевой кислоты и $C_{умнт}$ - удельная теплоёмкость многослойной углеродной нанотрубки в разных температурах. Кроме того удельная изобарная теплоемкость для исследуемых тернарных смесей экспериментально была изучена сканирующим калориметром.

Используя данные таблица 1 была построена график зависимости изменения удельной теплоёмкости от изменения температуры.

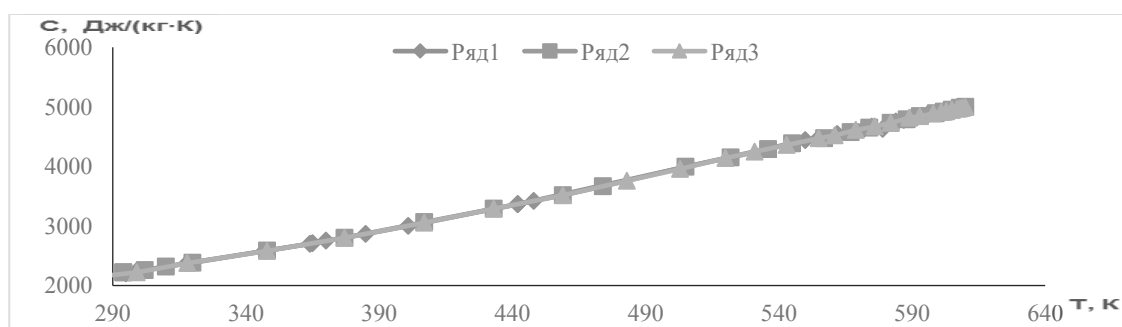


Рисунок 1. Зависимость изменения удельной теплоёмкости от температуры.

По графику видно, что при рост температуры, удельная теплоёмкость возрастает, т.е в данном интервале температур (290К-610К) теплоёмкость вышеупомянутых измеряемых материалов для всех опытов имеет линейный характер роста.

Погрешность измерений оценивается следующим образом:

1. Оценивается абсолютная погрешность измерений ΔC ;

$$\Delta C = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{C} - C_i)^2}{(n-1)n}}$$

2. А также определить относительную погрешность измерений σ :

$$\sigma = \frac{\Delta C}{\bar{C}} 100\%$$

При расчёт получили значений погрешность измерений тернарных систем кремневой кислоты и многослойной углеродной нанотрубки при влияния нанопорошка гидразина в трёх концентрациях.

Погрешность измерения (опыт1)	Погрешность измерения (опыт2)	Погрешность измерения (опыт 3)
3,89%	4,14%	4,06%

При исследование выяснили, что удельной теплоёмкости этих компоненты в месте получаете больше чем по отдельности.

Литература

1. К. Н. Зеленин. Химия, Гидразин: военно-медицинская академия, Санкт-Петербург. 1998- 60с.
2. Химическая энциклопедия/ Редкол.: Кунунянс И.Л. и др...- М.: Советская энциклопедия, 1990.- Т.2-671
3. М. М. Томишко. Многослойные углеродные нанотрубки и их применение: статья. / О. В. Демичева, А. М. Алексеев, А. Г. Томишко, Л. Л. Клинова, О. Е. Фетисова.- Москва. Рос. хим. ж. ЛП, №5,-, ул. НИФХИ им. Л.Я. Карпова 2008.-41с .
4. Новикова С. И. Тепловые расширение твёрдых тел.- М. : Наука. 1974-292с.

ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИНАРНЫХ СИСТЕМ ВОДА-АЛИФАТИЧЕСКИЙ СПИРТ

В работе рассчитаны значения термических коэффициентов (K_T, α, β) водных растворов алифатических спиртов (метанола, этанола, 1-пропанола) на основе экспериментальных данных о p, ρ, T, x - зависимостях жидкой и паровой фаз, в критическом и сверхкритическом состояниях [1-3].

Для расчета величин K_T, α, β систем постоянного состава ($x=const$) использовано полиномиальное уравнение состояния – разложение фактора сжимаемости $Z = pV_m / RT = p / RT\rho_m$ ($R=8.314$ Дж/(моль·К) – универсальная (молярная) газовая постоянная; V_m, ρ_m – молярный объем и молярная плотность соответственно) в ряды по степеням приведенной плотности $\omega = \rho / \rho_{кр}$ и приведенной температуры $\tau = T / T_{кр}$ вида [4]:

$$Z = 1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{n_i} a_{ij} \omega^i / \tau^j, \text{ откуда } p = RT\rho_m \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{n_i} a_{ij} \omega^i / \tau^j \right). \quad (1)$$

Относительная погрешность рассчитанных значений давления от экспериментальных составляет 0.6 – 3.3% в зависимости от системы и числа атомов углерода.

По рассчитанным значениям K_T и α оценена величина внутреннего давления в исследованных растворах по выражению [5]:

$$p_v = p - (\alpha T / K_T). \quad (2)$$

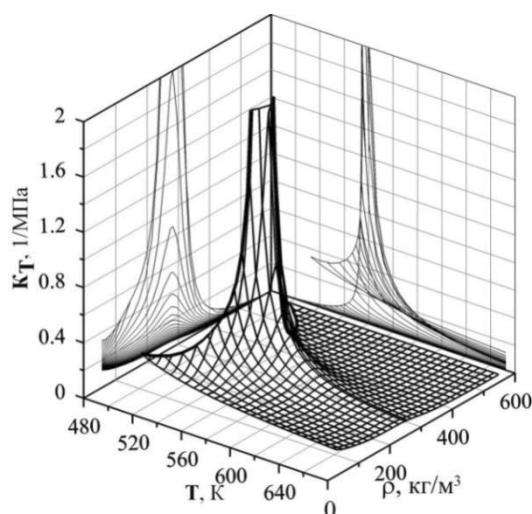


Рис. 1. K_T, ρ, T -поверхность смеси вода–этанол состава $x=0.5$ мол. долей и её проекции на p, T - плоскость и p, ρ - плоскость.

Установлено, что:

1. Величина K_T в жидкой фазе убывает с ростом плотности, а в паровой возрастает. В сверхкритической области изотермы зависимости величины K_T от ρ_m имеют ярко выраженные максимумы для критических значений плотности, которые уменьшаются с ростом температуры, а с ростом концентрации спирта величина K_T возрастает. Аналогичный характер зависимости имеет величина коэффициента объемного расширения α .
2. Величина коэффициента давления β растет с ростом плотности и температуры, а с ростом концентрации спирта убывает во всем исследованном диапазоне параметров.
3. Величина p_e убывает с ростом плотности и практически не зависит от температуры в исследованном диапазоне температур. С ростом концентрации спирта величина p_e растет.

Список литературы

1. Базаев А.Р., Карабекова Б.К., Абдурашидова А.А. p, ρ, T, x -зависимости сверхкритических водных растворов алифатических спиртов // СКФ. 2013. Т.8. №2. С.11.
2. Карабекова Б.К., Базаев Э.А., Базаев А.Р. Термодинамические свойства систем вода–алифатический спирт в широком диапазоне параметров // СКФ. Т.10. №1. 2015. С.35-60
3. Базаев Э.А., Базаев А.Р., Абдурашидова А.А. Экспериментальное исследование критического состояния водных растворов алифатических спиртов // ТВТ. 2009. Т.47. №2. С. 215-220.
4. Карабекова Б.К., Базаев Э.А. Уравнение состояния для смесей вода–спирт в широком диапазоне параметров состояния // Журнал физической химии. 2015. Т. 89. № 9. С. 1386-1396.
5. Карцев В.Н., Родникова М.Н., Бартел Й., Штыков С.Н. Температурная зависимость внутреннего давления жидкостей. // ЖФХ. 2002. Т.76. №6. С.1016-1018.

Охотин В.С., Джураева Е.В., Горелов В.А.

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
Dzhuraeva@rambler.ru

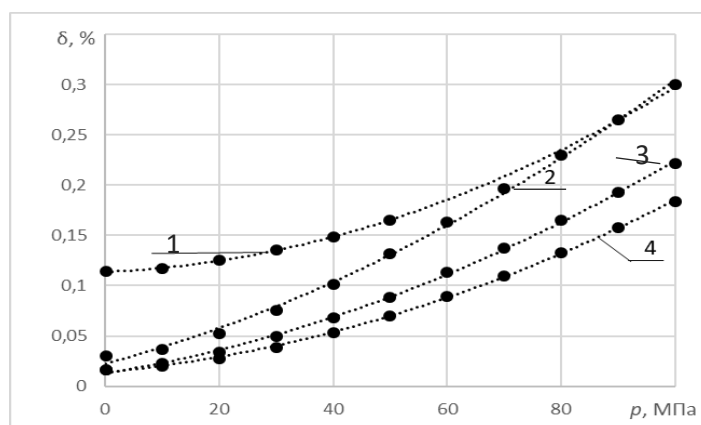
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ ПО ДАННЫМ НА ИЗОБАРЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

В практике расчетов энергетического оборудования случаются ситуации, когда вещества, представляющие несомненный интерес для использования в современных энергетических установках, исследованы совершенно недостаточно – отсутствуют литературные данные о их свойствах или данные представлены в ограниченной области параметров состояния. В частности, для некоторых жидкостей известны свойства только при атмосферном давлении или в состоянии насыщения. Настоящая работа посвящена разработке методов определения свойств таких жидкостей при давлениях, превышающих атмосферное давление.

В предлагаемом методе определения термодинамических свойств жидкостей использовалось то обстоятельство, что изохоры в жидкой фазе в p, T -диаграмме представляют собой линии малой кривизны, и поэтому было принято допущение, что изохоры жидкостей – прямые линии. При этом необходимо знать для жидкостей при атмосферном давлении плотность, изобарную теплоемкость, температурный коэффициент давления или скорость звука. Для численной реализации метода была создана программа расчета термодинамических свойств жидкостей под давлением. Для проверки возможностей метода расчета и оценки точности в качестве эталонной жидкости был выбран толуол – широко применяемая на практике жидкость. Уравнение состояния и термодинамические свойства толуола подробно описаны в [1].

Используя данные о термодинамических свойствах толуола при атмосферном давлении [2, 3], была рассчитана плотность жидкого толуола при температурах 200 К, 250 К, 300 К и 350 К при давлениях от 0,1 МПа до 100 МПа. На рисунке 1 представлена относительная погрешность рассчитанных значений плотности при сравнении с плотностью, рассчитанной по программе RefProp.

Как видно из рис.1 с ростом давления относительная погрешность увеличивается и достигает максимального значения при давлении 100 МПа и температуре 250 К около 0,3%. При температурах от 250 К до 350 К и давлениях до 40 МПа отклонения рассчитанных значений плотности от данных Refprop, не



превышали 0,1%. При температуре 200 К отклонения составили 0,12 – 0,17% при $p \leq 50$ МПа, при $p > 50$ МПа не удастся определить погрешность в связи с отсутствием данных в Refprop. Однако, сравнивая плотности по [1] и полученные данным методом получаем относительную погрешность 0,15-0,33%. Указанные отклонения соответствуют погрешности экспериментальных данных о плотности жидкостей (в том числе, толуола) при таких же давлениях.

Рис. 1. Относительная погрешность определения плотности: 1 – $T=200$ К; 2 – $T=250$ К; 3 – $T=300$ К; 4 – $T=350$ К.

Список литературы

1. Охотин В.С., Разумейченко Л.А., Касьянов Ю.И. Уравнение состояния и термодинамические свойства жидкого толуола, полученные по акустическим данным// Теплофизические свойства веществ и материалов/ ГСССД, 1992, вып. 30. С.20 – 33.
2. Охотин В.С, Разумейченко Л.А., Скородумов А.В. Скорость звука жидкого толуола при атмосферном давлении // Тр. Курск. Гос. пед. ин-та. – 1986. – вып. 20. –с. 106-111.
3. Таблицы ССД. Толуол. Термодинамические свойства жидкой фазы в состоянии насыщения от тройной точки до 520 К и при атмосферном давлении// ГСССД №126 - 88; Стандарты, 1989.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-08-01343).

Першин П.С.¹, Вальцева А.И.², Суздальцев А.В.¹, Зайков Ю.П.^{1,2}

¹ Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,
Екатеринбург, 620137, Академическая, 20

² Уральский Федеральный Университет,
Екатеринбург, 620002, Мира, 19
a.i.valtseva@urfu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КИСЛОРОДОПРОВОДЯЩИХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАСПЛАВА ХЛОРИДА ЛИТИЯ В РЕАКТОРАХ ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ

Оксидно-галогенидные расплавы широко используются в ряде высокотемпературных электрохимических процессов получения металлов и сплавов, а также в разрабатываемых схемах пирохимической переработки ядерного топлива [1-3]. Стабильность и общая эффективность этих процессов во многом определяются возможностью контроля и своевременного регулирования параметров процессов и состава исследуемых расплавов. В частности, речь идет о возможности контроля концентрации ионов O^{2-} в расплавах. Наибольшее распространение для подобных измерений получил потенциометрический метод с использованием кислородного электрода [4]. Благодаря многочисленным физико-химическим измерениям достаточно хорошо изучены закономерности работы данного электрода в оксидно-галогенидных, нитратных, сульфатных расплавах, в твердых электролитах, а также в жидких металлах при определении растворенного кислорода.

В работе исследовано поведение потенциальных керамических материалов (электролитов, проводящих по ионам кислорода) электрохимических устройств контроля технологических операций в оксидно-галогенидных расплавах. На основании литературных данных и термодинамических оценок для длительных ресурсных испытаний в расплавах $LiCl$, $LiCl-Li_2O$ и $LiCl-Li_2O-Li$ при температуре $650\text{ }^\circ\text{C}$ выбраны смеси оксидов $ZrO_2-Y_2O_3$ (YSZ), $ZrO_2-Sc_2O_3$ (ScSZ), ZrO_2-CaO (CaSZ) и $CeO_2-Gd_2O_3$ (CGO). Данные расплавы исследований представляются наиболее широко используемыми в ряде высокотемпературных электрохимических процессов получения металлов и сплавов, а также в разрабатываемых схемах пирохимической переработки ядерного топлива. Устойчивость образцов определяли по изменению массы, внешнего вида, элементному анализу расплава, а также при помощи сканирующей электронной микроскопии.

По результатам ресурсных испытаний в расплавах $LiCl-Li_2O$ показано, что образец $ZrO_2-Sc_2O_3$ является термически неустойчивым (разрушается), а церий в образце $CeO_2-Gd_2O_3$ частично меняет степень окисления на III,

что не позволяет его использовать в качестве материала, проводящего только по ионам кислорода. Наилучшей устойчивостью в расплавах LiCl-Li₂O обладают образцы ZrO₂-Y₂O₃ кубической и тетрагональной структуры и образцы ZrO₂-CaO. Исходя из изменения микроструктуры образцов сделаны выводы, что повышение содержания Li₂O в расплаве LiCl-Li₂O ускоряет разрушение образца преимущественно по механизму выкрашивания, а присутствие лития приводит к разрыхлению образцов. Оба фактора – увеличение содержания Li₂O и появление лития в расплаве ускоряют разрушение образцов, сокращая длительность работы электрохимических устройств в условиях прямого контакта керамических материалов ZrO₂-Y₂O₃, ZrO₂-Sc₂O₃ с исследуемым расплавом. В целом микроструктурные исследования указывают, что керамические материалы на основе YSZ (тетр.) и CaSZ могут быть рекомендованы для использования в расплавах LiCl-Li₂O в качестве кислород-проводящих диафрагм электрохимических устройств.

Список литературы

1. **Merwin A., Williamson M.A., Willit J.L., Chidambaram D.** Review- Metallic lithium and the reduction of actinide oxides // Journal of the Electrochemical Society. 2017. Vol. 164(8). P. H5236–H5246.
2. **Choi E.-Y., Lee J.** Complete reduction of high-density UO₂ to metallic U in molten Li₂O-LiCl // Journal of Nuclear Materials. 2017. Vol. 494. P. 439–447.
3. **Willit J.L., Miller W.E., Battles J.E.** Electrorefining of uranium and plutonium // A literature review. Journal of Nuclear Materials. 1992. Vol. 195(3). P. 229–249.
4. **Чергинец В.Л.** Химия оксосоединений в ионных расплавах./ В.Л. Чергинец. Харьков : ИМНАНУ. 2004. 437 с

Petrik G.G.

Institute for Geothermal Research and Renewable Energy Branch of Joint
Institute of High Temperature RAS,
Russia 367030 Makhachkala, av. Shamil 39a
galina_petrik@mail.ru

METHOD OF SELECTING A MOLECULAR GIVEN OPTIMAL CUBIC EQUATION OF STATE

Low-parameter cubic equations of state (EOS) are still in demand - at least in engineering calculations - due to their simplicity and economy. The goal of our research is a low-parameter physically justified EOS having of fundamental scientific interest, an EOS whose characteristics are determined by a specific molecular model. In our case, this is a model of interacting point centers (IPC). The analytical capabilities of the model were implemented at the

first stage [1]. Answers were received to some questions that had long existed for a vdw-type EOS, which confirmed the adequacy of the new model.

At the second, present stage, the estimated capabilities of the IPC model are evaluated at the thermodynamic level. We obtained the cluster of the equations. First, we explore an EOS, in the configurational contributions of which the following specific character of the interaction forces of the points is reflected — rigid repulsion and attraction optimized compared to weak van der Waals.

A technique is proposed for selecting optimal EOS in a one-parameter family of equations. The technique is based on previously obtained formulas that uniquely connect the three parameters of the EOS and the critical compressibility factor Z_C with the control parameter χ of the model, the value of which reflects the ratio of the forces of attraction and repulsion. The equation of state for which the characteristic of the Z_C equation coincides with the experimental Z_C value for the test substance is considered optimal

$$Z_C = \frac{\chi}{\sqrt[3]{(\chi+1)(\chi-1)+2\chi+1}}$$

The value of the control parameter, reconstructed from the experimental value Z_C of a particular substance, is used to calculate the other three EOS parameters that form a consistent set.

The technique was tested by calculating the critical isotherms of some substances, including Ar, N₂, NH₃, C₄F₈, C₂H₄, CHF₃, and isopentane. EOS selected in the IPC family were compared with the most famous cubic EOS — Redlich-Kwong, Peng-Robinson, and Martin obtained by his great idea on volume translation. (This idea of Martin led to the emergence of a variety of translation methods based on the same two EOS - by Redlich-Kwong and Peng-Robinson. Now the number of such works exceeds the number of proposed new EOS). Unfortunately, the followers, who would develop and use his EOS, are not known to us.

At the same time, the proof (substantiation) of the optimality of his equations, Martin gave a lot of power and space in his last works. After performing calculations for a number of different substances and presenting the results of the comparison with the most famous EOS at that time: Redlich-Kwong, Peng-Robinson, Lee-Edmister, Yusdin-MacAuliff, virial, as well as his EOS with variants of the translation parameter, Martin concludes that the proposed EOS is the simplest and the best among such two-term equations [2]. That is why his works, in which the significant problem of choosing the best EOS were resolved, are of particular interest to us. (We emphasize that J. Martin did the same for EOS Clausius that O. Redlich did for EOS Van der Waals - he breathed new life into old works).

After calculating the EOS selected by a simple method in the IPC family and comparing the results of calculations with different EOS and reference data, we concluded that, in most cases, the best are EOS based on the IPC model (we

emphasize the absence of fitting parameters). Moreover, in some cases, all calculated deviations have the same sign, which indicates the possibility of correcting the model itself. It is likely that the transition from the IPC model to spheres will be a direct implementation of J. Martin's idea of the translation, since already now Martin EOS can be included in the IPC model when considering its "structured" EOS.

1. G. Petrik. Problems of low-parameter equations of state // 2017 *J. Phys.: Conf. Ser.* **891** 012328
2. J.J. Martin. Cubic Equation of State – Which? // *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1979.18. 2. Pp 81-97.

Петрик Г.Г.

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики,
филиал Объединенного института высоких температур РАН,
360030 Махачкала, пр. Шамиля 39а
galina_petrik@mail.ru

МЕТОДИКА ВЫБОРА МОЛЕКУЛЯРНООБОСНОВАННОГО ОПТИМАЛЬНОГО КУБИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

Малопараметрические кубические уравнения состояния (УС) по-прежнему востребованы благодаря своей простоте и экономичности. Самым известным среди них является УС Ван-дер-Ваальса, которое вскоре будет отмечать полуторавековой юбилей. В настоящее время огромное число УС считается его модификациями. Показано, что при надлежащем подборе параметров из общих кубических УС могут быть получены все известные частные формы. На этом основании делается вывод, что проблема кубических УС исчерпана. Однако при этом сохраняется основной упрек в их адрес – слабая связь с микроуровнем.

В статьях (см. на www.csmos.ru), отражающих процесс построения простой молекулярно-термодинамической модели, мы показываем, что новый подход к известным УС позволяет эту связь выявить. Модель включает физически обоснованные УС, характеристики которых определены конкретной молекулярной моделью. В нашем случае – это простая модель взаимодействующих точечных центров (ВТЦ). Аналитические возможности модели были реализованы на первом этапе. В том числе показано, что в нее могут быть включены многие УС вдв-типа. В результате были получены [1] ответы на вопросы, накопившиеся к УС вдв-типа, что подтвердило адекватность новой модели.

На втором, нынешнем этапе оцениваются расчетные возможности модели, что подразумевает в том числе задачу выбора оптимальных УС. Первым из кластера полученных для ВТЦ уравнений анализируется УС, в

двух конфигурационных вкладах и трех параметрах которого отражен следующий конкретный характер сил взаимодействия объектов: жесткое отталкивание и оптимизированное (по сравнению со слабым ван-дер-ваальсовым) притяжение. Соотношение проявлений сил притяжения и отталкивания объектов в отношении доступного им объема отражено в значении управляющего параметра χ модели, имеющего смысл критерия термодинамического подобия и однозначно определяющего три параметра УС и критический фактор сжимаемости Z_C как характеристику УС

$$Z_C = \frac{\chi}{\sqrt[3]{(\chi+1)(\chi-1)+2\chi+1}}$$

УС, для которого характеристика уравнения Z_C совпадает с экспериментальным значением Z_C для исследуемого вещества, считаем оптимальным. На этом основана методика выбора оптимальных УС в однопараметрическом семействе уравнений. Значение параметра χ , восстановленное по экспериментальному значению Z_C , используется для расчета трех параметров УС. Методика апробирована расчетом критических изотерм ряда веществ – Ar, NH₃, C₄F₈, C₂H₄, CHF₃, изопентан.

УС, выбранные в семействе ВТЦ, сравнивались с кубическими УС вдв-типа и вариантами уравнения Мартина, полученными им на основе его же идеи трансляции по объему [2]. Проведя расчеты для ряда веществ, и сравнив результаты для своего УС с наиболее известными на конец 70-х гг. 20 в. УС – Редлиха-Квонга, Пенга-Робинсона, Ли-Эдмистера, Юздина-МакАулифа, вириальным, Мартин делает вывод, что предлагаемое им УС – самое простое и самое лучшее среди подобных двучленных уравнений.

Расчеты по УС, отобранном по простой методике в семействе ВТЦ, и сравнение их с результатами расчетов по различным УС и с референтными данными, привели нас к заключению, что лучшими в большинстве случаев являются именно УС на основе модели ВТЦ. Вероятно, переход от модели ВТЦ к имеющим объем сферам будет прямой реализацией идеи Дж. Мартина о трансляции, поскольку уже сейчас УС Мартина удастся включить в модель ВТЦ при рассмотрении ее «структурированного» УС.

Список литературы

1. G. Petrik Problems of low-parameter equations of state // 2017 *J. Phys.: Conf. Ser.* **891** 012328
2. JJ Martin Cubic Equation of State – which?// *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1979.18.2.Pp 81-97

*Полунин К.К., Мокрушин А.А., Брагин С.Ю., Киселев Д.С.,
Кузма-Кичта Ю.А.*
ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»,
Подольск, 142103, Железнодорожная, 24
PoluninKK@sialuch.ru

ЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ БЫСТРОГО РЕАКТОРА

Облучательное устройство быстрых реакторов с замедлителем из гидрида циркония (ГЦ) позволяет объединить преимущества интенсивного нейтронного потока и тепловой спектр [1]. Согласно литературным данным [2], при температуре 600–700 °С происходит полное выделение водорода из гидрида циркония. Для устранения этого недостатка на поверхность гидридных замедлителей наносят защитные покрытия, среди которых наиболее эффективными считаются оксидные покрытия [2]. Целью настоящей работы является выбор покрытия на поверхности ГЦ для снижения потери водорода в условиях эксплуатации облучательного устройства.

В работе испытания проводились на образцах блоков замедлителя из гидрида циркония, полученного по технологии прямого насыщения сплава Э110. В качестве защитных покрытий были выбраны оксидное, фосфид-оксидное и оксид-эмалевое покрытия.

Исследование выхода водорода из ГЦ проводили с использованием калориметра Netzsch DSC 404F1 и масс-спектрометра Netzsch QMS 403. Методика испытаний заключалась в следующем: образец помещали в керамический тигель, расположенный в высокотемпературной печи калориметра. После проводили промывку системы инертным газом и осуществляли термический нагрев образца по программе испытаний (температура нагрева 10 °С/мин, максимальная температура 1000 °С, изотермическая выдержка 40 мин, охлаждение с печью). Содержание водорода в образцах определяли методом высокотемпературной вакуумной экстракции. Дополнительно выход водорода оценивался по изменению массы в процессе испытаний. Показано, что наиболее технологичным и эффективным является оксидное покрытие, что согласуется с известными представлениями.

Проведен термогравиметрический анализ образца ГЦ с защитным оксидным покрытием и определена температурно-временная зависимость стехиометрического коэффициента (H/Zr). Количественная оценка выделенного водорода исследована в диапазоне температур 20–1100 °С. Повышение температуры до 1100 °С приводит к практически полной потере водорода (98–99 %). При этом образец сохранил целостность, покрытие отслоилось и фрагментировалось.

Список литературы

1. Камович, М.С. Облучательное устройство для быстрого реактора большой мощности / М.С. Камович, В.Ю. Стогов, О.С. Гурская // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2019. - № 2. – С. 228-233.
2. Зайцев В.А., Зайцев П.А., Козловский И.В. Гидриды в ядерной энергетике / Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 256 с.

Понуровская В.В., Ежов Е.В., Кузнецов К.И.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
berenika973@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛ

Углеродные сорбенты класса СКТ, применяемые в процессах очистки, регенерации и рецикла газов, до настоящего времени не использовались для процессов сорбции тяжелых фторорганических газов на сорбентах такого типа. На основе данных о сорбции углеводородов (как некоего морфологического аналога фторуглеродов с сопоставимой молекулярной массой) был выбран модифицированный углеродный сорбент класса СКТ в качестве основного сорбента в экспериментальных исследованиях.

Была разработана морфологическая модель поверхности сорбента, которая включает в себя три типа пор: макропоры (~200нм), мезопоры (~30нм) и микропоры (~0,7нм). При создании морфологической модели использовалась теория фракталов. В качестве шаблона пористой поверхности сорбента выбрана модифицированная модель обобщенной губки Менгера. Фрактализация поверхности проводилась до уровня размера молекулы сорбата. Площади поверхности и объемы пор определялись численно. Процессы сорбции, протекающие в макропорах, рассчитывались по теории Ленгмюра, в мезопорах – по теории БЭТ (Брунауэра-Эммета-Теллера), в микропорах – по теории объемного заполнения микропор. Создана методика расчета интегральных сорбционных свойств углеродного сорбента СКТ, реализованная в виде программного модуля SORB-Mathcad.

Для экспериментального исследования процессов сорбции спроектирован, разработан и изготовлен оригинальный (безмашинный) лабораторный сорбционный стенд. Он предназначен для определения сорбционных свойств фторуглеродных рабочих тел. Конструкция стенда позволяет легко менять исследуемые газы и отбирать пробы газа для масс-спектрометрии.

Подобные фундаментальные исследования сорбции фторуглеродных рабочих веществ проводятся впервые. Результаты исследований позволяют провести корреляцию новых, полученных в эксперименте данных, с проведенными численными исследованиями.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-08-00308.

Список литературы

1. Кагдин А.Н. Фрактальное моделирование и нейронные электрические сети / А.Н. Кагдин, Д.А. Джапарова, К.И. Терехов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – Спец. вып. (52). – С. 65 – 70.
2. Филиппов О.А. Динамическое концентрирование органических соединений на неполярных сорбентах / О.А. Филиппов, Т.И. Тихомирова, Г.И. Цизин, Ю.А. Золотов // Журн. аналит. химии. – 2003. Т.58. № 5. С. 454 – 479.

Радченко А.К., Рышкова О.С., Шкурина В.А., Неручев Ю.А.

ФГБОУ ВО Курский государственный университет
Россия, Курск, ул. Радищева. 33
radchenko.antoshka@mail.ru

ПРИРОДА РАЗЛИЧИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОМЕРОВ Н-ГЕКСАНА

Представлены результаты исследований теплофизических свойств жидкой фазы изомеров н-гексана на кривой равновесия жидкость-пар в широкой области параметров состояния, включающей критическую область. Показано, что эти свойства определяются 3-мя видами межмолекулярных сил. Это дисперсионные силы притяжения ($m=6$), с энергией взаимодействия, пропорциональной квадрату плотности; силы отталкивания ($n=12$) с энергией пропорциональной биквадрату плотности и дальнедействующие силы связи кулоновского вида ($k=1$), с энергией взаимодействия, пропорциональной кубическому корню из величины плотности. Химические силы связи, названные силами Менделеева, обусловлены нековалентным взаимодействием. Они приводят к образованию кластеров, которые в исследуемых жидкостях имеют димерную структуру, и определяют особенности различий теплофизических свойств исследуемых изомеров.

Значения констант межмолекулярных сил определяются критическими параметрами вещества.

Рыков С.В.¹, Кудрявцева И.В.¹, Рыков В.А.¹, Свердлов А.В.^{1,2},
Устюжанин Е.Е.³

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Кронверский, 49

² FlaktGroup RUS, Москва, 117997, Профсоюзная, 23

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

toggl@yandex.ru

ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ, РАЗРАБОТАННОЕ НА ОСНОВЕ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ А.А.МИГДАЛА

На основе феноменологической теории критической точки А.А.Мигдала [1] и нового представления масштабной гипотезы разработано фундаментальное уравнение состояния в форме выражения для свободной энергии Гельмгольца F :

$$F(T, \rho) = F_0(T, \rho) + RT \omega \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M (C_{i,j} \tau_i^j \Delta \rho^i) + RT_c \phi(\rho, T) |\Delta \rho|^{\delta+1} a(x) \quad (1)$$

где $F_0(T, \rho)$ – идеально-газовая составляющая F ; $C_{i,j}$ – постоянные коэффициенты; R – газовая постоянная; $\tau_i = 1 - T_c / T$; $\phi(\rho, T)$ – кроссоверная функция; $x = \tau / |\Delta \rho|^{1/\beta}$ – масштабная переменная; $\Delta \rho = \rho / \rho_c - 1$; $\tau = T / T_c - 1$; ρ_c и T_c – критические параметры; β и δ – критические индексы.

Масштабную функцию $a(x)$ мы рассчитали на основе масштабной функции химического потенциала $h(x)$, предложенной авторами [2]:

$$h(x) = A \Delta \rho |\Delta \rho|^{\delta-1} \left[(x + x_1)^\gamma - (x_1 - x_0)^{2\beta} (x + x_1)^{\gamma-2\beta} \right]. \quad (2)$$

В результате получили следующее выражение для $a(x)$:

$$a(x) = \frac{u_0 \beta}{k \cdot x_1^{2\beta}} \left[(x + x_1)^{2-\alpha} \left(\frac{1}{2-\alpha} + \sum_{n=1}^N (-1)^n \frac{(2\beta-1) \dots (2\beta-n)}{n! (2-\alpha-n)} \left(\frac{x}{x+x_1} \right)^n \right) - \right. \\ \left. - \frac{(x_1 - x_0)^{4\beta}}{x_1^{4\beta}} \cdot (x + x_1)^{2-\alpha} \left(\frac{1}{2-\alpha} + \sum_{n=1}^N (-1)^n \frac{(6\beta-1) \dots (6\beta-n)}{n! (2-\alpha-n)} \left(\frac{x}{x+x_1} \right)^n \right) \right]. \quad (3)$$

Мы апробировали ФУС (1) с масштабной функцией (3) на примере описания равновесных свойств SF_6 и провели сравнительный анализ с известными фундаментальными уравнениями состояния, предложенными в авторах работ [3], [4] и [5]. Полученные результаты обсуждаются.

Список литературы

1. Мигал А.А. Уравнение состояния вблизи критической точки. // ЖЭТФ. 1972. Т. 62, № 4. С. 1559-1573.
2. Kudryavtseva I.V., Rykov S.V. A Nonparametric Scaling Equation of State, Developed on the Basis of the Migdal's Phenomenological Theory

- and Benedek's Hypothesis // Russ. J. Phys. Chem. A. 2016. V. 90. № 7. P. 1493–1495.
3. **Tegeler C., Span R., Wagner W.** A New Equation of State for Argon Covering the Fluid Region for Temperatures From the Melting Line to 700 K at Pressures up to 1000 MPa // J. of Phys. Chemical Reference Data. 1999. V. 28. P. 779–849.
 4. **Безверхий П.П., Мартынец В.Г., Каплун А.Б., Мешалкин А. Б.** Расчет термодинамических свойств SF₆, включая критическую область. Комбинированное термическое уравнение состояния с малым числом параметров // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 706–715.
 5. **Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Rykov S. V.** The method for constructing the fundamental equation of state for SF₆ // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1385. 012009.

Сенченко В.Н., Беликов Р.С.

Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская, 13 стр.2
pyrolab@ihed.ras.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ НИОБИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Перспективным методом для исследования теплофизических свойств электропроводных материалов является метод миллисекундного импульсного электрического нагрева [1-2]. Суть реализованного метода заключается в быстром нагреве образца до заданной температуры вплоть до температуры плавления и выше за время от 100 мкс до 3000 мкс за счет однородного объемного выделения тепла при прохождении по нему импульса электрического тока большой амплитуды. Нагрев осуществляется в изобарических условиях в камере высокого давления при статическом давлении буферного инертного газа (Ar) до 2 кбар.

С помощью двухканального цветового пирометра и быстродействующего спектрометра измеряется термодинамическая температура поверхности образца. Таким образом, измеряя температуру образца во время эксперимента $T(t)$, ток $I(t)$ и падение напряжения $U(t)$ между потенциальными зондами, размещенными в средней части образца, можно определить зависимость изменения энтальпии $\Delta H_p(T)$, а также изобарной теплоемкости $C_p(T)$ путем дифференцирования аналитического выражения для энтальпии. Кроме того, методика позволяет вычислять удельную теплоемкость, не прибегая к дифференцированию, рассчитывая вводимую мощность в каждый момент времени.

Значение эффективного электросопротивления (т.е. сопротивления без учета расширения) образца можно получить непосредственно из измеряемых электрических величин тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$. Для нахождения удельного сопротивления материала необходимо также учитывать линейное расширение образца, меняющее сечение образца. Расширение образца фиксируется напрямую с помощью теневой видеосъемки и, одновременно, регистрации собственного теплового свечения нагретого образца.

Важной особенностью созданной установки является подвижная конструкция одной из цанг, позволяющая образцу свободно расширяться вдоль его оси без нарушения электрического контакта. Таким образом, в ходе эксперимента измеряется как поперечное расширение образца, так и его удлинение, что осуществляется с помощью измерения положения указателя, жестко связанного с подвижной цангой.

В ходе проведенных экспериментов были получены зависимости тока, напряжения, температуры и геометрических размеров для образца из ниобиевой проволоки чистотой 99,99% при его нагреве до температуры плавления. Из полученных данных были рассчитаны температурные зависимости удельных энтальпии, теплоемкости, электросопротивления и линейного коэффициента термического расширения ниобия при температурах, близких к температуре плавления. Полученные данные согласуются с имеющимися в литературе.

Полученные температурные зависимости теплофизических свойств ниобия представляют интерес, в частности, для построения широкодиапазонных уравнений состояния, а также для использования в высокотемпературной технике.

Данная работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда № 19-19-00713.

Список литературы

1. **V.N. Senchenko, R.S. Belikov**, Experimental investigation of linear thermal expansion of pyrolytic graphite at high temperatures // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891. P. 012338.
2. **V.N. Senchenko, R.S. Belikov**, Experimental investigation of density of pyrolytic graphite up to melting point // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 946. P. 012105.

Скурихин А.В.¹, Костановский А.В.²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
125412, г. Москва, Ижорская ул., дом 13, стр. 2
SkurikhinAV@mpei.ru

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА В ПОРИСТЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Производство и рациональное использование эффективных огнеупорных теплоизоляционных материалов (ОТИМ) позволяет обеспечить снижение материалоемкости конструкций тепловых агрегатов, уменьшить массу печей, непроизводительные теплотери в окружающую среду, а также общий расход топлива в печах. При приемке изделий из ОТИМ требуется контроль коэффициента теплопроводности λ . Данный процесс является затратным по времени и требует наличия дорогого оборудования и труда квалифицированного персонала. В этой связи, представляет научно-практический интерес разработка методики расчетно-аналитической оценки возможной величины λ ОТИМ.

Для получения ОТИМ в его состав могут добавляться природные пористые наполнители (вспученные вермикулит или перлит, керамзит, диатомит, трепел, каменная вата и др.) [1]. Вспученный вермикулит (для краткости, вермикулит), получаемый обжигом одноименного концентрата, обладает малой насыпной плотностью (70-250 кг/м³), низким λ (0,05-0,10 Вт/(м*К) при T = 300 К), сравнительно высокой температурой плавления (до 1600 К), химически инертен, долговечен, экологически безопасен [2], что обеспечивает ОТИМ высокие теплоизолирующие свойства в сочетании с низкой плотностью.

На практике ОТИМ используются в области температур вплоть до 1600 К, а при температурах в печи свыше 600 К доля излучения при передаче теплоты в материале требует учета и с ростом температуры быстро увеличивается. Кроме того, при таких температурах возрастает и конвективная составляющая теплопередачи. Так что необходимо рассматривать задачу сложного теплообмена, где должны быть учтены все три механизма теплопередачи: «молекулярная» (или «фононная») теплопроводность, излучение и конвекция. Исходя из независимой природы, можно предположить, что эти составляющие аддитивны: $q = q_{\text{изл.}} + q_{\text{мол.}} + q_{\text{конв.}} = \text{const}$ (в стационарном случае). В настоящей работе была предпринята попытка разделить эти три типа теплопередачи.

Согласно ранее проведенным экспериментам [3-4], в ходе расчетов среднего коэффициента поглощения по Росселанду в широком диапазоне длин волн (от 7500 до 370 см⁻¹ с шагом <1 см⁻¹) выяснилось, что вермикулит - полупрозрачный материал [5], также определен его λ для разных фракций и температур с учетом ориентации частиц и его изменения после прокаливания при 1273 К в течение 3 ч. Впоследствии, опытные данные заложили основу для выполнения настоящей работы.

Расчетно-аналитическая часть работы заключалась в построении моделей, описывающей сложное распространение тепла внутри ОТИМ в среде Matlab, объясняющих их теплофизические свойства, и их усложнении для более полного учета условий и получения более точных результатов. В области расчетных оценок составляющих λ вермикулита авторам еще не встретились ранее опубликованные работы в литературных источниках.

Список литературы

1. **Н.Н. Кальянов, А.Н. Мерзляк** Вермикулит и перлит - пористые заполнители для теплоизоляционных изделий и бетонов под ред. В.А. Китайцева. Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. М. – 1961.
2. **Дубенецкий К.Н., Пожнин А.П.** Вермикулит. Стройиздат, Ленинградское отделение, 1971 - 176 с.
3. **Скурихин А.В., Костановский А.В.** Определение коэффициента поглощения термовермикулита // «Приборы», 2019 № 5 (227).
4. **Скурихин А.В., Костановский А.В., Маркелов С.А.** Установка для измерения коэффициента теплопроводности сыпучих огнеупоров стационарным методом (на примере вспученного вермикулита) // «Приборы» № 10 (232), 2019.
5. **Сергеев О.А., Мень А.А.** Теплофизические свойства полупрозрачных материалов М., Издательство стандартов, 1977, 288 с.

Станкус С.В., Хайрулин А.Р.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, Лаврентьева, 1
stankus@itp.nsc.ru

КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ ЖИДКИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ РУБИДИЙ-ВИСМУТ

На концентрационных зависимостях свойств жидких сплавов системы рубидий-висмут обнаружены пики электросопротивления и коэффициента термического расширения (КТР), а также наблюдаются значительные отклонения мольного объема от расчетов по законам идеальных растворов [1, 2]. Предполагается, что такое поведение

расплавов связано с образованием в них ассоциатов с частично ионным характером межатомного взаимодействия, в которых роль анионов играют ионы висмута, а катионов – ионы рубидия. Теория жидких висмутидов щелочных металлов сдерживается, в частности, из-за недостатка экспериментальной информации об их термодинамических свойствах. Нам не удалось обнаружить литературных данных по энтальпии и теплоемкости сплавов системы рубидий-висмут в конденсированном состоянии, поэтому задачей нашего исследования являлось измерение калорических свойств данной системы.

Эксперименты выполнены на массивном калориметре смешения с изотермической оболочкой [3]. Сплавы рубидий-висмут приготавливались из компонентов чистотой 99,9 мас. % (Rb) и 99,98 масс. % (Bi). Концентрация компонентов определялась весовым методом. Все операции по подготовке образцов и герметизации ампулы из нержавеющей стали (дуговой сваркой) проводились в перчаточном боксе с аргоновой атмосферой чистотой 99.992 об.%. Ампула с образцом перед сбрасыванием длительное время выдерживалась при 1100 К для достижения гомогенизации расплава. Температура измерялась термопарой типа S, которая поверялась по точкам затвердевания чистых металлов. Методика проведения измерений и обработки результатов подробно описана в [3]. Теплоемкость рассчитывалась дифференцированием аппроксимационных уравнений для приращения энтальпии. Оцениваемая погрешность C_p составляла 1,0–1,5% [4, 5].

На рис. 1 приведена концентрационная зависимость теплоемкости. Точки обозначают результаты наших измерений, а пунктирная прямая – расчет C_p по правилу аддитивности. Видно, что в области концентраций 25 ат. % Bi (Rb_3Bi) наблюдается четко выраженный максимум. Абсолютное значение C_p в максимуме лежит между характерными величинами теплоемкости

металлических и солевых расплавов и превышает теплоемкость компонентов при 1000 К более, чем на 40%. Такое поведение хорошо коррелирует с изменением коэффициента термического расширения расплава, где было исследовано существенно большее количество сплавов

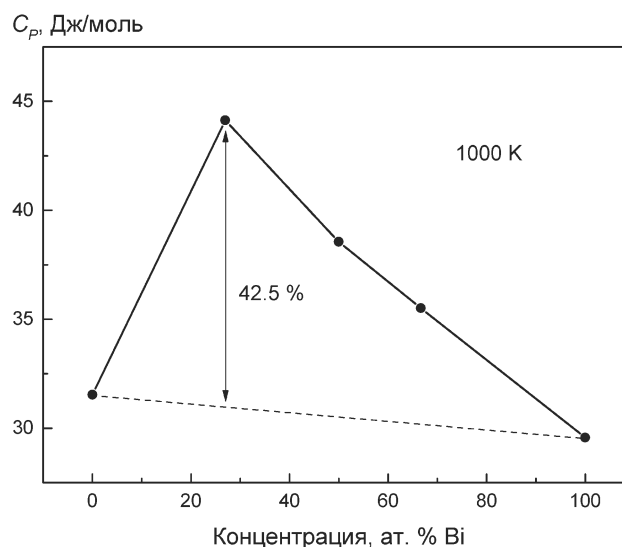


Рис. 1. Теплоемкость расплавов системы Rb-Bi при 1000 К.

[2] и также зафиксирован максимум КТР при 25 ат. % Вi. Наличие экстремумов косвенно подтверждает образование в расплавах системы рубидий-висмут ассоциатов состава Rb_3Bi и их диссоциацию с ростом температуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10023-П) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-38-00070).

Список литературы

1. **Meijer J.A., van der Lugt W.** Resistivity of Liquid K–Bi and Cs–Bi Alloys // J. Phys.: Condens. Matter. 1989. Vol. 1. P. 9779—9784.
2. **Хайрулин Р.А., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В.** «Химическое сжатие» в расплавах рубидий-висмут // ЖФХ. 2017. Т. 91. № 10. С. 1723—1727.
3. **Станкус С.В., Савченко И.В., Яцук О.С.** Высокотемпературный калориметр смешения для исследования веществ и материалов в твердом и жидком состояниях // ПТЭ. 2017. № 4. С. 150—156.
4. **Stankus S.V., Savchenko I.V., Yatsuk O.S.** Calorical properties of equiatomic alloy of rubidium - bismuth system in the temperature range 293–1175 K // J. Phys. Conf. Ser. 2019. Vol. 1359. Art. No. 012104.
5. **Станкус С.В., Савченко И.В., Яцук О.С., Расчектаева Е.П.** Калорические свойства "металлической соли" $Rb_{73}Bi_{27}$ в твердом и жидком состояниях // ЖФХ. 2018. Т. 92. № 9. С. 1379—1383.

Тауров Э.Ш.¹, Сафаров М.М.², Тиллоева Т.Р.¹

¹ Филиал национального исследовательского университета «МЭИ»
в г. Душанбе

Таджикистан, г. Душанбе, 734002, М.Турсунзода, 82

² Филиал московского государственного университета им. Ломоносова
в г. Душанбе

Таджикистан, г. Душанбе, 734003, Бохтар, 35/1

tahmina17@mail.ru

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТИЛОВОГО СПИРТА

Как известно теплопроводность материалов и веществ является процессом, который сопровож-дается распространением тепла по результатам Кулоновского (электромагнитного) взаимодействия с

отличительной друг от друга температурой отдельных частиц рассматриваемого тела, т.е. сопровождается обменом энергией между частицами материала [1,2].

Медно-цинковые катализаторы широко применяются в промышленной и бытовой химии для производства различных моющих и чистящих средств, при получении первичных жирных спиртов, при дегидрировании этилового спирта, при получении формальдегидов, при получении метанола при значительно низких температурах, в различных окислительно-восстановительных реакциях, в виде пластин их применяют в качестве гальванического элемента как химический источник электричества (элемент Даниэля – Якоби, который послужил основой для открытия и соответствующего изобретения более совершенного и надежного химических источников энергии) и многое другое [3]. Уменьшение размеров материалов и веществ (в нашем случае стружка), часто приводит не только к изменению их свойств, но и к приобретению совершенно новых свойств. Это связано с ростом площади поверхности и соответственно роли поверхностных атомов и взаимодействий. Среди прочих материалов особенное место занимают металлические частицы из-за особенности их электронной структуры и простоты их получения [2,4].

Результаты различных исследований медно-цинковых катализаторов легли в основу большинства современных научно-технических открытий широкого спектра пользования, однако хотелось бы отметить, что их теплофизические свойства изучены недостаточно подробно, а существующие теории не позволяют их рассчитать с необходимой точностью для науки и практики. В связи с чем, обращение к эксперименту является единственно правильным решением данной проблематики. Современные методы исследования тепловых процессов, применяемых при описании процессов переноса тепла в технически важных материалах и веществах нуждаются в комплексе теоретически обоснованных и практически подтвержденных данных. В связи с чем опытные исследования свойств веществ и материалов выступают на первый план, поскольку в подавляющем своем большинстве решение инженерных и прикладных задач требует достоверных данных, и даже максимально приближенные данные о свойствах необходимых материалов могут привести к существенным ошибкам и недочетам в процессах проектирования и разработок новых технологий и материалов. Учитывая вышеизложенное нами было выполнено комплексное исследование по изучению теплофизических свойств (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность) медно-цинковых катализаторов в широком интервале изменения температуры, концентрации составных компонентов (медь и цинк), которая варьировалась от 10 до 90%. Для реализации поставленной цели нами был использован прибор, разработанный на основе метода монотонного разогрева, для измерения

теплопроводности образцов в зависимости от изменения температуры опыта до 400К [5].

На основе полученных результатов с применением закона соответственных состояний, были выведены соответствующие эмпирические уравнения, которые позволяют с погрешностью не более чем 4% выполнить расчет теплопроводности экспериментально не исследованных образцов.

Список литературы

1. Теплопроводность материалов / Коротких А.Г.; Под ред. А.А. Громова, А.Г. Коротких. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. 96 с.
2. **Агажанов А.Ш.** Экспериментальное исследование теплопроводности и температуропроводности жидких теплоносителей и конструкционных материалов ядерной энергетики // Дис. На соискание ученой степени к.ф.-м.н.; Новосибирск, 2016. 171с.
3. Электронный справочник химика 21. Химия и химическая технология / <https://chem21.info/info/355307/>
4. Непийко С.А. Физические свойства малых металлических частиц // Киев: Наук. Думка. 1985. 246 с.
5. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. – Л.: Энергия, 1973. - 143 с.

Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Томин А.С., Коверда В.П.

Институт теплофизики УрО РАН,
Екатеринбург, 620016, Амундсена, 107а
faizullin@itp.uran.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВОГО ГИДРАТА В ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ СЛОЯХ АМОРФНОГО ЛЬДА В УСЛОВИЯХ ВЗРЫВНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Газовые гидраты рассматриваются в качестве важного энергетического ресурса человечества благодаря сосредоточенным в них огромным запасам углеводородов. По различным оценкам содержание в них газа (главным образом метана) составляет от $2 \cdot 10^{14}$ до $8 \cdot 10^{18}$ м³. Представляет интерес перспектива использования гидратов для хранения и транспортировки газов в газогидратном состоянии благодаря их уникальному свойству связывать большие объемы газа. Например, один кубический метр гидрата метана в равновесном состоянии содержит до 160 кубических метров газа. Решение этой задачи предполагает разработку высоко производительных и экономичных методов получения газовых гидратов в промышленных масштабах.

В настоящем исследовании экспериментально изучена устойчивость газонасыщенных слоев аморфного льда, полученных конденсацией сверхзвуковых потоков разреженного пара и метана на подложке, охлаждаемой жидким азотом. Высокопористая структура аморфного льда способствует его насыщению газовыми молекулами. Нагревание конденсатов приводит к стеклованию аморфной структуры (переходу из твердого аморфного состояния в жидкое) и кристаллизации. Присутствие в неравновесных конденсатах кристаллических нанокластеров льда, образованных на выходе из сверхзвукового сопла, обеспечивало условия для инициирования "горячих" центров и переход к взрывному режиму кристаллизации в аморфной среде с необратимым захватом газовых молекул и образованием гидрата метана. Лавинообразное зарождение центров кристаллизации в условиях глубокой метастабильности обеспечивает захват молекул газа без их вытеснения движением фронта кристаллизации. Формирование гидрата происходит с построением кристаллической кубической структуры I (sI), характерной для него в равновесных условиях.

В опытах наблюдали несколько экзотермических сигналов, указывающих на кристаллизацию из разных центров и случайный характер их распределения в объеме образца. Наличие кристаллических зародышей, внесенных в неравновесные аморфные конденсаты, смещало начало кристаллизации в область низких температур. Температура, соответствующая сигналу окончания кристаллизации, возрастала от 158 К при нулевом содержании метана до 168 К при его содержании 10 масс. %. Заметного влияния изменения концентрации газа на температуру стеклования газонасыщенного аморфного льда не наблюдалось.

Кристаллизация неравновесных газонасыщенных слоев аморфного льда с искусственно внесенными центрами кристаллизации приводит к образованию газового гидрата. В условиях глубокой метастабильности реализуется спонтанный режим кристаллизации, обеспечивающий захват молекул газа и не приводящий к их смещению движением фронта кристаллизации.

Результаты исследования показывают успешность применения метода конденсации сверхзвуковых потоков разреженного пара и газа для получения газовых гидратов. Конденсация газонасыщенных слоев аморфного льда со сверхзвуковыми скоростями обеспечивала многократное повышение производительности процесса гидратообразования по сравнению с конденсацией с дозвуковыми скоростями и традиционными способами получения газовых гидратов в условиях, близких к равновесным.

Опыты с низкотемпературными конденсатами водно-метановой смеси показали возможность получения массивных образцов кристаллогидратов с высоким содержанием газа. Такой способ получения газовых гидратов

имеет существенные преимущества по сравнению с традиционными методами, в которых гидрат формируется в условиях высокого давления с необходимостью длительного и интенсивного перемешивания водно-газовой смеси.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 18-08-00352а) и программы фундаментальных исследований Уральского отделения РАН (Грант № 18-2-2-3).

*Хайрутдинов В.Ф.^{1,2}, Гумеров Ф.М.¹, Хабриев И.Ш.¹, Абдулагатов И.М.³,
Салихов И.З.¹, Фарахов М.И.²*

¹ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
420015, Казань, ул. К. Маркса, 68

² ООО «Инженерно-внедренческий центр «Инжехим»,
420049, Казань, улица Шаляпина, дом 14/83

³ Дагестанский государственный университет,
367000, Россия, Махачкала, ул. Гаджиева, д. 43-а
kvener@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ БИНАРНЫХ И ТРОЙНЫХ СИСТЕМ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Исследование фазовых равновесий термодинамических систем крайне важно для понимания механизмов протекания процессов с их участием, а также для осуществления оптимизации этих процессов и масштабирования лабораторных результатов на промышленный уровень. В данной работы нами разработана методика и оборудование (рис. 1) для исследования фазового равновесия бинарных систем. Для получения насыщенного раствора используется статическая ячейка постоянного объёма с сапфировыми окнами, а для анализа фаз – гравиметрический способ.

В работе приведены результаты исследования фазовых равновесий ранее неизученных бинарных и тройных систем: «нафталин – пропан/бутан» (рис. 2), «фенол – пропан/бутан», «ацетофенон – пропан/бутан», «сера – пропан/бутан», «вода – пропан/бутан» и «гексадекан - пропан/бутан».

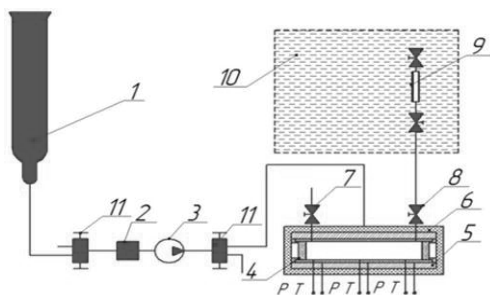


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования фазового равновесия бинарных систем: 1–баллон; 2–фильтр; 3–насос; 4–оптическая ячейка; 5 –медная рубашка; 6 – термоизоляция; 7 – вентиль для отбора верхней (газовой) фазы; 8 – вентиль для отбора нижней (жидкой) фазы; 9–пробоотборник; 10 –термостатирующая ванна; 11–вентиль

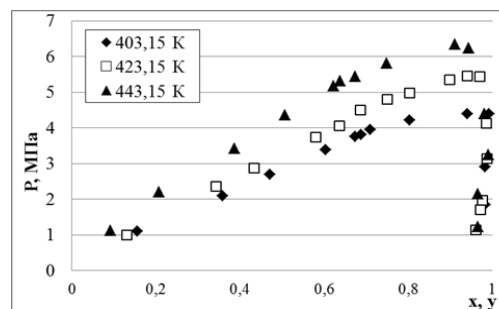


Рис. 2. Фазовое равновесие бинарной системы «нафталин - пропан/бутан»

Установлено, что фазовые диаграммы систем «нафталин – пропан/бутан», «фенол – пропан/бутан», «ацетофенон – пропан/бутан» и «гексадекан - пропан/бутан» принадлежат к фазовому поведению I типа (по классификации D.F.Williams). Характеристики фазового равновесия «жидкость – пар» для данных систем по факту представлены лишь бинодалями, в итоге формирующими некую непрерывную критическую кривую. Бинарные системы «сера – пропан/бутан» и «вода – пропан/бутан» обладают слабой взаимной растворимостью, и фазовая диаграмма этих систем относится к пятому типу диаграмм, для которых характерен разрыв критической линии раствора.

Авторы настоящего исследования выражают свою благодарность Российскому научному фонду (РНФ) за финансирование этих исследований в рамках проекта 18-19-00478.

Список литературы

1. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Zaripov Z.I., Khabriev I.Sh., Yarullin L.Yu., Abdulagatov I.M. Solubility of naphthalene in supercritical binary solvent propane+n-butane mixture, J. Supercrit. Fluids. 2020.156.

*Ходунков В.П.*¹, *Заричняк Ю.П.*²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева,
Санкт-Петербург, 190005, Московский пр., 19

² Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,
Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр., 49

ПРОБЛЕМА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР ВЫШЕ 5000 К И ГЕНЕРАЦИИ ИНТЕНСИВНОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИХ ДОСТИЖЕНИЯ

Разработка и внедрение новых высокотемпературных технологий, сложных техногенных объектов с экстремальными условиями эксплуатации неразрывно связаны с одной из их основных характеристик - термодинамической температурой. Можно уверенно прогнозировать, что ближайшем будущем станет востребован температурный контроль на уровне 5000 – 10000 К и выше, в то время как на сегодня достигнутый уровень развития современной эталонной радиационной термометрии обеспечивает верхний предел воспроизводимой температуры, равный 3473 К[1]. Соответственно, современные средства измерения температуры калибруются и применяются только до данной температуры.

Проблема воспроизведения термодинамической температуры выше 3473 К заключается в отсутствии высокостабильного источника инфракрасного излучения. В представленном докладе подробно рассматривается путь решения данной проблемы. Предлагается использовать имитатор инфракрасного излучателя, основанный на совместном применении мощной ртутно-галогеновой лампы, лазера

«суперконтинуум» и интегратора излучения. В принцип действия указанного комплекса положены достижения квантовой теории М.Планка и теории теплоемкости А.Эйнштейна, в частности – использована установленная в [2] закономерность того, что мощность лазерного излучения, измеренная квантовым детектором, при определенных условиях может быть эквивалентна мощности, падающей на приемник от Ламбертова излучателя на той же длине волны в заданном телесном угле и направлении визирования, т.е. регистрируемый сигнал квантового детектора может быть мерой мощности, или мерой спектральной энергетической яркости монохроматического излучения, т.е. - мерой термодинамической температуры.

Теоретически обоснована практическая осуществимость

предлагаемого метода воспроизведения сверхвысокой температуры с эталонной точностью. Представлено принципиальное аппаратное решение для получения генерации высокостабильного монохроматического инфракрасного излучения высокой интенсивности. Даны технические параметры устройств, обеспечивающих решение проблемы.

Важным преимуществом предлагаемого подхода к воспроизведению высоких температур является возможность обеспечения стабильной реперной температуры на длительный интервал времени (превышающий не менее, чем на порядок достигнутые длительности фазовых переходов), что значительно повышает точность калибровки бесконтактных средств измерения температуры.

Список литературы

1. ГОСТ 8.558-2009 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры».
2. **Khodunkov V. P.** Problem aspects of high temperature referral metrology // Journal of Physics: Conf. Series. 2017. V. 891. 7 P.

Tsvetkov O.B.¹, Mitropov V.V.¹, Prostorova A.O.², Laptev Yu.A.¹

¹University ITMO

Russia, 197101 St. Petersburg, Kronverkskii pr., 49

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Russia, 195251 St. Petersburg, Politehnicheskaya st., 29

THERMAL CONDUCTIVITY PREDICTION OF TRANS-1-CHLORO-3,3,3-TRIFLUOROPROPENE (R1233zd(E))

R1233zd(E), trans-1-chloro-3,3,3,-trifluoropropene, is a fluorinated propene isomer which may be considered as an alternative working fluids in the field of heat pump and organic Rankine cycle. R1233zd(E) has a much lower GWP than hydrochlorofluorocarbons (HCFC), hydrofluorocarbons (HFC) and their mixtures. In this paper an extension of a previously developed predictive methods for thermal conductivity to a new family of organic compounds, namely R1233zd(E) is considered. A study of the correlation of thermal conductivities of polyatomic gases in the limit of zero density of R1233zd(E) is presented. A theoretical correlation scheme based on the formalism. Mason-Monchik-Parker theory has been examined and found to be useful for prediction of thermal conductivity data of dilute gas.

An attempt is made in this work on the theoretical approach by Predvoditelev, Vargaftic and Filippov proposed for prediction of thermal conductivity for liquid state. The scheme has been tested against the limited amount of experimental data available and shown to be capable of reproducing the thermal

conductivities to within few percent. This predicting approach appears promising as an assist in the judgments in the area of this new generation of working fluids data studies.

Шацких Ю.В.¹, Костановский А.В.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А
shatskih_jv@mail.ru

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Проблема повышения интенсивности теплообмена является актуальной важной задачей. Особый интерес представляют методы повышения коэффициента теплоотдачи в системах охлаждения энергетического оборудования.

Последние два десятилетия перспективным направлением исследований в этой области является изучение теплообмена с применением наножидкостей. К настоящему времени отечественными и зарубежными авторами выполнен достаточно большой объем исследований. Научный поиск ведется в нескольких направлениях: выбор теплопроводного материала и базовой жидкости; исследование влияния концентрации наночастиц и их размера на интенсивность теплообмена.

Для повышения теплопроводности теплоносителя предлагают использовать как чистые металлы (Au, Cu, Fe), их оксиды (CuO, Al₂O₃, TiO₂), а также нанографен. В качестве базовой жидкости используют в основном дистиллированную воду, минеральное масло или этиленгликоль. Практически все авторы отмечают увеличение теплопроводности наножидкости в среднем до 40% по сравнению с базовой жидкостью. Концентрация наночастиц в экспериментах не превышает 3%.

Тем не менее, выполненные исследования зачастую дают результаты, существенно противоречащие теории конвективного теплообмена. Так, многие авторы отмечают, что коэффициент теплоотдачи при ламинарном режиме больше, чем при турбулентном. Убедительного объяснения этого явления пока не найдено. Также отсутствуют достоверные сведения по переносным свойствам материалов, применяемых для изготовления наножидкости, в частности мало данных по свойствам нанографена.

В докладе авторы проводят обзор выполненных исследований теплообмена с использованием наножидкости, рассматривают возможность использования нанотрубок и мультиграфена для повышения

теплопроводности теплоносителя. Также авторы анализируют существующие модели теплопереноса в наножидкостях.

Эмиров С.Н.^{1,2}, *Аливердиев А.А.*^{1,3}, *Заричняк Ю.П.*⁴, *Бейбалаев В.Д.*^{1,3},
*Алиев Р.М.*², *Амирова А.А.*⁵

¹ ИПГВЭ филиал ОИВТ РАН, 367030, Махачкала, пр. Шамиля, 39А

² Дагестанский Государственный Технический Университет,
367015, Махачкала, пр. Шамиля, 70А

³ Дагестанский Государственный Университет,
367025, Махачкала, ул. Магомеда Гаджиева 43А

⁴ Национальный исследовательский Университет информационных технологий, механики и оптики,

197101, Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, д. 49

⁵ Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН,
367003, Махачкала, ул. Ярагского 94

aliverdi@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНО-БАРИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Температурная зависимость теплопроводности диэлектриков $\lambda(T)$ весьма чувствительна к кристаллической структуре, сжимаемости и упругим постоянным. В неупорядоченных кристаллических твёрдых телах атомы занимают правильное положение в узлах кристаллической решётки, но порядок расположения атомов различных сортов не соблюдается. Помимо этого, значительное влияние на величину λ эффективной теплопроводности оказывают границы блоков и дефекты кристаллической решётки. Все это в многокомпонентных структурах со сложной и вариативной упорядоченностью приводит к сложному характеру процесса теплопереноса. Тем не менее, в общем случае, как показано в наших недавних публикациях (см., например, [1]), температурная зависимость большинства естественных и искусственных композитных материалов достаточно хорошо описывается степенным законом $\lambda(T) \sim T^n$, где n лежит в пределах $[-1, 0.5]$.

При построении барических зависимостей композитных материалов, к которым относятся и горные породы, обычно используют линейную аппроксимацию после некоторого давления (~ 100 МПа) и в отрыве от температурной зависимости. Несмотря на удовлетворительное согласие при достаточно высоких давлениях, это может быть не совсем адекватно при рассмотрении тепловых процессов, протекающих в широком диапазоне давлений, включающем начальную (околонулевою) область.

Построению модели теплопроводности горных пород и композитных материалов в области 0-400 МПа на основе анализа экспериментальных зависимостей и посвящена настоящая работа.

Измерения в области температур 273-523 К и давления от 0.1 до 400 МПа проводились абсолютным стационарным методом, погрешность которого не превышала 3-4%. Применяя степенной закон как к переменной (T), так и для фиксированной (T_0) температурам, в описании температурно-барической зависимости теплопроводности мы перешли к безразмерным величинам, получив следующее уравнение

$$\lambda(T, P) = \lambda(T_0, 0) \cdot (1 + \delta_{T_0}(P)) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{n_0(1-\nu(P))}.$$

Такое представление позволяет выделить всего две опорные величины $n_0 = n(0)$ и $\lambda(T_0, 0)$, и две безразмерные барические функции $\nu(P)$ и $\delta_{T_0}(P)$. Обе величины обычно хорошо описываются двухпараметрическими выражениями, что обсуждается в докладе. Таким образом, получить малопараметрическое описание температурно-барической зависимости теплопроводности большинства исследованных композитных материалов, в частности, таких горных пород, как граниты, песчаники и др. Удалось показать, что давление влияет на температурную зависимость их эффективной теплопроводности.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 20-08-00319 А и 18-08-00059 А).

Список литературы

1. Эмиров С.Н., Бейбалаев В.Д., Рамазанова А.Э., Давудов И.А., Амирова А.А., и Аливердиев А. О температурных и барических закономерностях изменения теплопроводности композитных материалов // Известия РАН, Серия Физическая. 2018. Т. 82. № 7. С. 142–145.

Секция 4
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ
И ТЕПЛОТЕХНИК

Александровский А.Ю.¹, Клименко В.В.¹, Волков Д.М., Солдаткин А.Ю.¹,
Терешин А.Г.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
ayaleksand@mail.ru

СНИЖЕНИЕ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЭС НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Цель настоящей работы – поиск путей снижения выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов при сжигании топлива на ТЭС, работающих в энергосистемах с крупными ГЭС, за счет оптимизации работы последних в условиях внешних и внутренних ограничений.

Задачи:

- 1) оценка технических и технологических ограничений на разгрузку ТЭС;
- 2) оценка режимных ограничений работы ГЭС со стороны энергосистем и водопользователей;
- 3) обоснование режимов работы ГЭС, минимизирующих участие ТЭС в покрытии нагрузки;
- 4) оценка экологического эффекта (снижение выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в энергосистемах при максимальной выработке ГЭС)

Оценки снижения выработки ГЭС за счет ограничений водопользователей и энергосистем выполнены с использованием программного комплекса «Каскад» на примере Волжско-Камского каскада (ВКК – ОЭС Центра, С.Волги, Урала и Юга) и Ангаро-Енисейского каскада ГЭС (АЕК – ОЭС Сибири).

Таблица 1. Снижение выработки электроэнергии на ГЭС ВКК и АЕК dE за счет различных причин, соответствующие изменения расхода органического топлива на ТЭС dB , выбросов вредных веществ dV и диоксида углерода dC в атмосферу

Каскад ГЭС	Причины снижения выработки ГЭС	dE , млн. кВтч	dB , тыс. т у.т.	dV , тыс. т	dC , тыс. т
ВКК	Русловые деформации	390	119	1	184
	Непроектные уровни водохранилищ	2700	821	4	1271
АЕК	Системные ограничения выдачи мощности	4200	1465	36	3633
	Устаревание оборудования	1500	523	13	1298
ИТОГО		8790	2929	53	6385

Для уменьшения потерь выработки электроэнергии на ГЭС необходимо рассмотреть возможность выполнения следующих мероприятий:

- 1) подъем уровней водохранилищ (Чебоксарской и Нижнекамской ГЭС) до проектных отметок;
- 2) строительство ЛЭП для выдачи мощности ГЭС в ОЭС в современных условиях;
- 3) корректировка ПИВР с учетом современных требований энергосистем и водопользователей;
- 4) модернизация оборудования ГЭС.

Выводы

- 1) Снижение выработки ГЭС за счет ограничений со стороны водопользователей и энергосистем приводит к увеличению производства электроэнергии на ТЭС с соответствующим ростом выбросов в атмосферу вредных веществ и парниковых газов
- 2) Основными причинами уменьшения выработки ГЭС являются системные ограничения (изменение конфигурации потребителей мощности, недостаток связей) и снижение показателей работы по сравнению с проектными (руслонные деформации, износ оборудования, несовершенство ПИВР и др.)
- 3) Реализация мероприятий по повышению эффективности использования ГЭС (строительство новых ЛЭП, наполнение водохранилищ до проектных отметок, модернизация оборудования, совершенствование ПИВР) способно сэкономить ежегодно почти 3 млн. т у.т. органического топлива и снизить выбросы в атмосферу при его сжигании вредных веществ более чем на 50 тыс. т/год и углекислого газа – более чем на 6 млн. т/год

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в части теплоэнергетических расчетов (грант № 18-08-00026) и РНФ в части гидроэнергетических расчетов (грант № 18-19-00662).

Андреев Ю.В.¹, Греков М.А.², Проскурин В.М.², Новикова О.В.²

¹ Правительство Ленинградской области

191311, Санкт-Петербург, Суворовский проспект, 67

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29

novikova-olga1970@yandex.ru

НАДЕЖНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

В настоящее время система теплоснабжения России находится на этапе не только организационных, но и технологических изменений. Любые решения основаны на определении приоритетных критериев.

Целью исследования является формирование комплекса организационно-технических решений по повышению эффективности производства и поставки теплоты конечным потребителям с учетом критерия, который будет определен как основной для конкретной системы. Текущая технико-экономическая эффективность подсистемы «генерация» зависит от состояния основного генерирующего оборудования, степени его загрузки, а также от эффективности распределения тепловой нагрузки между источниками; «транспортировка» зависит от состояния тепловых сетей и степени их загрузки; «потребление» зависит от состояния тепловой защиты зданий, потерь у потребителей, а также степени автоматизации индивидуальных тепловых пунктов.

Критериями могут быть:

1. Минимум времени на обновление основных фондов: важен в условиях нарушения качества теплоснабжения. Однако, исследования не подтвердили наличия существенных нарушений;

2. Минимальные переменные издержки: сказывается на формирование тарифа для населения и цены для промышленного потребителя;

3. Минимальные потери при передаче по сетям: для большинства систем определяется по нормативу, а не по фактическим замерам на участках тепловых сетей. Имеет значение радиус эффективного теплоснабжения и пересмотр не только технологии производства, но и размещения объектов и их мощность. Однако подтверждение этой версии требует внедрения системы мониторинга состояния тепловых сетей. Например, на основе оптоволокна. Это может привести к развитию распределенной теплоэнергетики на уровне домовых котельных;

4. Экономическая и бюджетная эффективность с учетом различных вариантов решения по финансированию проектов.

Тарифы на тепло для населения Ленинградской области существенно зависят от эксплуатирующей организации и схемы подключения. Большинство муниципальных районов обеспечивают теплоснабжение от газовых и газо-мазутных котельных. Структура топливного баланса подтверждает, что 83% потребности в топливе котельных ЛО обеспечивается за счет природного газа. Уже около 10 % в балансе – это биотопливо (опилки). Отсюда формируются варианты технологических решений, связанных с использованием современных газовых котлов и местных видов топлива. Природа формирования технических решений на основе биотоплива в основном обусловлена наличием существенных объемов деревопереработки в ЛО. Однако на данный момент изменений в сторону применения отходов другого происхождения не представляет интереса с экономической точки зрения. Экологический аспект данного вопроса еще может изменить топливный баланс.

Результаты исследований показали наличие потенциала по повышению надежности и эффективности систем теплоснабжения в части генерации путем использования современных газовых котлов и развития системы мониторинга тепловых сетей распределенной энергетики, приближенной к конечному потребителю.

Список литературы

1. Отчет о выполнении работ по теме: разработка схемы и программы развития электроэнергетики ленинградской области на 2017-2021 годы (в части теплоснабжения)
2. К.Р. Карлов, С.А. Байбаков. Необходимость текущего контроля параметров режимов и состояния трубопроводов тепловых сетей: https://www.rosteplo.ru/tech_stat/stat_shablon.php?id=3001. Дата обращения 14.01.2020

*Андрюшин А.В., Аракелян Э.К., Неклюдов А.В., Ягунова Ю.Ю.,
Кузнецова А.В.*

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
AndriushinAV@mpei.ru

УЧЁТ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ЦИКЛА ПРИ ПОСТРОЕНИИ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЭЦ

Определение оптимального режима работы оборудования – важная задача современной энергетики. В составяющие дохода тепловой электрической станции входят: доход от продажи электроэнергии на рынке на сутки вперед и балансирующем рынке, от продажи тепла, а также от продажи электроэнергии по регулируемым договорам. Маржинальная прибыль определяется как разница между доходом и расходом. Из-за высокой волатильности цен на рынке электроэнергии возникает потребность в регулярном планировании режимов работы оборудования станции, также формируются ограничения на время выполнения оптимизации. Доход и расход от продажи электроэнергии и тепла является основным оптимизируемым параметром для максимизации маржинальной прибыли электростанции. При планировании режимов эксплуатации тепловых электрических станций (ТЭС) в краткосрочной перспективе (от нескольких часов до нескольких недель) обычно учитываются следующие требования: производство и распределение между генерирующими единицами заданного количества электроэнергии, отпуск заданной мощности в соответствии с плановым графиком для каждой группы точек поставки генерации, отпуск тепла внешним потребителям в соответствии с плановым графиком поставки тепла. Учёт отпуска тепла внешним потребителям позволяет более детально рассмотреть влияние объёма тепловых отборов на область допустимых нагрузок генерирующих единиц. В данной статье уделено особое внимание оптимизации режимов работы оборудования с учётом объёмов тепловых отборов с генерирующих единиц.

Аракелян Э.К.¹, Пащенко Ф.Ф.², Косой А.А.¹, Андриюшин А.В.¹, Мезин С.В.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Институт проблем управления РАН,

117697, Москва, ул. Профсоюзная, 65

ArakelianEK@mpei.ru

СИНТЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

При синтезе автоматических систем регулирования (АСР) построение математической модели сложного многофакторного технологического процесса, которая позволит учесть всю необходимую входную информацию с учетом ее возможной неточности, неопределенности, неполноты и при этом получить на выходе из регулятора результат в форме управляющего воздействия, адекватного текущей ситуации в технологическом процессе, проблематично. Сложность реальных технологических процессов обуславливает поиск нетрадиционных методов построения их математических моделей и оптимизации управления ими. При этом очень важен не только аспект оптимального управления, но и аспект анализа текущего состояния процесса, поскольку именно вывод о текущем состоянии процесса позволяет выбрать оптимальное в данной ситуации управление. Так, например, АСР «топливо-воздух» в энергетическом котле регулирует количество подаваемого в топку котла воздуха в зависимости от расхода топлива, но в его функции по положению не входит оптимизацию этого соотношения в зависимости от текущего элементного состава топлива или качества процесса горения топлива и других факторов., Это приводит к тому, что при наличии только базовой АСР оператор вынужден выполнять функции обслуживания не только агрегата, но и протекающего в нем процесса, но при этом он действует интуитивно, либо не располагая необходимой информацией, либо не имея возможности оценить достоверность имеющейся информации. Кроме того, при быстротекущих технологических процессах оператор физически не в состоянии принимать оптимальное решение. Интеллектуальная система автоматического регулирования (ИАСР) в таких ситуациях может быть использована для трудновыполнимых оператором функций, с целью значительного повышения качества регулирования, но при этом базовая АСР продолжает выполнение основных своих функций с поправками, вносимыми интеллектуальной надстройкой. Таким образом, ИАСР — это система, которая использует базовую систему регулирования как источника входной информации и позволяет на основе технологий

искусственного интеллекта построить модель процесса, проанализировать текущее состояние процесса по разработанной модели и на основании этого решить задачу оптимального регулирования заданным процессом в текущий момент времени. В докладе рассматривается проблема, связанная с проектированием интеллектуальных систем регулирования сложными технологическими процессами на основе использования технологии экспертных систем.

Исследование выполняется с поддержкой РФФ, грант № 19-19-00601.

Аракелян Э.К., Евсеев К.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
kirillevseyev@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА К ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АСУТП

Интеллектуальная автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП) представляет многоуровневую структуру управления технологическими процессами - распределённую АСУТП, включающую три уровня управления: агрегатный, блочный и станционный. Поскольку в такой системе управления необходимо оперировать данными единого информационного поля, то с целью повышения эффективности управления технологическими процессами производства важно обеспечить оптимальное направление информационных потоков, заключающееся в оптимизации распределения каналов связи, как логических, так и физических, на каждом уровне интегрированной АСУТП.

В интеллектуальной АСУТП происходит отделение задач низкого уровня, отвечающего за обработку задания, от задач более высоких уровней, на которых определяются оптимальные параметры работы объекта в соответствии с установленными критериями, исходя из поставленной стратегической задачи станции, связанной с её выходом на рынок. Таким образом, чтобы поставленные на станционном уровне стратегические цели были достигнуты, следует решить задачи оптимального управления генерирующим оборудованием на блочном и оптимизации регулируемых параметров на агрегатных уровнях. В свою очередь, показатели работы оборудования необходимы быть переданы на верхний уровень в качестве обратной связи.

Таким образом, для анализа потоков данных в интеллектуальной АСУТП предлагается рассматривать каждый уровень в качестве среза, содержащего определённые данные, обеспечивающие логику процесса на

этом уровне, превращая информационное поле каждого из уровней в подобие объекта по типу «чёрного» ящика, обеспечивая для смежных уровней возможность доступа только к векторам входных и выходных данных. Таким образом, в нисходящем и восходящем информационном потоке создаётся цепочка из информационных единиц - происходит последовательное преобразование сигналов.

Для решения поставленной задачи рационально построить модель информационного поля рассматриваемой системы с применением подхода объектно-ориентированного программирования (ООП). ООП позволяет представить изучаемую систему в виде совокупности объектов, идентичных или наделённых разными свойствами, определить отношения между ними. С помощью представленного подхода возможно описать общую структуру информационного поля рассматриваемой АСУТП, абстрагировав её от конкретной реализации передачи данных, ограничиваясь связыванием информационных единиц системы.

Подобное представление информационных потоков в системе позволяет поставить задачу оптимизации информационных потоков с помощью решения задачи нахождения оптимального маршрута с помощью графов; обусловив дополнительные требования можно привести полученный граф к взвешенному. Особенности разработанной модели является её гибкость и простота; позволяет отобразить информационные потоки любой сложности и объёма, обеспечивая возможность их прослеживания на каждом уровне системы. Исследование проводится при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-19-00601.

Список литературы

1. **Аракелян Э.К.** Проблемы современных автоматизированных систем управления технологическим процессом на базе программно-технических комплексов и возможный путь их решения / Аракелян Э.К., Васильев Е.Д., Хуршудян С.Р. // Вестник Московского энергетического института, 2014. С. - 15-20.
2. **Matt Weisfeld.** The object oriented thought process / Matt Weisfeld.- Addison-Wesley Professional, 2013, p. 336.

*Аракелян Э.К.¹, Евсеев К.В.^{1,2}, Болдырев И.А.², Султанов М.М.²,
Юров В.А.²*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Волжский, 404110, проспект Ленина, 69
kirillevseyev@gmail.com

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЁТА ТЭП ГЕНЕРИРУЮЩИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Расчёт технико-экономических показателей (ТЭП) даёт информацию, необходимую для обеспечения наиболее экономичной эксплуатации оборудования, прогнозирования его ремонта, оценки качества работы эксплуатационного персонала и проведения наладочных и эксплуатационных испытаний. Расчёт оперативных ТЭП производится, как правило, периодически, с постоянным временным интервалом, и потому важно учитывать изменение исходных параметров за расчётный период [1].

Для проведения расчётов и оценки технологических параметров объекта на предприятии на верхнем уровне ПТК применяются расчётные станции – прикладное программное обеспечение, имеющее доступ к архивным данным. Современные расчётные станции предоставляют широкий набор инструментов для реализации требуемых алгоритмов расчёта, однако к недостаткам существующих решений можно отнести ограниченные возможности для прогнозирования значений исходных и итоговых параметров.

В процессе расчёта происходят преобразования данных на основе принимаемых на вход значений аргументов, при этом в ходе выполнения расчётной задачи количество таких преобразований может быть существенным, что затрудняет проведение аналитической систематизации величин, влияющих на конечный результат. Предлагается ввести представление преобразования параметров при выполнении расчётной задачи в виде графов, что позволит с различной детализацией выявить величины, оказывающие наибольшее влияние на выходные параметры - результаты расчёта, и, в конечном итоге, позволит реализовать модели прогностической оптимизации ТЭП [2].

Применение предложенных методов машинного обучения в расчётных станциях позволит автоматизировать задачу выявления входных сигналов, оказывающих наибольшее влияние на результат, и прогнозирования его значения, на основе решения задачи регрессии с большим количеством переменных [3]. Связанная структура

преобразования информации способствует детальному представлению потоков данных при расчётах. Такой подход к анализу факторов, влияющих на результаты, может способствовать повышению точности расчёта ТЭП. Исследование проводится с финансовой поддержкой РФФ, грант № 19-19-00601.

Список литературы

1. **Аракелян Э.К.** Проблемы современных автоматизированных систем управления технологическим процессом на базе программно-технических комплексов и возможный путь их решения / Аракелян Э.К., Васильев Е.Д., Хуршудян С.Р. // Вестник Московского энергетического института, 2014. С. - 15-20.
2. **Matt Weisfeld.** The object oriented thought process / Matt Weisfeld.- Addison-Wesley Professional, 2013, p. 336.
3. **Simon Haykin.** Neural Networks and Learning Machines.– Pearson, 2008, 936 p.

Аронсон К.Э.¹, Брезгин Д.В.¹, Брезгин В.И.¹, Мурманский И.Б.¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, 620002, Мира, 19
k.e.aronson@urfu.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОПЕРАЦИЙ ПУСКА- ОСТАНОВА

Операция пуска-останова паросилового энергоблока является важнейшим этапом жизненного цикла основного теплоэнергетического оборудования ТЭС, определяющим надежность его работы и остаточный ресурс. Нормативные документы, регламентирующие оценку качества операций пуск-останов, определяют более 60 основных и дополнительных критериев качества данных операций [1].

Авторами разработан программный комплекс для анализа операций пуска-останова энергоблока [2], позволяющий проводить в автоматизированном постоперативном режиме обработку данных АСУ ТП, представлять результаты в стандартизированных отчетах и сохранять результаты обработки мгновенных значений параметров. Программа формирует массивы осредненных на минутном интервале значений параметров. Эти значения получены интегрированием по времени мгновенных значений из АСУ ТП. Из минутных значений параметров рассчитываются отдельные показатели (критерии) разности, скорости изменения температур, длительности превышения параметров и показателей сверх нормируемых величин, время возникновения нарушения. Дополнительный анализ позволяет определить причины

возникновения нарушений. Опыт эксплуатации программного комплекса показал, что при ручном (визуальном) (с использованием данных АСУ ТП, но без автоматизированного расчета) анализе пусковых операций большинство показателей, определяющих скорости изменения параметров или резкий (в течение 10 мин) прогрев или захлаживание металла элементов оборудования, не фиксируется. Так, например, при пуске блоков мощностью 200 МВт достаточно часто имеются нарушения в части допустимой скорости изменения температуры насыщения в барабане котла, скорости изменения температуры свежего пара и пара горячего промпрегрева перед турбиной, разности температур стенок корпусов стопорных клапанов ЦВД, разности температур фланца и шпилек ЦСД, разности температур пара в паропроводах горячего промпрегрева (ГПП), длительного, в течение 10 минут, превышения температуры пара высокого давления за котлом и др. Длительность выхода параметров за пределы нормативных значений составляет от 14 до 220 минут. При анализе пуска в ручном режиме зафиксированы нарушения только вибрационных параметров (в программе данное нарушение также зафиксировано) при переходе ротора турбины через критические обороты. Программа позволяет также обобщать выявленные нарушения по всем энергоблокам ТЭС. При останове энергоблока частые нарушения связаны с длительным превышением допустимой скорости изменения температуры в барабане котла, скорости изменения температуры свежего пара и ГПП перед турбиной.

За год эксплуатации программного комплекса собрана информация о более чем 50 пусках-остановах энергоблоков. Эти данные, а также информация о повреждениях оборудования энергоблоков из ремонтной документации ТЭС позволяет разработать экспертную систему для оценки влияния каждого из определяемых показателей на дефекты элементов энергооборудования: ротора, стопорных клапанов, шпилек ЦВД, паровпуска ЦВД и ЦСД турбины и др., барабана, ширмового и конвективного пароперегревателя котла и др.; главных паропроводов. В экспертной системе приведены вероятности возникновения дефектов при наличии выявленного нарушения операций пуска-останова. Результирующая вероятность возможного дефекта определяется как сумма вероятностей для каждого из отмеченных нарушений. В настоящее время разрабатывается методика оценки длительности превышения значений показателей на исчерпание ресурса элементов оборудования.

Список литературы

1. Руководящие указания по анализу качества пуска (останова) основного теплоэнергетического оборудования ТЭС. РД 153-34.0-20.585-00. М.: ОРГРЭС, 2000. 48 с.
2. Программный комплекс «Анализ пусков и остановов энергоблоков» (ПК «Анализ пусков и остановов»). Свидетельство о государственной

регистрации программы для ЭВМ № 2019612965 / Аронсон К.Э., Брезгин В.И., Брезгин Д.В., Панова Т.В. // Заявка № 20156185492. Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05.03.2019 // Опубликовано 05.03.2019. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам «Программы для ЭВМ. Базы данных. Типология интегральных микросхем». 2019. № 3. С. 1.

Афанасов Я.В.

Публичное акционерное общество «КАДВИ»,
248021 Калуга, Московская, 247
xoncu@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КС КОНВЕРТИРОВАННОГО МАЛОРАЗМЕРНОГО ГТД

Конвертация и модернизация газотурбинного двигателя сопряжена с решением ряда задач, одной из которых является разработка КС для работы на различном газообразном топливе. Сложность решения поставленной задачи, сопряжена с многообразием взаимосвязанных процессов, происходящих в КС, которые являются сложными и недостаточно изученными. Работа над КС ГТД малого типоразмера, ещё более осложняется отсутствием общепринятой и глубоко проработанной методике доводки, характерной для больших газотурбинных двигателей, что подчёркивается как в отечественных работах, так и в зарубежных [2].

В докладе рассмотрены основные подходы к классификации размерности камер сгорания газотурбинных двигателей [1] по различным критериям, а именно:

- 1) По мощностному типоразмеру (согласно ЦИАМ)
- 2) Классификация по приведённому расходу воздуха через компрессор

Входящие в классификации критерии проанализированы, применительно к реализованным конструкциям, выбрана наиболее объективная классификация для дальнейшего рассмотрения вопроса проектирования камеры сгорания малоразмерного газотурбинного двигателя при переводе его на газообразное топливо.

Рассмотрены особенности и технические ограничения перевода камеры сгорания с жидкого на газообразное топливо, что является актуальной задачей на фоне программ газификации топливно-энергетического комплекса в РФ.

Уделено внимание факторам, оказывающим наибольшее влияние на экологические характеристики конвертируемых камер сгорания.

Список литературы

1. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД / Ланский А.М., Лукачев С.В., Матвеев С.Г. Самара: изд-во СНЦ РАН, 2009 – 335 с.15-17.

2. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Испытательный стенд для исследования процессов и доводки низкоэмиссионных камер сгорания // Самара: Вестник СГАУ №3 (41) 2013 г. - с. 131-137.

Барбин Н.М.¹, Кобелев А.М.¹, Терентьев Д.И.¹, Алексеев С.Г.²

¹ Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС
России,

Екатеринбург, 620062, Мира, 22

² Уральский научно-исследовательский институт ВДПО,
620137, Екатеринбург, Учителей, 32

nmbarbin@mail.ru

ПЕРЕРАБОТКА РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫМ СПОСОБОМ

Одно из основных преимуществ атомной энергетики – ее относительная низкая стоимость. Однако в стоимость эксплуатации не закладываются затраты на исследования, аварийные затраты, расходы на вывод из эксплуатации реакторов, хранение ядерных отходов.

Среди всей массы ядерных отходов облученный реакторный графит занимает особое место, так как несет потенциальную опасность людям и окружающей среде.

В одном энергоблоке атомной электростанции РБМК содержится 1850 тонн реакторного графита. После дезинтегрирующей электрохимической переработки графитовых блоков РБМК-1000 с удалением наиболее радиоактивного слоя толщиной 1мм можно произвести около $1,5 \cdot 10^6$ м³ генераторного газа [1, 2].

Коэффициент разбавления остаточной удельной радиоактивности при переходе радиоактивного вещества из твердого состояния в газообразное пропорционален отношению соответствующих плотностей с учетом массовой доли радиоактивного элемента в молекуле газа [1, 2].

При условии, что плотность реакторных марок графита в среднем равна $1,7$ г/см³, а плотность окиси углерода при нормальных условиях равна $1,25$ г/л, то коэффициент разбавления остаточной удельной радиоактивности будет равен 3170. Таким образом, остаточная удельная радиоактивность генераторного газа будет в 3170 раз меньше радиоактивности сжигаемого реакторного графита. Содержание золы при этом не будет превышать $0,2 \cdot 10^{-3}$ %, это значит, что горючий газ будет являться экологически чистым продуктом. Допустимая концентрация углерода-14 в 1 г реакторного графита составит $7 \cdot 10^{-3}$ Ки/л. Данная активность является безопасной для окружающей среды [1, 2].

Цель газогенераторной переработки реакторного графита – получение искусственных горючих газов в результате неполного сгорания углеродосодержащих веществ [1]. Газогенераторный процесс осуществляется при температуре не ниже 500 °С [2].

Целью работы является определение равновесного состава газовой фазы при взаимодействии радиоактивного графита с парами воды в диапазоне температур от 773 до 3273 К. Расчет состава равновесной газовой фазы системы радиоактивный графит – пары воды реализован с помощью программы TERRA [3].

Равновесный состав газовой фазы приведен на рисунке 1. При температуре выше 2973 К основные компоненты газовой фазы – H₂O (p~0,22 атм.), H₂ (p~0,29 атм.), CO (p~0,27 атм.), CO₂ (p~0,02 атм.), H (p~0,12 атм.), OH (p~0,03 атм.), O₂ (p~0,002 атм.), O (p~0,009 атм.), HO₂ (p~3,5·10⁻⁶ атм.), CHO (p~2,3·10⁻⁶ атм.).

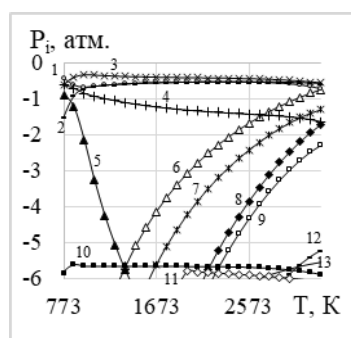


Рис. 1. Состав газовой фазы: 1 — H₂O; 2 — CO; 3 — H₂; 4 — CO₂; 5 — CH₄; 6 — H; 7 — OH; 8 — O; 9 — O₂; 10 — HCl; 11 — UO₃; 12 — HO₂; 13 — CHO.

Список литературы

1. Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация: учебное пособие для вузов / М.А. Скачек.; М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 552 с.
2. Проблемы снятия с эксплуатации энергоблоков первой очереди Белоярской АЭС: [Сб. науч. трудов]. Екатеринбург: УрО РАН, 1994.
3. Барбин Н.М., Кобелев А.М., Терентьев Д. И., Алексеев С.Г. Термодинамическое моделирование термических процессов с участием радионуклидов хлора, кальция, бериллия, никеля, цезия при нагреве радиоактивного графита в парах воды // Радиохимия. 2019. Т. 61. №2. С. 142—147.

Бахин А.Н., Беспечалов Б.Н., Вишневский В.Ю., Дрожжсин И.В., Зайцев Д.А., Киселев Д.С., Козлов В.В., Котов А.Ю., Репников В.М.

ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»

Подольск, 142103, Железнодорожная, 24

СРАВНЕНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ UO₂ И U,Zr(C,N)

Создание энергонапряженных ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) требует использования эффективного вида ядерного топлива, способного в процессе эксплуатации выдерживать разнообразные воздействия

нейтронных полей, высоких температур, термических напряжений. Качественно новый этап в развитии ЯЭУ невозможен без перехода к более плотным по урану и отличающимся более высокими теплофизическими свойствами топливным материалам. Уран-циркониевый карбонитрид $U,Zr(C,N)$ практически по всем теплофизическим параметрам превосходит диоксид урана [1]. Однако его характеристики являются недостаточно изученными. Данные о термохимической стабильности уран-циркониевого карбонитридного топлива имеют важное значение для определения его эксплуатационных характеристик в экстремальных условиях, а также представляет интерес его сравнение с диоксидом урана.

С целью исследования изменения термохимических характеристик топливных композиций $U,Zr(C,N)$ и UO_2 проведены высокотемпературные отжиги в ампулах. Для чистоты сравнительного анализа отжиги проводили одновременно в разных ампулах, разместив их параллельно друг другу на одной высоте внутри тепловой зоны. Для оценки процесса массопереноса продуктов испарения топлива в условиях имитации осевого градиента температур в ампулы над топливными таблетками были установлены вольфрамовые пластины с нанесенными через 10 мм рисками для удобства фрагментирования пластин при последующем рентгеноструктурном анализе.

В работе представлены результаты высокотемпературного отжига $U,Zr(C,N)$ и UO_2 . В частности, представлены данные об изменении геометрических размеров таблеток, массы, плотности и микротвердости. Приведены результаты рентгеноструктурных и микроструктурных исследований. Проведены оценка термохимической стабильности $U,Zr(C,N)$ и сравнительный анализ полученных результатов.

Результаты исследования термохимической стабильности топлива $U,Zr(C,N)$ после высокотемпературных отжигов в ампулах показали, что изменения массы уран-циркониевого карбонитридного топлива в объеме ампулы не обнаружено.

В параллельных испытаниях диоксидных таблеток зафиксирован процесс испарения – конденсации UO_2 и газотранспортный обмен $W-UO_2$.

Список литературы

1. Ядерное топливо с покрытием /В.А. Зайцев, П.А. Зайцев; М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. 240 с. ISBN 978-594836-501-5

Белобородов С.С.¹, Дудолин А.А.²

¹Некоммерческое партнёрство по содействию внедрению энергоэффективных технологий «Энергоэффективный город»
Москва, 105094, Семёновская набережная, д. 2/1, стр.1

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
DudolinAA@mpei.ru

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКИ ТЭЦ С НАИЛУЧШИМИ ДОСТУПНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ РАЗДЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ТЕПЛА

Развитие когенерации признано приоритетным направлением повышения эффективности и борьбы с изменением климата [1,2]. С учётом климатических и географических особенностей развитие когенерации является основным направлением снижения выбросов парниковых газов в Российской Федерации.

Дальнейшее развитие энергетики Российской Федерации предполагается на основе использования наилучших доступных технологий (НДТ). Распоряжением Правительства РФ от 19 марта 2014 года №398-р определён «комплекс мер, направленных на отказ от использования устаревших и неэффективных технологий, переход на принципы наилучших доступных технологий и внедрение современных технологий».

При принятии стратегических решений о целевой структуре генерирующих мощностей в энергосистеме РФ, необходимо обеспечить корректное сравнение эффективности производства электрической и тепловой энергии источников комбинированной выработки и раздельного производства. При сравнении необходимо учитывать одинаковый перечень товаров и услуг, оказываемых источниками электрической и тепловой энергии, для одинаковых электрических и тепловых режимов загрузки генерирующего оборудования. Перекрёстное субсидирование искажает показатели конкурентоспособности комбинированной выработки как на оптовом, так и на розничном рынках.

В настоящее время для целей формирования государственной статистической отчётности о топливной эффективности производства и отпуска электрической и тепловой энергии применяются метод ОРГРЭС и физический метод. При использовании физического метода ТЭЦ проигрывает конкуренцию на рынке тепла, а при использовании метода ОРГРЭС – конкуренцию на рынке электроэнергии. Оба метода не могут применяться в процессах принятия стратегических решений по вопросам

формирования структуры генерирующих мощностей для электро- и теплоснабжения потребителей, так как дают ложные сигналы.

Работа ТЭЦ в режиме комбинированной выработки осуществляется в интересах электроэнергетической и теплоэнергетической систем. Конденсационная выработка ТЭЦ осуществляется по командам системного оператора в интересах обеспечения электрических режимов в электроэнергетической системе РФ.

Разработанная методика разнесения расхода топлива между производством электрической энергии и тепла обеспечивает устранение перекрёстного субсидирования, искажающего исходную информацию при принятии стратегических решений.

Выполненные расчёты показали, что комбинированная выработка ПТУ-ТЭЦ на базе паровых турбин типа Р, Т и ПТ с учётом обязательных технологических попусков пара в конденсатор имеет лучшие удельные показатели расхода топлива на выработку электрической энергии и тепла по сравнению с НДТ отдельного производства при работе в базовой части суточного графика нагрузок. Представленная в работе высокоманевренная ГТУ-ТЭЦ имеет более высокий КИТТ по сравнению с НДТ отдельного производства при работе в пиковой части суточного графика электрических нагрузок.

Список литературы

1. Directive 2004/8/EC of the European parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC
2. «Growth and responsibility in the world economy”// Summit Declaration, G-8, 7 June 2007

Белобородов С.С.¹, Дудолин А.А.²

¹Некоммерческое партнёрство по содействию внедрению энергоэффективных технологий «Энергоэффективный город»
Москва, 105094, Семёновская набережная, д. 2/1, стр.1

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
DudolinAA@mpei.ru

ПОВЫШЕНИЕ СИСТЕМНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭЦ

Развитие когенерации признано приоритетным направлением повышения эффективности и борьбы с изменением климата [1,2]. С учётом климатических и географических особенностей развитие когенерации является основным направлением снижения выбросов парниковых газов в Российской Федерации.

Минимальная стоимость энергоресурсов возможна только для эффективной, сбалансированной энергосистемы. Структура генерирующих мощностей должна соответствовать структуре потребления тепловой и электрической энергии, а их размещение на территории Российской Федерации должно приводить к снижению потребности в строительстве сетевой инфраструктуры. При проектировании развития электроэнергетической и теплоэнергетической систем необходимо рассматривать вопросы одновременной оптимизации электро- и теплоснабжения, стоимости электрической энергии и тепла для конечных потребителей, системного экологического эффекта, а также влияния строительства новой генерации на режимы работы существующих электростанций.

В работе сформулированы требования к основному оборудованию высокоманевренной (пиковой) ГТУ-ТЭЦ, обеспечивающей эффективную работу одновременно в пиковом (полупиковом) режиме по электрическому графику с ежедневными пусками/остановами и базовом режиме по тепловому графику нагрузок потребления. Расчёты, выполненные с использованием специализированной программы компании «Thermoflow», показали, что КИТТ высокоманевренной ГТУ-ТЭЦ в отопительный период составляет 80%-85%, а в летний период в аварийном режиме превышает 53%.

Маневренные характеристики ГТУ-ТЭЦ определяются параметрами газовой турбины и конструкцией водогрейного котла-утилизатора: количество пусков от 300 в год без изменения межремонтного периода; время пуска до 600 секунд (быстрый пуск до 300 секунд); расход топлива на пуск менее 30 кгут/МВт; регулировочный диапазон 100% располагаемой мощности. Существует возможность организовать серийное производство со 100% локализацией производства на территории Российской Федерации.

Общесистемный эффект от внедрения 10 ГВт высокоманевренных ГТУ-ТЭЦ в ЕЭС России (около 4% установленной мощности электростанций в ЕЭС России) составит: снятие системных ограничений на загрузку энергоблоков АЭС (летом – 6 ГВт, зимой – 4 ГВт); снижение расхода органического топлива на 19,6 млн т в год; снижение выбросов CO₂ на 55 млн тонн в год; снижение выбросов NO_x на 24,7 тысяч тонн в год. Снижение маржинальной стоимости электрической энергии на оптовом рынке (РСВ) при использовании высокоманевренных ГТУ-ТЭЦ в пиковой части суточного графика нагрузок вместо паровых турбин с давлением пара 130 ата оценивается в 188 млрд рублей в год.

Представленная в работе высокоманевренная ГТУ-ТЭЦ в режиме когенерации имеет более высокий КИТТ по сравнению с НДТ раздельного производства при работе в пиковой части суточного графика электрических нагрузок. Выполненные оценки показали снижение расхода топлива до 74,6% и выбросов NO_x до 60,8% по сравнению с раздельным производством электрической энергии и тепла.

Список литературы

1. Directive 2004/8/EC of the European parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC
2. «Growth and responsibility in the world economy”// Summit Declaration, G-8, 7 June 2007

Блинов В.Л., Зубков И.С.

ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Екатеринбург, 620002, Мира, 19
v.l.blinov@urfu.ru

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ В ГЕОМЕТРИИ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

В ближайшие десятилетия развитие мировой энергетики связаны с расширением внедрения газотурбинных технологий, в том числе работой газотурбинных установок (ГТУ) в комбинированном парогазовом цикле на тепловых электростанциях. В составе современных парогазовых установок более половины полезной мощности вырабатывается в газотурбинной части блока. При этом параметры работы ГТУ оказывают значительное влияние на надежную и эффективную работу паросилового блока. Кроме энергетики ГТУ получили широкое распространение во

многих отраслях промышленности (химическая, нефтегазовая) и на транспорте (авиация и судовой транспорт).

Рабочие характеристики ГТУ во многом зависят от технического состояния отдельных ее узлов. Одним из наиболее сложных и важных узлов ГТУ является осевой компрессор (ОК). Потребляемая ОК мощность превышает половину мощности, вырабатываемой турбиной. Она зависит от отношения давлений в цикле, КПД турбомашин, температур газа перед турбиной и воздуха перед компрессором. Большая величина мощности, потребляемая ОК, определяет важность достижения и поддержания в эксплуатации высокого КПД ОК и достаточного запаса газодинамической устойчивости, которые в первую очередь зависят от совершенства лопаточного аппарата.

В процессе эксплуатации ГТУ техническое состояние ОК и других составных узлов установки непрерывно деградирует. Вследствие эксплуатационных воздействий меняются размеры и состояние поверхности лопаток, изменяются радиальные зазоры, что приводит к изменению характеристики ОК и параметров работы ГТУ в целом. В межремонтные периоды заводы-изготовители осуществляют восстановление формы лопаточного аппарата или производят его частичную и полную замену. При этом отклонение геометрических параметров отдельных лопаток от эталонных значений после восстановления и ремонта ОК ГТУ могут также оказывать влияние на достижимый в эксплуатации уровень мощности, КПД и запаса устойчивой работы.

На сегодняшний день многие машиностроительные предприятия разрабатывают цифровые модели выпускаемого оборудования, которые можно использовать для оценки и прогнозирования изменения его характеристик. В настоящей работе представлена универсальная геометрическая модель лопатки ОК ГТУ, позволяющая учитывать изменения отдельных геометрических параметров с использованием данных о реальных отклонениях геометрической формы лопаток после эксплуатации и ремонта. С применением данной модели проведено исследование возможного влияния отклонений в геометрии лопаточного аппарата на параметры работы ОК и характеристики ГТУ в целом. Для этого последовательно вносились локальные изменения в форму лопаточного аппарата компрессора и средствами численного моделирования оценивалось изменение его характеристик. Разработанная математическая модель может использоваться при дефектации лопаток и обоснованной комплектации ОК на этапе ремонта ГТУ, а также при прогнозировании изменения параметров работы ГТУ на этапе эксплуатации.

Блинов В.Л., Комаров О.В., Зубков И.С.
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
Екатеринбург, 620002, Мира, 19
v.l.blinov@urfu.ru

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК В СОСТАВЕ ПАРОГАЗОВЫХ БЛОКОВ

В составе парогазовых установок до 70 % полезной мощности вырабатывается в газотурбинной части блока. При этом ГТУ большой мощности – сравнительно новый вид оборудования для отечественных тепловых станций. Стоит отметить, что имели место десятки случаев аварийных остановов блоков на начальных этапах их эксплуатации, в том числе с катастрофическим разрушением проточной части газовой турбины. В то же время в нефтегазовом секторе промышленности, где эксплуатируются тысячи приводных и энергетических ГТУ, накоплен более чем 50-летний опыт эксплуатации с использованием параметрических средств контроля для достижения высоких показателей надежности.

Развитая система диагностики ГТУ по термогазодинамическим параметрам позволяет в непрерывном режиме отслеживать деградацию технического состояния отдельных отсеков и газотурбинной установки в целом, а также предсказывать вероятность развития дефектов и отказа систем с целью предотвращения аварийных ситуаций.

Предлагается метод построения тепловых и газодинамических математических моделей отсеков ГТУ, который может использоваться как реальный инструмент контроля состояния оборудования. Принцип основан на отслеживании показателей технического состояния, например, осевого компрессора, газовой турбины или ГТУ в целом, и их сравнении с эталонными, заявленными производителем. Аналогичный подход использован авторами для создания моделей диагностирования нескольких типов ГТУ и верифицирован десятками экспериментов на объектах эксплуатации в газотранспортных предприятиях.

RATIONALE THE EFFECTIVENESS OF A STEPPED HEAT SUPPLY IN THE PROCESS OF THERMAL PRE-TREATMENT SOLID ORGANIC FUEL

Considerable attention is paid to improving the technology of production and consumption of energy produced on solid organic fuel in the energy industry. The existing problems of energy use of coal can be largely solved if coal dust is subjected to thermochemical treatment before combustion. Good Flammability of heat treatment products, their high calorific value and reactivity open wide possibilities for application in thermal power plants of coal pre-heat treatment process before combustion. However, the influence of modes and methods of implementation of thermal preparation of fuel on the energy efficiency of boiler units, the reliability of their operation and environmental safety require further research.

In this work, for the practical justification of the efficiency of the organization of step heat supply in the process of pre-heat treatment of solid organic fuel, a comparison of two possible options for the implementation of this process is performed. Two options were considered heat training: at a constant temperature and with a step-heating. In the first embodiment, a one-time heating of coal dust to $T_{max} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, in the second embodiment, step heating $T_1 = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_3 = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ at $T_{max} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. It is shown that in the second variant the coke residue has 2-3 times higher reactivity of the initial fuel.

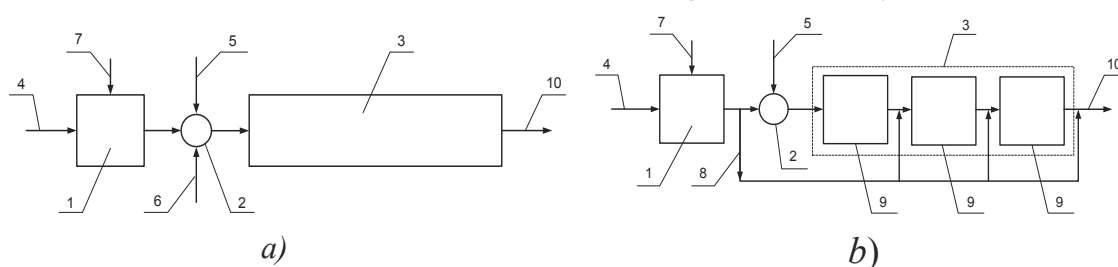


Figure 1. Design schemes of different ways of organization of the process of preliminary heat treatment of dust-like solid fuel:

a - with the supply of the total amount of heat at the beginning of the process;

b -with a step supply of heat;

- 1-the combustion chamber of the fuel to produce high-temperature combustion products;
- 2-mixer; 3-heat treatment chamber; 4-the supply of a small part of the fuel to produce high-temperature combustion products; 5-the supply of the main part of the fuel for heat treatment; 6-the supply of recirculation gases; 7-the air supply; 8-the path of combustion products for the step supply of heat; 9-the stages of thermochemical treatment;
- 10-the removal of the products of thermochemical conversion of coal.

The formulas for calculating the rates of chemical reactions, the time of the heat treatment process, the number of stages of the process are presented. The patented scheme of realization of a method and devices for the organization of step thermal preparation of dust-like fuel for combustion in the boiler plant of a thermal power plant is presented. The technological scheme and description of the installation are given.

List of references

1. Boiko E.A., Shishmarev P.V., Zhadovets E.M., Pachkovskiy S.V., Yanov S.R. The patent of the Russian Federation №2347142, cl. 7F23N 5/00. Method of controlling the mode of combustion steam plant // Bulletin №15. Published 20.02.2009.

Boiko E.A., Strashnikov A.V., Shishmarev P.V.

FSAEI HE «Siberian federal University», 660041, Krasnoyarsk,
av.Svobodniy, 79
EBoiko@sfu-kras.ru

SEMI-INDUSTRIAL EXPERIMENTAL STUDIES OF PROMISING TECHNOLOGY TO REDUCE EMISSIONS OF HARMFUL SUBSTANCES OF COAL-FIRED POWER PLANTS

The results of experimental studies of pre-heat treatment of fuel before combustion as a way to reduce emissions of harmful substances in thermal power plants are presented. The model of formation of nitrogen oxides during coal dust combustion according to the Mitchell–Tarbell kinetic scheme is presented.

To conduct full-scale fire tests were used in the experimental stand of the Department TPP SFU, capacity 150 kg/h. The technological scheme and description of the installation are given. Experimental studies were conducted on two schemes. The first is the combustion of the initial fuel, the second-with preliminary heat treatment of coal dust in the temperature range of the dust-gas mixture from 300 to 900 °C and processing time from 2.5 to 0.6 s.

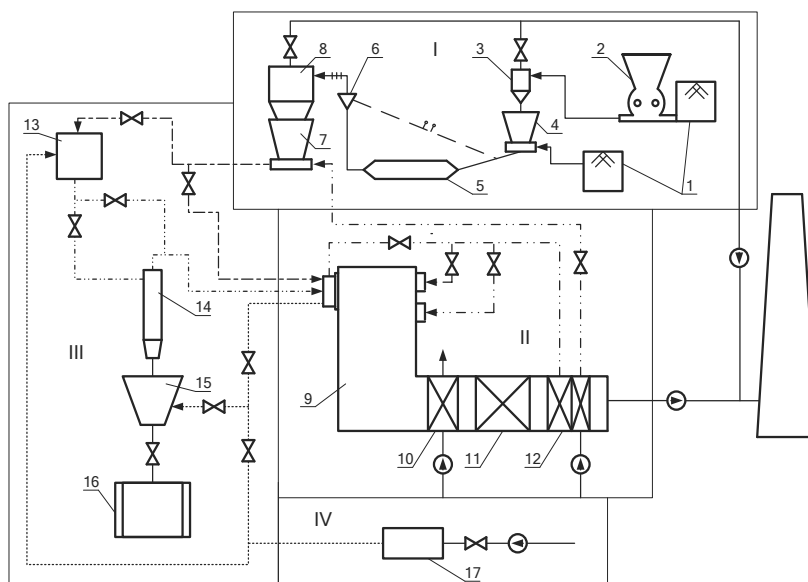


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental stand for thermal processing and combustion of solid organic fuels: I – open system of dust preparation; II – fire stand; III – installation of thermal processing of coal; IV – steam generation unit;
 1 - generator of high-temperature gaseous products; 2 - roller crusher;
 3 - crushed stone cyclone; 4 - bunker of crushed fuel; 5 - ball drum mill;
 6 - coal dust separator; 7 - intermediate coal dust bunker;
 8 - three-section baghouse filter; 9 - cyclone furnace; 10 - air and water-cooled tube bundles; 11 - experimental flue; 12 - two-stage air heater; 13 - device for thermal preparation of fuel; 14 - hot thermal coal cyclone; 15 - bunker of a hot thermal coal; 16 - thermal-hopper bunker; 17 - steam generator

The test results are presented depending on the pretreatment temperature: the proportion of fuel nitrogen, which has passed in the process of thermochemical transformation into compounds HCN, NH₃ and NO; the relative distribution of nitrogen between the HCN, NH₃ and NO, which are formed in the process of pretreatment of Berezhovskiy coal of the Kansk-Achinsk Deposit. The influence of air excess coefficient on the content of nitrogen oxides is considered. The dependence of the concentration of nitrogen oxides in combustion products on the depth of pre-heat treatment of ordinary and oxidized Berezhovskiy coal and the combustion temperature is presented.

Formulas of chemical reactions and description of the processes of formation of nitrogen oxides are given. The theoretical substantiation of the influence of conditions and modes of organization of preliminary thermal treatment of coal on reduction of emissions of nitrogen oxides during combustion of heat treatment products is stated.

List of references

1. Kotler V.R., Ryzhiy I.A. Providing norms for permissible NO_x emissions in coal-fired boilers in the USA. *Energetik*, 2016, № 5, pp. 39-40. (in Russian)
2. Zhan H., Yin X., Huang Y., Yuan H., Xie J., Wu C., Shen Z., Cao J. Comparisons of formation characteristics of NO_x precursors during pyrolysis of lignocellulosic industrial biomass wastes. *Energy and fuels*, 2017, № 9, vol. 31, pp. 9557-9567.

Болдырев И.А.¹, Султанов М.М.¹, Харитонов Н.В.¹, Беокаш А.А.¹,
Меньшиков П.Д.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Волжский, 404110, проспект Ленина, 69
boldyrev@vfmei.ru

ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ГАЗОВОГО ХОЗЯЙСТВА ТЭС НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Реализация национального проекта «Цифровая экономика» в концепции развития энергетики до 2035 года требует создания новых подходов для энергетических компаний по модернизации и внедрению программ цифровой трансформации.

Регулирование подачи природного газа на горелки энергетических котлоагрегатов, как правило, осуществляется по схемам, подразумевающим применение дорогостоящих газовых блоков с использованием быстродействующих запорных клапанов. При этом для установки газовых блоков требуется полный демонтаж используемого газового оборудования и трубопроводов, что приводит к высоким материальным и временным затратам. Также остаются схемы регулирования нагрузки котлоагрегата общим шиберным регулирующим клапаном, что в свою очередь препятствует качественному регулированию расхода газа в соответствии с необходимой тепловой нагрузкой котлоагрегата, как в растопочном, так и в рабочем режиме.

Предлагается к применению «Быстродействующий запорно-регулирующий шаровой кран» (БЗРШК) для схем газоснабжения котлоагрегатов и других газоиспользующих установок [1].

Конструктивный вариант БЗРШК с применением электромагнитной муфты в механизме расцепления валов представлен на Рис. 1. В корпусе 2 размещаются ведущий вал 1 и ведомый вал, соединенные электромагнитной муфтой 3. При расцеплении муфты производится высвобождение силовой пружины 4, которая обеспечивает поворот ведомого вала и закрытие клапана.

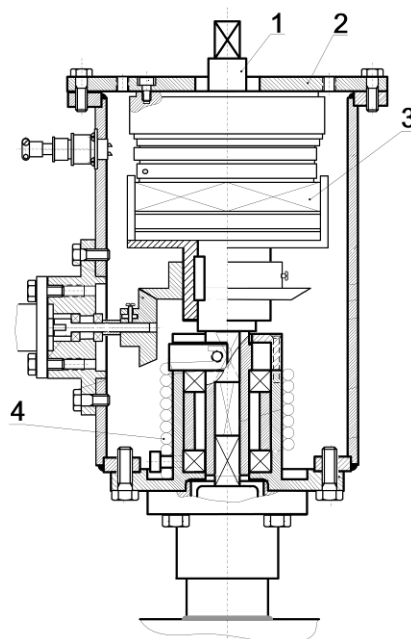


Рис. 1. Схема БЗРШК с электромагнитной муфтой.

Расходная характеристика БЗРШК имеет плавно нарастающий характер в начале открытия и приближена к линейной на основной части. Такая характеристика обеспечивает более качественное регулирование расхода природного газа, подаваемого на котлоагрегат в растопочном режиме.

В соответствии с требованиями [2] к надежности системы, коэффициент готовности ПТК должен составлять не менее 0,99 при периоде технического обслуживания в 1 месяц (приблизительно 700 часов). В результате расчетов определена вероятность безотказной работы системы с БЗРШК, равная 0,991.

Конструкция БЗРШК отличается возможностью установки устройства контроля положения запорного шарового элемента, что обеспечивает непрерывное измерение всех важных параметров работы устройства, в т.ч. показателей наработки и прогноза надежности, и позволяет реализовать переход к технологии промышленного Интернета вещей (IoT) для комплексного сбора и передачи измерительной информации и управляющих сигналов децентрализованного взаимодействия устройств между собой и внешней средой.

Проведенные механические испытания прототипа показали эффективность работы устройства и соответствие параметров требованиям нормативных документов.

Список литературы

1. Патент RU 194 386 Болдырев И.А., Харитонов Н.В., Вдовенко А.Н., Афонин А.В., Меньшиков П.Д., Беокаш А.А. Быстродействующий запорно-регулирующий шаровой кран. - Опубликовано: 09.12.2019 Бюл. № 34
2. Руководящий документ «Технические требования к подсистеме технологических защит, выполненных на базе микропроцессорной техники» РД 153-34.1-35.137-00 – М.: РАО «ЕЭС России», 2001. – 65 с.

Болдырев И.А.¹, Султанов М.М.¹, Юров В.А.¹, Горбань Ю.А.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Волжский, 404110, проспект Ленина, 69

boldyrev@vfmei.ru

КОНЦЕПЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИИУС НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО IOT ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОТСЛЕЖИВАЕМОСТИ, ЭКОНОМИЧНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ МИКРОГРИД

Для повышения качества и формирования комплексного подхода к управлению режимами работы объектов энергетических предприятий в соответствии с фактическим техническим состоянием генерирующего оборудования требуется разработка систем управления данными о режимах работы и методик оценки технического состояния энергетического оборудования.

Выделяется целый пласт проблем цифровой трансформации энергетических предприятий:

- оптимизация процессов упреждающего управления действующими энергетическими объектами;

- внедрение современных алгоритмов цифровой обработки сигналов;

- формирование систем непрерывного учета и анализа данных о техническом состоянии оборудования энергетических систем.

- внедрение технологий комплексного сбора и беспроводной передачи измерительной информации и управляющих сигналов на основе промышленного Интернета Вещей (IoT) - децентрализованного взаимодействия устройств между собой и внешней средой при решении системных задач.

Для применяемых IoT устройств в промышленности требуется выполнение условий: устойчивая работа устройств, точность и синхронизируемость, вариативность, безопасность и защищенность, быстроедействие, надежность, совместимость, масштабируемость.

Важными аспектами при разработке устройств промышленного интернета вещей являются: электронные компоненты, в т.ч. процессоры, датчики, подсистема электропитания, технологии беспроводной передачи данных.

В работе рассматриваются механизмы решения задач для построения распределенной информационно-измерительной и управляющей системы с использованием технологий промышленно IoT:

1. Проблемы при монтаже и текущем обслуживании устройств на объекте: обеспечение быстрых и точных контрольных измерений параметров; подтверждение возможности подключения устройств сбора данных; диагностика режимов работы технологического оборудования;

контроль и проверка пакетов данных, в т.ч. по спецификациям МЭК 61850.

2. Проблемы при разработке подсистемы электропитания устройств: увеличение времени работы от одного заряда, проверка целостности цепей питания и сигнальных цепей, ЭМС и соответствие спектру частот, помехозащищенность от мультимедийных соединений с разными устройствами.

3. Проблемы при разработке подсистемы беспроводной связи устройств: обеспечение возможности работы всех устройств в разных внешних условиях; поддержка различных форматов связи и максимальные возможности покрытия.

4. Проблемы при разработке всей системы связи на объекте: тестирование безопасности приложений и сетей, проверка стабильности, точности и качества работы сетей и сетевых устройств, обеспечение безопасности сети против полного набора векторов кибер-угроз.

Болнов В.А.¹, Большухин М.А.¹, Будников А.В.¹, Дмитриев С.М.², Зотова М.В.¹, Зотов И.С.¹, Петрунин В.В.¹

¹ АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения
им. И.И. Африкантова»

603074, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15

² НГТУ, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический
университет им Р.Е. Алексеева»

603950, Нижний Новгород, Минина, 24

РАЗРАБОТКА СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ДВОЙНИКОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (ЯЭУ) РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОДОВ ТРЕХМЕРНОГО РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА

Настоящее время характеризуется развитием вычислительных ресурсов и цифровых технологий. Одной из ключевых областей применения современных средств цифровизации является ядерная энергетика, где внедрение подобных методов позволяет решать следующие задачи:

- 3) снижение консерватизма, закладываемого на этапе проектирования современных ЯЭУ;
- 4) обоснование возможности внедрения перспективных режимов работы установок и оптимизация режимов работы с неполным составом оборудования;
- 5) оптимизация алгоритмов работы и надежности системы управления.

Для решения перечисленных классов задач в АО «ОКБМ Африкантов» разрабатывается технология создания суперкомпьютерных двойников ЯЭУ различного назначения.

Суперкомпьютерный двойник включает совокупность:

- 1) вычислительных программных средств, интегрированных в общей системной среде и обеспечивающих согласованный расчет трехмерной гидродинамики, тепломассопереноса нейтронной физики, электроэнергетики, виброакустических характеристик, оптимизации алгоритмов управления;
- 2) системы верифицированных исходных данных для описания поведения оборудования в проектных и аварийных режимах работы объекта;
- 3) аппаратной части, позволяющей осуществлять высокопроизводительные расчеты математических моделей с высокой степенью детализации.

На сегодняшний день разработаны ключевые элементы технологии создания суперкомпьютерных двойников. Проведена интеграция расчетных кодов отечественной разработки. Разработана трехуровневая математической модель, позволяющая на верхнем уровне учитывать эффекты неизотермических потоков течения теплоносителя, на среднем рассчитывать потоки нейтронов на ионизационные камеры и нейтронно-физические характеристики профилированных по высоте и радиусу активных зон ЯЭУ, а в рамках третьего уровня в условиях реального времени проводить отладку алгоритмов работы системы управления. На базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева и АО «ОКБМ Африкантов» создана и активно развивается уникальная лаборатория аэрогидродинамических испытаний. На основании данных, полученных в рамках проводимых там экспериментов, осуществляется верификация трехмерных кодов отечественной разработки.

В докладе представлены предпосылки создания, технология разработки на базе отечественного ПО, результаты численного моделирования, перспективы использования суперкомпьютерных двойников.

В качестве примера эффективности использования суперкомпьютерных двойников в докладе приведен анализ перспективных режимов работы ЯЭУ для атомного ледокола Ритм-200. По результатам проведенного анализа удалось обосновать повышение назначенного ресурса более чем в 2 раза при расширении диапазона работы по мощности в случае отключения оборудования первого контура

Брезгин Д.В., Аронсон К.Э.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина,

Россия, Екатеринбург, 620002, Мира, 19

[dwbrezgin@urfu.ru](mailto:dvbrezgin@urfu.ru)

ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ СОПЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРОСТРУЙНОГО ЭЖЕКТОРА

Пароструйные эжекторы широко используются в металлургии, нефтегазовой отрасли и т.д. В энергетике пароструйные эжекторы применяются для удаления неконденсирующихся газов из цикла паротурбинных установок. При очевидной простоте конструкции эжекторов, процессы в проточной части характеризуются нетривиальным взаимодействием сложных физических явлений, имеющих место в многофазных сверхзвуковых струях: скачки конденсации в рабочих соплах, взаимодействие косых ударных волн и волн расширения за срезом сопла, развитие турбулентного слоя смешения в приемной камере эжектора, возникновение второй серии ударных волн в камере смешения/диффузоре вследствие обратного градиента давления и т.д. Одним из основных конструктивных элементов пароструйного аппарата эжектора является рабочее сопло, в котором энергия давления водяного пара преобразуется в кинетическую энергию струи за счет расширения. Как правило, в виду простоты изготовления, для этого используются сопла, в которых сверхзвуковой профиль формируется расходящимся конусом с постоянным углом раскрытия 8-14 градусов (сопло Лавалья). В ракетостроении и в авиации давно известно, что подобные сопла имеют целый ряд недостатков относительно «профилированных» сопел: снижение тяги вследствие наличия радиальной составляющей

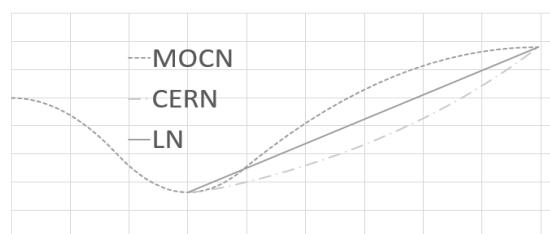


Рис. Профили сопла пароструйного эжектора

скорости, высокая вероятность отрыва пограничного слоя при больших углах раскрытия и высокой степени перерасширения потока и т.д. Однако, однозначно заключить какие сопла наиболее предпочтительны именно в контексте пароструйных эжекторов на сегодняшний момент невозможно, ведь эффективность эжекторов, определяемая коэффициентом эжекции E_r (отношение массовых расходов эжектируемого и рабочего потоков), зависит не столько от параметров потока на срезе сопла, сколько от эффективности обмена импульсами двух потоков в слое смешения, формируемом в следе за рабочим соплом.

Авторами проведено численное моделирование экспериментального пароструйного эжектора [1] с тремя различными вариантами рабочих

сопел, но характеризующихся одинаковым массовым расходом и давлением на срезе сопла (диаметры горла и среза, а также длина сверхзвукового участка идентичны для каждого из сопел). Первая конструкция представляет собой сопло Лавалья (LN), которое изначально использовалось в эксперименте [1]. Второй вариант представляет собой сопло с постоянной скоростью расширения [2], именуемое в дальнейшем CERN. Предполагается что это сопло, спроектированное с условием постоянства скорости расширения в сверхзвуковой части, позволит обеспечить одномерный поток свободный от волн расширения и сжатия, что особенно актуально в ожидаемой области начала образования жидкой фазы. Третий вариант конструкции сопла, спроектированный методом характеристик в осесимметричной постановке, именуемый в дальнейшем МОСН, фактически соответствует всем стандартам, которые применимы к соплам используемых в ракетостроении и при проектировании аэродинамических труб. На рис. приведены примерные профили, используемых в исследовании пароструйного эжектора сопел. На начальном этапе моделировались одиночные сопла при одинаковых граничных условиях. Принимая во внимание неравновесные фазовые переходы части пара, рассчитывалась скорость расширения потока, толщина вытеснения пограничного слоя, толщина потери импульса и тяга. Затем, используя подходы неравновесной термодинамики, рассчитывалась скорость генерации энтропии в проточной части сопел от вязких сил, градиентов температур и неравновесных фазовых переходов и т.д. На заключительном этапе представлены результаты моделирования пароструйного эжектора с тремя различными соплами, и по результатам которого приведена оценка эффективности работы эжектора.

Список литературы

1. G.F.L Al-Doori. Investigation of refrigeration system steam ejector performance through experiments and computational simulations. PhD dissertation thesis, University of Southern Queensland, 2013
2. J.Starzmam, F.R, Hughes, A.J. White, M.Grubel, D.M. Vogt, Numerical investigation of boundary layers in wet steam nozzles, Proceedings of ASME Turbo Expo 2016, GT2016-57598

Бураков И.А.¹, Бураков А.Ю.², Никитина И.С.¹, Аунг Х.Н.¹, Йе В.А.¹, Аунг К.М.¹, Ануфриева Е.А.¹, Лозенко В.М.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная, 14

² Общество с ограниченной ответственностью «АкваАналитика»,
117042, Москва, Бартеневская, 9 – 239

BurakovIA@mpei.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РЕСУРСОВ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ И ИНЫХ ОТРАСЛЕЙ

В связи с грядущим ужесточением экологических требований, в том числе и при эксплуатации энергетических объектов [1, 2], а также в целях более полного использования ресурсов топливно-энергетического комплекса и залежей полезных ископаемых на территории Российской Федерации (РФ) предлагается пересмотреть принципы разработки угольных месторождений и подготовки энергетических углей и иных ресурсов угольных месторождений для сжигания на тепловых электрических станциях (ТЭС).

Основными ресурсами угольных месторождений, рассмотренными в представленной работе, являются энергетический уголь и рудничный (шахтный) газ, присутствующий на большинстве угольных месторождений РФ. Газоносность угольных пластов может достигать 35 м³ в пересчёте на 1 тонну сухой беззольной угольной массы [3]. Прямое сжигание угля на ТЭС приводит к образованию большого количества выбросов веществ, негативно влияющих на окружающую среду. Основными подобными выбросами при факельном сжигании угля являются летучая зола и шлак, токсичные оксиды серы и азота, монооксид и диоксид углерода [4]. Для уменьшения количества данных веществ в уходящих газах применяются следующие технологии: системы мокрых и сухих скрубберов, организация сжигания топлива, направленная на уменьшение токсичных выбросов (в частности соединений азота), применение фильтров различного типа, для очистки дымовых газов от летучих частиц золы и шлака и т. д. [5]

Для повышения эффективности борьбы с токсичными и загрязняющими выбросами коллектив авторов предлагает совместно с применяемыми системами очистки использовать предварительную переработку твёрдого топлива в рамках эксплуатации энерготехнологического завода (ЭТЗ) [5]. Вид ЭТЗ в зависимости от задач, решаемых в рамках региона разработки может быть как двухступенчатым (включающим ступени обогащения угля и газификации, как более глубокой переработки), так и трёхступенчатым (последовательное

обогащение угля, получение из угольного концентрата искусственного композиционного жидкого топлива с последующей его газификацией).

Для реализации процессов энерготехнологической переработки и в рамках уменьшения стоков с энергетических объектов рассматривается вопрос о повторном использовании высокоминерализованных, замазученных и замасленных сточных вод ТЭС, а также повторном использовании отработанных смазочных материалов ТЭС в цикле ЭТЗ. Для повышения калорийности получаемого в цикле ЭТЗ синтетического газа рассматривается вопрос о его совместном сжигании с очищенным рудничным газом, добываемом на разрабатываемом угольном месторождении. Очистка рудничного газа осуществляется также в цикле ЭТЗ.

Список литературы

1. **А.В. Голяшев** «Экологические приоритеты для России», Аналитический центр при правительстве РФ, Москва, 2017 – 292 с.
2. «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года», Министерство энергетики РФ, Москва, 2014 – 263 с.
3. **Г.Л. Майдуков** «Комплексное использование угольных месторождений Донбасса как основа экологической безопасности и энергосбережения в регионе», «Экономический вестник Донбасса», 4, 2007, с. 12 – 19.
4. **П.В. Росляков**, Л.Е. Егорова, И.Л. Ионкин «Расчёт вредных выбросов ТЭС в атмосферу»: Учебн. Пос., 2-е изд. испр. и доп./ Под ред. П.В. Рослякова. – М.: Издательство МЭИ, 2002 г. – 84 с.
5. **Аунг Х.Н.**, Йе В.А. «Применение энерготехнологических заводов как решение экологических проблем угольной генерации Мьянмы», Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XXVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (12 – 13 марта 2020 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2020 – 1156 с., стр. 877.

*Бураков А.Ю.*¹, *Бураков И.А.*², *Никитина И.С.*², *Верховский А.Е.*²

¹ Общество с ограниченной ответственностью «АкваАналитика»,
Москва, 117042, Бартеневская, 9 – 239

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

andburakov@mail.ru

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РАССОЛОВ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ НА-КАТИОНИТНЫХ ФИЛЬТРОВ ВПУ ТЭС И АЭС НА ТЕРРИТОРИИ ЦФО

При изучении подземных вод на территории Центрального федерального округа (ЦФО) установлено, что величина минерализации подземных вод, в том числе рассолов, возрастает «сверху вниз» - по мере глубины залегания водоносного комплекса.

Возможность использования подземных природных хлоридных натриевых рассолов для целей регенерации Na-катионитных фильтров определяется двумя границами – верхней и нижней. Верхняя граница применимости рассолов контролируется величиной минерализации рассолов 165 г/дм³, то есть использовать можно рассолы с минерализацией не менее 165 г/дм³. Нижняя граница применимости рассолов определяется соотношением содержания иона натрия (в мг-экв/дм³) к общей жесткости рассола (в мг-экв/дм³), которое должно быть не менее 3,5. Помимо данных требований на возможность использования подземных природных хлоридных натриевых рассолов в качестве регенерационного раствора для Na-катионитных фильтров влияют показатели общей жесткости рассола в зависимости от общей минерализации рассола: для исключения усиления противоионного эффекта величина общей жесткости рассола не должна превышать значения 500 мг-экв/дм³ при общей минерализации 100 – 150 г/дм³, и не должна превышать значения 1500 мг-экв/дм³ при общей минерализации 250 – 300 г/дм³.

Районирование территории ЦФО, выполненное с учетом данных требований, выявило в качестве потенциальных потребителей подземных хлоридных натриевых рассолов 41 тепловую электростанцию и одну атомную электростанцию. Кроме того, на основании районирования определены водоносные комплексы содержащие подземные рассолы кондиционного качества, глубины залегания водоносных комплексов и ориентировочные глубины проектных рассолодобывающих скважин, от которых в значительной мере зависит стоимость сооружения скважин.

Список литературы

1. **А.Ю. Бураков** «Бромные хлоридные натриевые рассолы Московской области (распространение и условия формирования)», М: МГГУ, 2002.
2. **А.Ю. Бураков, И.А. Бураков** «Возможность использования подземных хлоридных натриевых рассолов на территории ЦФО для повышения эффективности энергетического оборудования ТЭС», Материалы международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики». 9-11 октября 2017 г. Т. 2. М: Издательский дом МЭИ, 2017, стр. 184-186.
3. **И.А. Бураков, А.Ю. Бураков, И.С. Никитина, С.В. Аладушкин, А.С. Илюшин** «Сравнение современных методов регенерации Натрионитовых фильтров», Материалы международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики». 9-11 октября 2017 г. Т. 2. М: Издательский дом МЭИ, 2017, стр. 186-187.
4. **И.А. Бураков, А.Ю. Бураков, И.С. Никитина, С.Д. Федорович, С.В. Аладушкин, А.С. Илюшин** «Разработка и обоснование рекомендаций по применению хлоридных натриевых подземных природных рассолов для регенерации параллельноточных натрий-катионитных фильтров», «Новое в российской электроэнергетике», №11 2018, стр. 16 – 24.
5. Каталог минеральных вод СССР. М: ЦНИИКиФ, 1969.
6. **И.А. Бураков, А.Ю. Бураков, И.С. Никитина, С.Д. Федорович, С.В. Аладушкин** «Оценка разрушения катионита в результате воздействия на него природными подземными хлоридными натриевыми рассолами», «Научные горизонты», №11 (15), Часть II, стр. 57 – 70.

Бураков И.А.¹, Бураков А.Ю.², Никитина И.С.¹, Аунг Х.Н.¹, Йе В.А.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Общество с ограниченной ответственностью «АкваАналитика»,
Москва, 117042, Бартеневская, 9 - 239
burakoviv@mpei.ru

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ИСКУССТВЕННОГО ТОПЛИВА ТЭС

Для части федеральных округов (ФО) на территории Российской Федерации (РФ) и ряда других стран (таких как Китай, Германия, США, Мьянма и т.д.) актуальным является вопрос использования угля различных стадий углификации в качестве топлива для энергетических объектов. К примеру, на территории РФ по данным на январь 2016 года из всех действующих тепловых электрических станций (ТЭС) на 32,8 % в

качестве основного энергетического топлива использовалось твёрдое топливо.

Использование угля при его прямом сжигании на ТЭС влечёт за собой проблемы экологического характера, такие как значительное загрязнение окружающей среды летучими твёрдыми частицами золы и шлака, токсичными оксидами азота и серы, оксидами углерода (монооксидом и углекислым газом).

Существуют проблемы с разработкой угольных месторождений в части негативного воздействия на окружающую среду, а именно: изменение природного ландшафта, наличие сточных вод с угольных месторождений и подобные.

Помимо экологических проблем при разработке угольных месторождений и дальнейшего использования добытого угля на ТЭС существуют проблемы полноты эксплуатации полезных ископаемых. Не секрет, что в рамках угольной генерации при современном развитии техники и технологии рудничный газ угольных месторождений может также служить топливом для энергетических объектов.

В рамках комплексного использования угольных месторождений рассматривается возможность создания угольного перерабатывающего комплекса, продукты которого могут быть использованы как на ТЭС так и на маломощных энергетических объектах. В рамках эксплуатации данного комплекса могут быть реализованы схемы энерготехнологической переработки твёрдого топлива – энерготехнологические заводы (ЭТЗ) и схемы газопереработки – газоперерабатывающие заводы (ГПЗ) рудничного газа угольных месторождений. В зависимости от вида ЭТЗ на данном комплексе могут быть реализованы технологии обогащения с получением угольных концентратов; окусковывания с получением брикетов, пелетов и гранул; получения искусственных композиционных топлив, как двухфазного, так и многофазного состава; газификации, с получением синтетического (генераторного) газа. ГПЗ должен обеспечивать увеличение концентрации метана в конечном газовом продукте и максимальное удаление молекулярного азота из извлекаемого газового топлива.

Применение подобного перерабатывающего комплекса позволит решить экологические проблемы, возникающие при эксплуатации угля в качестве энергетического топлива на ТЭС, а также обеспечит полноту использования ценных ресурсов угольных месторождений.

Список литературы

1. **И.А. Бураков**, А.Ю. Бураков, И.С. Никитина, А.А. Дудолин, Аунг Х.Н., Батсамбуу Ул., А.А. Марков, А.О. Парамонова, А.М. Хоменков «Разработка энерготехнологических заводов и оценка возможности их применения на территории Российской Федерации», «Новое в российской электроэнергетике», 2018, №12, стр. 34 – 48.

2. **И.А. Бураков**, А.Ю. Бураков, И.С. Никитина, Аунг Х.Н., Йе В.А., Е.А. Ануфриева «Оценка применения энерготехнологических заводов на территории Российской Федерации», Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и эффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Издательство Чуваш. Ун-та, 2019. – 618 с, стр. 30 – 36.

3. **И.А. Бураков**, А.Ю. Бураков, Аунг Х.Н. «Процессы получения искусственного газового топлива, как часть энерготехнологического завода», Материалы международной (XX всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения), 29 – 31 мая, 2019 года, II том «Теплоэнергетика», Иваново, стр. 131 – 133.

4. **Баяр Б.Э.**, А.А. Дудолин, И.А. Бураков, Батсамбуу Ул. «Оценки технико-экономической эффективности создания парогазовых установок с внутрицикловой газификацией для условий Монголии», «Вестник МЭИ», №4, 2019, стр. 68 – 77.

*Бураков И.А.¹, Бураков А.Ю.², Никитина И.С.¹, Аунг Х.Н.¹, Йе В.А.¹,
Ануфриева Е.А.¹*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Общество с ограниченной ответственностью «АкваАналитика»,
Москва, 117042, Бартеневская, 9 – 239
burakovia@mpei.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ПРИРОДНЫХ РАССОЛОВ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ

В рамках развития угольной генерации на территории Российской Федерации одним из важных вопросов является применение процессов обогащения для энергетических углей. Существует большое количество методов обогащения полезных ископаемых, а именно: гравитационное обогащение, флотационное обогащение, методы магнитного и электрического обогащения, а также специальные методы обогащения, из которых выделяют: радиометрический, химический и механический методы обогащения энергетических углей.

По результатам экономической оценки существующих методов обогащения коллектив авторов выделяет гравитационный метод обогащения, как метод наиболее применимый для энергетических углей в виду малой себестоимости получаемого угольного концентрата при его реализации. Из существующих методов гравитационного обогащения можно выделить обогащение в тяжёлой среде, как наиболее легко реализуемый, и опять же, наиболее дешёвый из всех существующих

методов гравитационного обогащения. В промышленности в качестве тяжёлой среды чаще всего применяют магнетитовую и водопесочную суспензии. Преимуществом применения данных тяжёлых сред является глубина процесса обогащения – выход угольного концентрата и количество извлекаемой ценной породы (горючей части топлива). Минусами является трудность в эксплуатации – суспензии требуется гомогенизировать, и загрязнение получаемого угольного концентрата частицами-утяжелителями (магнетитом, либо песком), что уменьшает количество ценной породы.

Данную проблему предлагается решить путём применения в качестве тяжёлой среды природных подземных рассолов хлоридного натриевого и хлоридного кальциевого состава. По результатам работы оценены основные показатели процессов обогащения, при использовании в качестве разделительной среды рассолов: эффективность обогащения, извлечение ценной породы и т.д. Данные показатели сравнены с аналогичными, при использовании в качестве тяжёлой среды магнетитовой и водопесочной суспензий, сделаны выводы о простоте эксплуатации подземных рассолов, а также о применении вспомогательных процессов – отмывки и сушки. Приведён ряд рекомендаций при эксплуатации природных подземных рассолов в качестве тяжёлой среды для методов гравитационного обогащения энергетических углей.

Список литературы

1. **В.М. Авдохин** «Обогащение углей»: учебник для вузов в 2 т. – М.: Издательство «Горная книга», 2012. Т. №1. «Процессы и машины» – 424 с.
2. **В.М. Авдохин** «Обогащение углей»: учебник для вузов в 2 т. – М.: Издательство «Горная книга», 2012. Т. №2. «Технологии» – 475 с.
3. **И.А. Бураков**, Н.А. Брагина, Е.А. Ануфриева «Разработка схемы подготовки твёрдого топлива с применением процессов обогащения и брикетирования угля», Материалы международной (XX всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения), 29 – 31 мая, 2019 года, II том «Теплоэнергетика», Иваново, стр. 122 – 125.
4. **И.А. Бураков**, И.С. Никитина, С.В. Аладушкин «Использование сточных вод промышленных и энергетических объектов в энерготехнологических процессах», Материалы международной (XX всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения), 29 – 31 мая, 2019 года, II том «Теплоэнергетика», Иваново, стр. 147 – 149.

Вальцев Н.В.¹, Рыжков А.Ф.¹
¹ Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, 620002, Мира, 19
nvaltsev@mail.ru

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СХЕМЕ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ С ВНУТРИЦИКЛОВОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ

Несмотря на планы Европы и США по сокращению использования угля, угольные генерирующие мощности в мире продолжают увеличиваться, в основном за счет азиатских стран. Одним из перспективных направлений развития угольной энергетики являются парогазовые установки с внутрицикловой газификацией, позволяющие повысить эффективность выработки электроэнергии и при этом значительно сократить вредные выбросы в окружающую среду.

В данной статье проводится технико-экономическая оценка высокотемпературного воздухонагревателя, используемого в схеме парогазовой установки с внутрицикловой газификацией, описанной в [1]. Аппарат представляет собой пылеугольный котел, в поверхностях нагрева которого осуществляется подогрев воздуха с давлением 1,8 МПа после циклового компрессора с 450°С до 900°С перед подачей его в камеру сгорания газовой турбины, расход воздуха составляет 553 кг/с. Использование воздухонагревателя позволяет уменьшить газификационную часть установки до 30%, а также, согласно проведенным расчетам, снизить общее потребление угля для ПГУ на 15% по сравнению с классической схемой.

Повышение эффективности современных теплоэнергетических установок требует увеличения рабочих температур, что объясняет интерес к различным высокотемпературным теплообменным аппаратам. В настоящее время единственным коммерчески доступным материалом для изготовления трубчатых рекуператоров, в том числе для нагрева сжатого воздуха до 900°С, являются жаропрочные никелевые сплавы, подробнее рассмотрено авторами в работе [2]. Однако, стоимость подобных сплавов на порядок превышает стоимость нержавеющей стали и может достигать до \$70/кг и выше, что значительно удорожает аппарат и является основным препятствием к его созданию. Таким образом, первоочередной задачей при разработке воздухонагревателя становится максимально возможное сокращение габаритов его высокотемпературной части и сокращение длины выходных воздухопроводов, идущих к газовой турбине. Это требует применения нестандартных конструкторских

решений по сравнению с типовыми пылеугольными котлами: размещение выходных пакетов воздухонагревателя в нижней части топки; применение труб малого диаметра 10-20 мм и высоких скоростей воздуха более 30 м/с.

В данной работе оцениваются затраты на создание воздухонагревателя по результатам проведенной ранее оптимизации его конструкции. Полученные результаты могут быть использованы не только при дальнейшей проработке, упомянутого проекта угольной ПГУ, но и быть интересны авторам, занимающимся разработкой различных высокотемпературных теплообменных аппаратов.

Список литературы

1. **Ryzhkov A., Bogatova T., Gordeev S.** Technological solutions for advanced IGCC plant // Fuel. 2018. V. 214. P. 63-72.
2. **Valtsev N.V., Mikula V.A., Ryzhkov A.F.** The development of a high temperature air heating unit based on the external combustion for integrated gasification combined cycle // Journal of Physics: Conf. Series. 891 (2017) 012195.

Верещетин В.А., Тугов А.Н., Усман Ю.М.

Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена
Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-
исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»),
115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14
VAVereshchetin@vti.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГАЗОМАЗУТНЫХ КОТЛОВ

Несмотря на то, что с начала 21 века прирост новых газовых мощностей в России осуществляется в основном за счет строительства газотурбинных и парогазовых мощностей, доля газовых электростанций с традиционным паросиловым циклом составляет около 78% (по мощности).

При сжигании природного газа основное негативное влияние на окружающую среду связывают с выбросами в атмосферу токсичных оксидов азота.

Для снижения негативного техногенного воздействия на окружающую среду промышленных предприятий, каковыми, в том числе, являются электростанции, принят Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации». В нем установлены новые принципы природоохранной политики, в том числе в части перехода к системе технологического нормирования воздействий с использованием наилучших доступных технологий (НДТ)

В ВТИ накоплен достаточный опыт как по внедрению отдельных малозатратных технологических и режимных мероприятий на

действующих котлах, так и по комплексной разработке методов для каждого конкретного котла с учетом их влияние на тепловые характеристики.

Предложенная и испытанная отличная от принятой в эксплуатации схема распределения расходов природного газа по ярусам горелок в топке котлов ТГМ-96Б позволила снизить выбросы NO_x на 20-30% от первоначального уровня.

На котле ТГМП-204ХЛ за счет малозатратной реконструкции горелочных устройств, направленной на увеличение эффективности ввода газов рециркуляции и на изменение направлений газовых струй в горелке, удалось снизить концентрацию оксидов азота в дымовых газах до 30% от уже достигнутых значений.

Полученный опыт показывает, что комбинация нескольких природоохранных мероприятий (установка низкоэмиссионных горелок, организация ступенчатого сжигания, применение рециркуляции дымовых газов и т.п.), связанных с реконструкцией котла, позволяют более существенно, в 2 – 3 раза подавлять образование оксидов азота.

Еще больший эффект можно получить, если изначально спроектировать котел под низкие выбросы. Так на котле Е-135, спроектированном для сжигания полукоксового газа, концентрация NO_x в дымовых газах была более чем в 2,5 раза ниже регламентируемых российскими нормами значений (до 48 мг/м^3) [1].

Список литературы

1. Снижение выбросов оксидов азота на котле Е-135-3,2-420 при сжигании газообразных продуктов сланцепереработки [Текст]/ Тугов А.Н., Верещетин В.А., Сидоркин В.Т. и др.//Электрические станции. – 2018 - №5 –с. 46-49.

Воробьев И.Е., Шацких Ю.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ОБЗОР И ХАРАКТЕРИСТИКА СОВРЕМЕННЫХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Регенеративные теплообменные аппараты нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Они используются для высокотемпературного нагрева воздуха в металлургии и энергетике, в установках разделения воздуха, в некоторых процессах химической технологии. Также регенеративные теплообменники применяются в системах утилизации низкопотенциальной теплоты.

Регенеративные теплообменники отличаются конструктивным многообразием. По принципу действия регенераторы делятся на аппараты с подвижной и неподвижной насадкой. Применяемый тип насадки во

многим определяется областью применения регенеративных теплообменников, видом используемых материалов, режимом работы. По сравнению с рекуперативными теплообменниками регенеративные аппараты имеют большую поверхность теплообмена в единице объема, меньшее гидравлическое трение, могут работать высокотемпературными, загрязненными теплоносителями.

В докладе приведен обзор различных регенеративных теплообменников, которые нашли применение в настоящее время, описаны типы насадок, используемые для их изготовления материалы, указаны направления оптимизации конструкции и режимов работы аппаратов. К регенеративным теплообменникам любого типа предъявляется требование обеспечить нагрева или охлаждения рабочей среды до нужной температуры при наибольшем коэффициенте использования теплоты [1]. Также эти аппараты должны иметь как можно меньшие габариты, минимальное гидравлическое сопротивление и использовать сравнительно недорогие конструкционные материалы.

Эффективность работы насадки во многом зависит от режима работы аппарата: продолжительности периодов нагрева и охлаждения, расходов теплоносителей [2]. В докладе рассмотрены различные подходы к учету взаимного влияния конструктивных характеристик насадки и режима работы теплообменника. Причем предлагаемые различными авторами методики разработаны для конкретной конструкции регенеративного аппарата. Рассмотрена возможность применения результатов подобных исследований к регенеративным теплообменникам другой конструкции и режимом работы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-08-01078).

Список литературы

1. Кирсанов Ю. А. Циклические тепловые процессы и теория теплопроводности в регенеративных воздухоподогревателях. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 240 с.

2. Шацких Ю.В., Шарапов А.И. Исследование работы регенеративного воздухоподогревателя // Труды седьмой российской национальной конференции по теплообмену в 3х томах. 2018. С. 432-434.

Вуколова А.-Н.В.¹, Долгих А.П.², Русинкевич А.А.¹

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

² АО «Концерн Росэнергоатом»,
109507, Москва, Ферганская ул., д. 25
vukolova_av@nrcki.ru

АНАЛИЗ РАДИОНУКЛИДНОГО СОСТАВА ЖИДКИХ СБРОСОВ ЕВРОПЕЙСКИХ АЭС С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ ВВЭР И PWR В ПРОЦЕССЕ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Введение. В докладе рассмотрены аспекты существующей системы нормирования и контроля жидких сбросов АЭС в процессе нормальной эксплуатации. Установлено, что в настоящее время на основании [1] государственному нормированию и контролю подлежит 81 радиоактивный изотоп в элементарной форме и в виде соединений, однако избыточный контроль содержания радиоактивных веществ приводит к необоснованным тратам полезных ресурсов. Соответственно, основываясь на принципах культуры безопасности [2] появляется необходимость в пересмотре перечня нормируемых и контролируемых радионуклидов в водных сбросах АЭС.

Исходные данные и методы. Одним из путей решения поставленной задачи является учёт опыта эксплуатации АЭС в части мониторинга жидких сбросов в процессе нормальной эксплуатации. Ввиду отсутствия подробных данных о радионуклидном составе сбросов российских АЭС при подготовке доклада были использованы материалы, представленные в базе данных Европейской комиссии по радиоактивным выбросам [3] для 7 АЭС с энергоблоками ВВЭР Советского дизайна и 40 АЭС с энергоблоками PWR в ходе нормальной эксплуатации.

Результаты. В сбросах Европейских АЭС с энергоблоками ВВЭР были зарегистрированы 55 радионуклидов, 17 из которых регистрировались в сбросах каждой из 7 рассмотренных АЭС.

В сбросах Европейских АЭС с энергоблоками PWR были зарегистрированы 74 радионуклида, при этом только 3 из них (³H, ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs) были зарегистрированы на каждой из 40 рассмотренных АЭС.

Установлено, что водные сбросы АЭС с ВВЭР и PWR в процессе нормальной эксплуатации близки по радионуклидному составу. Радионуклидом, образующим активность более 99,9 % от суммарной активности полного состава сбросов всех 47 рассмотренных АЭС, является тритий.

На основании методики [4] проведены расчеты доз и сформированы перечни дозообразующих радионуклидов в сбросах рассмотренных АЭС. В перечень дозообразующих радионуклидов, обобщённый для АЭС с

ВВЭР и РWR на основе близости их радионуклидного состава, вошли 9 радионуклидов (в порядке уменьшения вклада в суммарную эффективную годовую дозу): ^3H , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{124}Sb , ^{90}Sr , ^{131}I .

Вывод. На основе учёта опыта эксплуатации Европейских АЭС с ВВЭР и РWR перечень нормируемых и контролируемых радионуклидов в водных сбросах АЭС в процессе нормальной эксплуатации может быть существенно сокращён.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 8 июля 2015 г. N 1316-р «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды»
2. Заявление о Политике АО «Концерн Росэнергоатом» в области культуры безопасности. [Электронный источник] <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/80e/80e3f722c68772e59786182b6937bc12.pdf> (дата обращения 31.01.2020)
3. European Commission RAdioactive Discharges Database [Электронный источник] <https://europa.eu/radd/index.doх> (дата обращения 31.01.2020)
4. РБ-126-17 Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы расчёта параметров, необходимых для разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты»

Гариевский М.В.

Саратовский научный центр Российской академии наук
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77
garievsky.michael@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПГУ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ С РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ УЧЕТОМ РЕСУРСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Неравномерность суточных графиков электрических нагрузок и недостаток пиковых мощностей в энергосистемах вызывает необходимость привлечения генерирующих источников, которые предполагались как базовые, для покрытия переменных графиков электрических нагрузок. Частично решить эту проблему можно за счет разгрузки или останова части оборудования действующих теплофикационных ПГУ. Высокая экономичность, в том числе на частичных нагрузках, и хорошие маневренные характеристики делают парогазовые установки незаменимыми для участия в устранении небалансов мощностей [1]. Но несмотря на то, что парогазовые установки имеют более высокие маневренные возможности, чем традиционные паротурбинные энергоблоки, использование ПГУ для регулирования

нагрузки приводит к увеличенному износу энергетического оборудования и снижению экономической эффективности их работы.

Оптимальное управление режимами работы парогазовых электростанций – сложная научная и практическая задача, обусловленная трудностью учета реального технического состояния оборудования, особенностью режимов работы ПГУ (с одной или двумя работающими газовыми турбинами), а также другими факторами [2]. Для определения оптимального режима парогазовых установок с котлами-утилизаторами при переменных нагрузках применен подход расчета эквивалентных часов эксплуатации (эквивалентной наработки), исходя из накопления повреждаемости наиболее нагруженных элементов основного оборудования ПГУ (газовых, паровой турбин и котлов-утилизаторов) [3, 4]. При этом знание темпа снижения ресурса всего энергоблока и его отдельных элементов может быть использовано не только для выбора более выгодной ремонтной стратегии, но также для режимной оптимизации работы электростанции.

На примере ПГУ-450Т на основе разработанной методики [3] выполнена оценка ресурсных и экономических показателей работы энергоблока и определен оптимальный режим работы основного оборудования при прохождении провала графика электрических нагрузок. Результаты расчетов показывают, что при работе ПГУ при переменном режиме в течение суток (работа на мощности 100% днем и разгрузка до 50% на 8 часов ночью) разгрузка всего энергоблока на 50% более экономичная по сравнению с остановкой одной ГТУ и работе полублока, такой режим обеспечивает снижение себестоимости электроэнергии для ПГУ-450Т на 2,1%. При прохождении провалов графика электрической нагрузки мощность дубль-блочной ПГУ может быть значительно снижена путем отключения одной ГТУ с соответствующим котлом-утилизатором, при этом отключенный КУ может находиться в горячем резерве за счет подачи в него пара от работающего КУ [5]. Результаты расчетов показывают, что оптимальный расход пара из работающего КУ в остановленный составляет 1,5% от номинального расхода, при этом режиме обеспечивается наименьшая себестоимость электроэнергии ПГУ-450Т.

Список литературы

1. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов; под ред. С.В. Цанева. 3-е изд., М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 584 с.
2. Методические положения учета особенностей ПГУ при оптимальном распределении тепловой и электрической нагрузки на ТЭЦ со сложным составом оборудования / Э.К. Аракелян, А.В. Андрюшин, С.Ю. Бурцев, К.А. Андрюшин, С.Р. Хуршудян // Теплоэнергетика. 2015. № 5. С. 27–32.

3. Аминов Р.З., Шкрет А.Ф., Гариевский М.В. Оценка ресурсных и экономических показателей работы паротурбинных энергоблоков ТЭС при переменных режимах // Теплоэнергетика. 2016. № 8. С. 25–31.
4. Аминов Р.З., Гариевский М.В. Эффективность работы парогазовых ТЭЦ при переменных электрических нагрузках с учетом износа оборудования // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 7–8. С. 10–22.
5. Эффективность глубоких разгрузок парогазовых полиблоков с "горячим" резервированием части остановленного оборудования / Ю.А. Радин, В.И. Гомболевский, В.Б. Смышляев, Д.В. Руденко // Электрические станции. 2017. № 11 (1036). С. 17–22.

Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Кузнецов Г.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический
университет,
Томск, 634030, пр. Ленина, 30
avz41@tpu.ru

ЗАЖИГАНИЕ КАПЕЛЬ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

На сегодняшний день природный газ, уголь и мазут остаются самыми популярными топливами, используемые для выработки энергии [1]. Согласно [2], в ближайшие десятилетия доля угля в энергетическом балансе тепло и электроэнергетики будет увеличиваться. Процесс выработки энергии на угольных тепловых электрических станциях сопровождается выбросами в атмосферу углекислого газа, оксидов азота и серы, летучей золы [3]. В результате экологических проблем, связанных с многочисленными негативными изменениями в экосистеме и ухудшения здоровья людей [4], требуется внедрение необходимых для обеспечения экологической безопасности технологий топливосжигания на тепловых электрических станциях. Следует отметить, что возобновляемые источники энергии, атомные электрические станции, гидроэнергетика не могут в полном объеме удовлетворить спрос на электрическую энергию [5]. Известно [6], что при сжигании водоугольных топлив (ВУТ), в результате снижения температуры в зоне горения, эмиссия антропогенных соединений снижается по сравнению с высокотемпературным сжиганием угольной пыли.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что процессы зажигания и горения капель исследованных составов водоугольного топлива с относительно небольшими добавками изопропилового спирта (от 3% до 8% по массе) имеют характерные особенности - пламенное горение и микровзрывы, происходящие с большей или меньшей интенсивностью в зависимости от концентрации спирта (рис. 1).

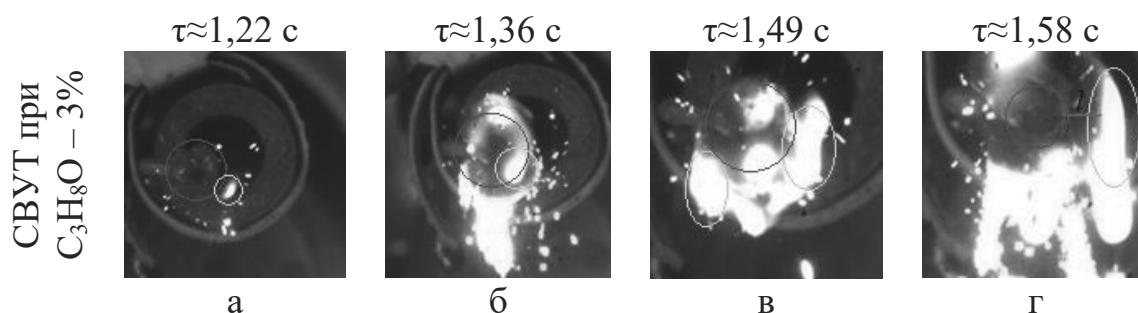


Рис. 1. Типичные видеокadres инициирования начала процесса горения суспензии

Сравнивая значения времен начала интенсивного процесса газофазного горения СВУТ в среде нагретого до высоких температур окислителя с аналогичными характеристиками обычного водоугольного топлива можно сделать вывод о том, что наличие изопропилового спирта в составе ВУТ в относительно небольших количествах (от 3 до 8% по массе) позволяет существенно (на 43-46%) сократить время задержки зажигания летучих веществ.

Список литературы

1. **Lior N.** Energy resources and use: The present (2008) situation and possible paths to the future // Energy. 2008. V. 33. P. 842-857.
2. Intern. Energy Outlook with projections to 2040. - Washington: U.S. Energy Information Administration, 2013.
3. **R. Lohwasser, R. Madlener.** Economics of CCS for coal plants: Impact of investment costs and efficiency on market diffusion in Europe // Energy Econ, 34 (2012), pp. 850-863.
4. **Noli F., Tsamos P.** Concentration of heavy metals and trace elements in soils, waters and vegetables and assessment of health risk in the vicinity of a lignite-fired power plant // Sci. Total Environ. - 2016. - V. 563-564. - P. 377-385.
5. **Glushkov D., Paushkina K., Shabardin D., Strizhak P., Gutareva N.** Municipal solid waste recycling by burning it as part of composite fuel with energy generation // Journal of Environmental Management, Volume 231, 1 February 2019, Pages 896-904.
6. **Murko V.I., Karpenok V.I., Senchurova Y.A., Tailakov O.V., Bogomolov A.R., Khyamyalyainen V.A.** Results of study of sulfur oxide reduction during combustion of coal-water slurry fuel through use of sulfur capturing agents // Matec Web Conf., 72 (2016), p. 01074.

Гранченко П.П., Кузнецов К.И.¹, Сухих А.А., Скородумов С.В.,
Басидов Р.И.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
granchenkop@gmail.com

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОЕМКОСТИ ДЕКАФТОРБУТАНА В ЖИДКОСТИ

Применение новых рабочих тел паротурбинных установок, способных составить достойную конкуренцию традиционному водяному пару, является одним из перспективных направлений при расширении фундаментальных основ теплоэнергетики [1]. Одним из таких веществ можно считать декафторбутан (C_4F_{10}), ранее использовавшийся преимущественно в качестве хладагента [2]. В работе представлено сравнение полученных расчетно-экспериментальных данных изобарной и изохорной теплоемкостей декафторбутана в жидкости по двум предложенным методикам.

По одной из методик [3], для сравнения представляются данные изобарной и изохорной теплоемкостей, полученные при проведении совместных термических (pVT -зависимость) и акустических (скорость звука) измерений, полученных в рамках проведения экспериментальных исследований о термических и акустических [4] свойствах декафторбутана в жидкой фазе. Комплексное исследование термодинамических свойств, включающее в себя измерения плотности рабочего тела и скорости звука в зависимости от давления и температуры, как свойств, исследуемых наиболее точно, позволяет, при использовании математического аппарата термодинамики [5], рассчитать и остальные термодинамические функции. Измерения плотности проводились методом пьезометра постоянного объема преимущественно по изотермам (всего получено 43 новых равновесных состояния). Неопределенность полученных данных составила не более 0.25%. Полученный массив данных о плотности представлен в виде ρpT -поверхности и уравнением вида (1) в диапазоне параметров 25 С÷143 С и давлений от 2 МПа до 10 МПа:

$$\rho = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^3 b_{i,j} \cdot p^i \cdot T^{-j} \quad (1)$$

где p – давление, МПа; ρ – плотность исследуемого вещества, кг/м³; T – температура, К; i, j – индексы коэффициентов; b_{ij} – коэффициенты полинома при температуре T и давлении p соответственно.

Была разработана и апробирована методика расчета калорических свойств по экспериментальным данным о плотности и скорости звука для

декафторбутана в перекрестном диапазоне параметров состояния. Обработка этих данных позволила рассчитать изобарную и изохорную теплоемкости. Результат расчета представлен в виде полиномиальной зависимости в диапазоне параметров состояния от 20 С до 140 С и давления до 10 МПа.

По другой методике, полученные данные о теплоемкости по вышеуказанной методике были сопоставлены с данными теплоемкостей, полученных авторами ранее с помощью уравнения состояния [6], где для расчета калорических свойств были использованы аппроксимированные идеальноегазовые функции декафторбутана. Данное уравнение охватывает жидкую и сверхкритическую области в широком диапазоне температур и давлений. Также проведено сравнение полученных значений теплоемкости по обоим методикам с данными из [7]. Сделаны выводы о предпочтительности применения каждого из представленных методов расчета.

Список литературы

1. Гохштейн Д. П., Смирнов Г. Ф., Киров В. С. Некоторые особенности парогазовых схем с неводяными парами // Теплоэнергетика. 1966. № 1. С. 20—24.
2. Кузнецов К.И. Экспериментально-расчетное исследование термодинамических свойств октафторпропана и декафторбутана: Автореферат дисс. канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2009. - 20 с.
3. Кузнецов К.И., Сухих А.А., Гранченко П.П., Скородумов С.В. Методика расчета некоторых термодинамических функций при использовании результатов совместных термических и акустических измерений // Теплоэнергетика. 2020. № 6. С. 1—5.
4. Гранченко П.П., Кузнецов К.И., Сухих А.А., Скородумов С.В., Архипцев А.В., Басидов Р.И. Скорость ультразвука в жидкой и сверхкритической области веществ фторуглеродного состава // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 1(117). С. 45—49.
5. Дифференциальные уравнения термодинамики / В.В. Сычев; 3-е изд., перераб. М.: МЭИ, 2010. С.161-165.
6. Гранченко П.П., Кузнецов К.И., Сухих А.А., Скородумов С.В., Басидов Р.И., Архипцев А.В. Уточненное единое уравнение состояния декафторбутана // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 6(122). С. 41—44.
7. REFPROP 10.0: Standard Reference Data, NIST. Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties: Copyright 2010 by the U.S. Secretary of Commerce on Behalf of the USA.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ГТУ

Разработана система поправок к энергетическим характеристикам основного оборудования (ГТУ Siemens SGT-100, Siemens SGT-300) производственной ТЭС Хасырейского месторождения, использующей в качестве основного топлива попутный нефтяной газ. Система поправок включает комплекс аналитических и графических зависимостей технико-экономических показателей оборудования от каждого из параметров окружающей среды и других внешних факторов. Зависимости получены путем математической обработки результатов тепловых испытаний при различных параметрах окружающей среды.

Система уравнений, описывающих работу газотурбинной установки на примере одновальной ГТУ SGT-100, включает уравнения мощности турбины, мощности компрессора и др. Например, уравнение мощности турбины имеет вид [1, 2]

$$N_T = G_T \cdot c_p \cdot T_T' \cdot (1 - 1/\pi_T^m) \cdot \eta_T, \quad (1)$$

где N_T – мощность турбины, кВт; G_T – расход продуктов сгорания, кг/с; c_p – средняя изобарная теплоемкость рабочего тела, кДж/(кг·К); T_T' – температура продуктов сгорания на выходе из турбины, К; π_T – степень расширения продуктов сгорания; $m = (k-1)/k$, где k – показатель адиабаты; η_T – КПД турбины.

На примере уравнения мощности турбины (1) рассмотрим алгоритм линеаризации уравнений на основе метода малых отклонений [3]. На первом этапе осуществляется логарифмирование уравнения (1)

$$\ln N_T = \ln G_T \cdot \ln c_p + \ln T_T' + \ln(1 - 1/\pi_T^m) + \ln \eta_T. \quad (2)$$

На втором этапе проводится дифференцирование полученного уравнения (2) по переменной, влияние которой на мощность турбины N_T , необходимо исследовать. В результате получаем коэффициенты влияния. Первые три из них будут: $K_1 = G_T \cdot d(\ln N_T) / dG_T$; $K_2 = c_p \cdot d(\ln N_T) / dc_p$; $K_3 = T_T' \cdot d(\ln N_T) / dT_T'$.

Таким образом, уравнение (1) в приращениях будет иметь следующий вид:

$$\delta N_T = K_1 \cdot \delta G_T + K_2 \cdot \delta c_p + K_3 \cdot \delta T_T' + K_4 \cdot \delta \pi_T + K_5 \cdot \delta m + K_6 \cdot \delta \eta_T. \quad (3)$$

Уравнение (3) устанавливает связь величины относительного изменения мощности турбины от какого – либо из параметров (расход газов, степени расширения рабочего тела и др.), входящих в уравнение (1).

Таким образом, получены зависимости поправочных коэффициентов к электрической мощности и расходу продуктов сгорания газотурбинных установок от величины отклонения параметров от условий по ГОСТ Р 55798, в частности, от температуры окружающего воздуха $T_{\text{окр}}$ (рис. 1).

Представленные результаты можно применять как для приведения результатов испытаний к условиям окружающей среды по ГОСТ Р 55798-2013, так и для исследования влияния внешних факторов на эффективность работы ГТУ. По результатам испытаний, а также с помощью метода малых отклонений разработана диаграмма режимов и система поправок к отклонению показателей ГТУ от изменения внешних факторов от условий по ГОСТ Р 55798-2013 (ИСО 2314:2009).

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ в рамках научного проекта МК–2614.2019.8.

Список литературы

1. Парогазовые установки тепловых электрических станций: учеб. пособие для вузов. / Кудинов А.А., Зиганшина С.К.; Самара: СамГТУ, 2014.
2. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов; под ред. С.В. Цанева. – 3-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
3. Тепловые испытания стационарных газотурбинных установок / Ольховский Г.Г. – М., «Энергия», 1971.

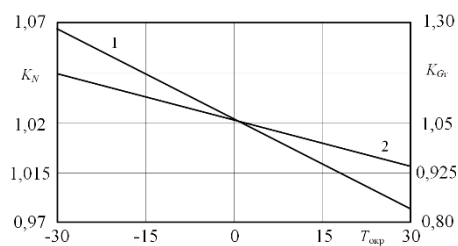


Рис. 1. Зависимость поправочных коэффициентов от температуры окружающего воздуха: 1, 2 – поправочные коэффициенты к N_T и G_T соответственно

Девянин В.А.

slava.devyanin@gmail.com

ОБРАЗОВАНИЕ ПУЗЫРЕЙ В СТРУЙНОМ РЕЖИМЕ НА ОТВЕРСТИИ ДЫРЧАТОГО ЛИСТА

Гидродинамические процессы, протекающие при образовании пузырей на отверстиях дырчатых листов барботажных аппаратов ТЭС и АЭС (испарители, выпарные аппараты, парогенераторы, барабаны котлов и т.д.), оказывают значительное влияние как на гидродинамику таких аппаратов, так и на процессы тепломассообмена на этих листах. Подавляющее большинство работ по этой тематике выполнено для условий работы химического оборудования, то есть при достаточно низких нагрузках зеркала испарения и атмосферном давлении. При таких

условиях газ поступает в жидкость в виде отдельных пузырьков. В энергетическом же оборудовании из-за высокой скорости выхода пара из отверстий дырчатых листов происходит струйное истечение, то есть пузыри образуются непосредственно друг за другом. Ограниченная информация для расчета средних размеров и распределения отрывных пузырей по размерам при образовании их на дырчатых листах в струйном режиме препятствует созданию математических моделей расчета как гидродинамических, так и тепломассообменных процессов.

В связи с вышесказанным, целью настоящей работы является анализ существующих в литературе зависимостей и разработка такой методики расчета среднего диаметра отрывных пузырей, образующихся на единичном отверстии дырчатого листа в струйном режиме истечения газа, которая также бы учитывала изменение физических свойств рабочей среды при значительном возрастании давления.

Автором для анализа и сравнения расчетных зависимостей с экспериментальными данными были выбраны только те работы, результаты расчетов которых были действительны как в пузырьковом режиме истечения газа, так и частично в струйном режиме. Сравнение экспериментальных данных средних по объему отрывных пузырей с существующими расчетными зависимостями показало достаточно хорошую сходимость как для пузырькового режима истечения газа, так и струйного режима образования пузырей.

Основным отличием пузырькового режима от струйного является то, что в струйном режиме в зоне образования пузырей существует нестационарное индуцированное растущими и всплывающими пузырями движение жидкости.

Для расчета размеров отрывных пузырей в струйном режиме истечения газа, при котором существует подъемное движение жидкости, за основу взята модель /1/, в которой рассматривается баланс сил, действующих на пузырь в момент отрыва. При расчете силы лобового сопротивления с помощью поправочного коэффициента дополнительно учтена скорость жидкости около растущего пузыря.

После преобразования уравнения баланса сил получаем следующее уравнение для расчета среднего по объему диаметру отрывного пузыря d_{b1}

$$d_{b1} = \left[\frac{V_1^2}{g} \left(\frac{2,74(\rho'' + 0,9\rho')}{d_{b1}^2(\rho' - \rho'')} - \frac{2,43\rho''}{d_i^2(\rho' - \rho'')} \right) + \frac{6d_i\sigma}{g(\rho' - \rho'')} \right]^{1/3}, \quad (1)$$

где V_1 – расход газа через отверстие, м³/с; g – ускорение силы тяжести, м/с²; ρ' , ρ'' – плотность жидкости и газа, м³/с; d_i – диаметр отверстия, м; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Численное значение коэффициента 0,9 найдено из осреднения экспериментальных данных работ /2/ - /4/ и др. Расхождение расчетных и

экспериментальных данных не превышает 10 %. Решение уравнения (1) осуществляется итеративным методом.

Список литературы

1. **Gaddis E.S., Vogelpohl A.** Bubble formation in quiescent liquids under constant flow conditions// Chem. Eng. Sci. 41(1986)1. 97-105.
2. **Девянин В.А.** Влияние геометрических характеристик дырчатых листов на размер отрывных пузырей// Теплоэнергетика. 1994. №6. С.42-46.
3. **Jamialahmadi M, Zehtaban M.R., Müller-Steinhagen H., Sarrafi A., Smith J.M.** Study of bubble formation under constant flow conditions// Chem. Eng. Res. Des. 79 (2001). 523–532.
4. **Schwarzer J., Dewjanin W., Vogelpohl A.** Primaerblasenbildung an Lochplatten - Mechanismen, Umstroemung und Groessenverteilung // Chem. Ing. Tech. 1990.Vol.62. No2. S.444-145.

Деев Равад, Сиденков Д.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В ПУЧКЕ ТРУБ КАПЛЕВИДНОЙ ФОРМЫ

На электростанциях, работающих по «органическому» циклу Ренкина (ОЦР), одним из основных теплообменников является разделительный теплообменник. В качестве разделительного теплообменника могут применяться пучок каплевидной формы [1,2], наружная поверхность трубок омывается горячей (газовой) средой, а внутри труб протекает теплоноситель ОЦР.

С помощью пакета ANSYS проводится численное исследование теплообмена шахматного пучка труб каплевидной формы различной компоновки и сравнить их с пучком круглых труб того же эквивалентного диаметра и поверхности площади теплообмена при угле атаки набегающего газового потока $\theta=0^\circ$. Получены распределение скорости, давления, температуры в исследуемых пучках после напряжённо-деформированного состояния диапазоне изменения скорости набегающего потока $u=1,33 \div 7$ м/с.

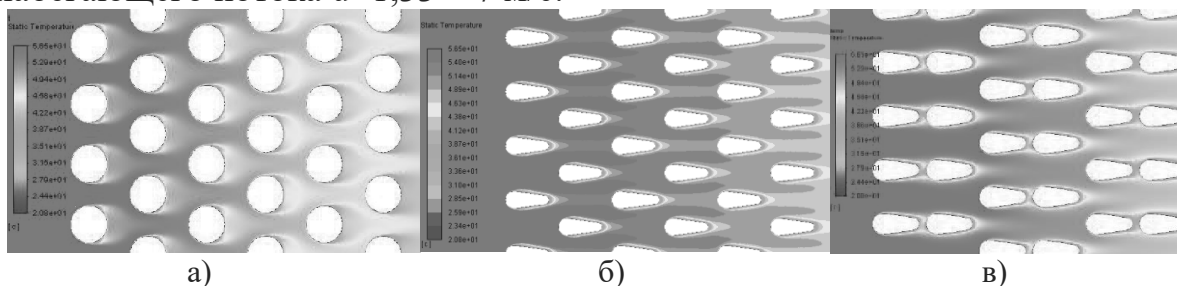


Рис.1. Распределение температуры в различных компоновках

пучка труб при $u=1,33$ м/с.

На рис. 1 представлено распределение температуры в исследуемых пучках после деформации. Сравнение результатов настоящей работы с теплоотдачей при обтекании пучка круглых не выявило преимуществ по теплоотдаче рассмотренного пучка каплевидных труб, в то время как, гидродинамическое сопротивление пучка каплевидных труб выявило его преимущество по сравнению с круглыми при $\theta = 0^\circ$ (рис. 2). Представлено уравнение подобия, позволяющее определить средние по пучку шестирядных каплевидных труб числа Нуссельта в зависимости от средней скорости в узком сечении пучка и при $\theta = 0^\circ$ после напряжённо-деформированного состояния.

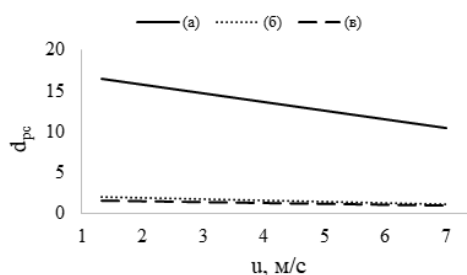


Рис. 2. Изменение коэффициента падения давления пучка в зависимости от скорости набегающего потока.

Список литературы

1. **Sayed Ahmed S.A.E., Ibrahiem E.Z., Mesalhy O.M., Abdelatif M.A.** Effect of attack and cone angles on air flow characteristics for staggered wing shaped tubes bundle. *Heat Mass Transfer*, vol. 51, no. 7, pp. 1001–1016, 2015.
2. **Deeb R., Sidenkov D.V.** Numerical simulation of the heat transfer of staggered drop-shaped tubes bundle. *IOP Conf. Series: Journal of Physics*: 1359 (2019) 012135.

Денискин В.П., Стефановский Д.В., Федин О.И.
ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»,
Подольск, 142103, Железнодорожная, 24
sdv81288@mail.ru

ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Одной из актуальнейших проблем повышения эффективности и безопасности атомной промышленности является наиболее полное использование урана в ядерном топливном цикле. Уран в любых формах не должен «зависать» в качестве невостребованного в хранилищах, технологических и производственных подразделениях, в техногенных отходах, поскольку это, с одной стороны, приводит к замораживанию средств предприятий, а с другой стороны – повышает опасность его несанкционированного использования, хищения, что требует дополнительных средств для его учета и контроля, физической защиты.

В докладе представлены анализ материального и морфологического состава техногенных отходов [1], методы выделения урана из различных типов отходов с требуемой чистотой, оценка эффективности

предлагаемых способов выделения урана на примере опытно-промышленного производства.

Исследование состава отходов позволило установить, что ценный компонент отходов - уран связан с сопутствующими примесными металлами и находится в трудно вскрываемой форме в виде уранатов кальция ряда CaUO_4 , CaU_2O_7 и др. В тоже время среди выявленных элементов следует отметить углерод, хлор и кремний, которые существенно осложняют переработку отходов гидрометаллургическими методами.

Углерод удаляли путем термообработки зольных отходов в статических условиях. Отжиг при температуре $750\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 часов позволил снизить содержание углерода до $0,06\%$ масс. В результате окислительного обжига наряду с углеродом были удалены органические компоненты, а кремний переведен в кислотоустойчивую оксидную форму, т.к. в этом случае существенно снижается его негативное влияние на экстракцию.

Содержание хлора снижено до $0,2\%$ путем обработки отходов подогретой до $80\text{ }^\circ\text{C}$ дистиллированной водой в течении 2-х часов. Необходимость удаления хлора обусловлена тем, что в кислой среде коррозионная активность этого элемента чрезвычайно опасна для технологического оборудования.

Для извлечения урана использованы различные кислоты и карбонатные растворы. Лучшие показатели были достигнуты при использовании азотной кислоты. Далее уран извлекали экстракционным методом и отправляли на аффинаж.

Разработанная технология позволила извлечь более 98% урана из отходов. Обеспечены условия перевода отходов в РАО. Высокообогащенный уран возвращен в ядерный топливный цикл.

Также в работе представлены экологические аспекты переработки техногенных отходов, масштабность задач, связь этих работ с задачами нераспространения, представлены итоги многолетней работы по переработке техногенных отходов.

Список литературы

1. Стефановский Д.В., Шестых Д.В., Черкасов А.С. Извлечение урана из отходов сложного химического состава // Химическая технология. 2019. Т. 21. № 1. С. 30-35.

Дмитриев С.М.¹, Кураченков А.В.², Петрунин В.В.²

¹ Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»,

Нижний Новгород, 603950, Минина, 24

² АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения
им. И. И. Африкантова»,

Нижний Новгород, 603074, Бурнаковский проезд, 15
v.petrunin@okbm.nnov.ru

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Ядерные реакторы малой и средней мощности и атомные станции на их основе (АСММ и АССМ) привлекают все более пристальное внимание в мире как перспективный класс энергоисточников для эффективного решения актуальных проблем энергообеспечения.

Уменьшение единичной мощности в атомной энергетике как правило сопровождается ростом удельных капитальных затрат, поэтому в проектах РУ и энергоблока должны быть реализованы технические решения, снижающие зависимость от масштабного фактора. В связи с этим в значительной части проектов разработчиками принимаются новые инновационные решения по компоновке, системам, оборудованию, размещению, автоматизации управления и т.д.

Наиболее перспективным направлением обеспечения приемлемых экономических показателей и минимизацией затрат на разработку АС малой и средней мощности является реализация инновационных решений в рамках освоенных судовых реакторных технологий.

Судовые реакторные технологии являются одним из основных достижений российской атомной отрасли. Только по проектам АО «ОКБМ-Африкантов» создано более 460 транспортных установок с суммарным опытом эксплуатации ~10500 реакторо-лет.

К числу наиболее проработанных для реализации в ближайшей перспективе реакторов средней мощности относятся блочно-модульные реакторные установки типа ВБЭР, разрабатываемые АО «ОКБМ-Африкантов» и НИЦ «Курчатовский институт», концепция которых основана на сочетании технологий транспортных атомных паропроизводящих установок (АППУ) с отработанными в гражданской атомной энергетике решениями по активной зоне и топливному циклу

Особенностью проекта является применение унифицированной петли теплообмена, являющейся технологической платформой для реализации мощностного ряда энергоблоков. На основе базового четырехпетлевого

варианта РУ ВБЭР-600 и применения унифицированной петли теплообмена обеспечивается мощностной ряд ВБЭР 600-450-300 МВт эл.

В диапазоне малых мощностей АО «ОКБМ Африкантов» совместно с АО РАОС и АО «ГСПИ» разрабатывает наземную АСММ с двумя энергоблоками мощностью 2 x 53 МВт эл

Анализ конкурентоспособности АСММ на базе двух РУ РИТМ-200 с различными источниками генерации аналогичной мощности (углеводородное топливо, солнечная и ветровая энергетика, энергия приливов) показал, что для уверенного вхождения на рынок малых мощностей для АСММ должен быть обеспечен целевой LCOE (полная удельная стоимость производства единицы электрической энергии) не выше 90 \$/МВт.ч (5400 руб/МВт.ч) при норме дисконтирования 7%.

В РУ РИТМ-200 для АСММ реализуется ряд инновационных технических решений и выполняется комплекс НИОКР, направленных на обеспечение требуемых технико-экономических показателей и безопасности станции:

- применение металлокерамического топлива с энергозапасом до 8 ТВт·ч и периодом между перегрузками 6-7 лет.

- разработка инновационных пассивных систем безопасности, обеспечивающих «практический уход» от тяжелых аварий;

- увеличение срока службы РУ с 40 лет до 60 лет;

- разработка новой марки коррозионностойкой стали с повышенными прочностными свойствами для замены классической нержавеющей стали типа 08X18H10T с целью снижения массогабаритных характеристик оборудования АСММ и других установок малой мощности и др.

- создание «цифрового двойника» ЯЭУ и применение инновационной технологии численных экспериментов по исследованию и обоснованию технических характеристик установки.

В условиях динамично развивающегося рынка реакторных технологий перед научным сообществом и разработчиками ставится задача непрерывно и оперативно совершенствовать проектные решения с учетом изменение рыночной конъюнктуры и требований заказчиков.

Долбикова Н.С.¹, Мерзликина Е.И.¹, Никитина И.С.¹
¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

К ВОПРОСУ О ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ТЭС НА БАЗЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

В настоящее время постоянно повышается уровень автоматизации тепловых электрических станций, в том числе, подразделений, связанных с водоподготовкой и химводоочисткой. В последнее время широко внедряются стационарные устройства химического контроля непрерывного действия, измеряющие параметры среды в автоматическом режиме [1], системы химико-технологического мониторинга рассматриваются как часть АСУТП [1,2]. При этом нельзя не отметить, что приборы стационарного химического контроля – это сложные устройства (рис. 1), использующие элементы интеллектуальных технологий и требующие своевременного технического обслуживания. Надежность этих приборов и своевременное выявление их неисправностей очень важны для надежности основного и вспомогательного оборудования ТЭС и для непрерывного снабжения потребителей электроэнергией и теплом [1,3].

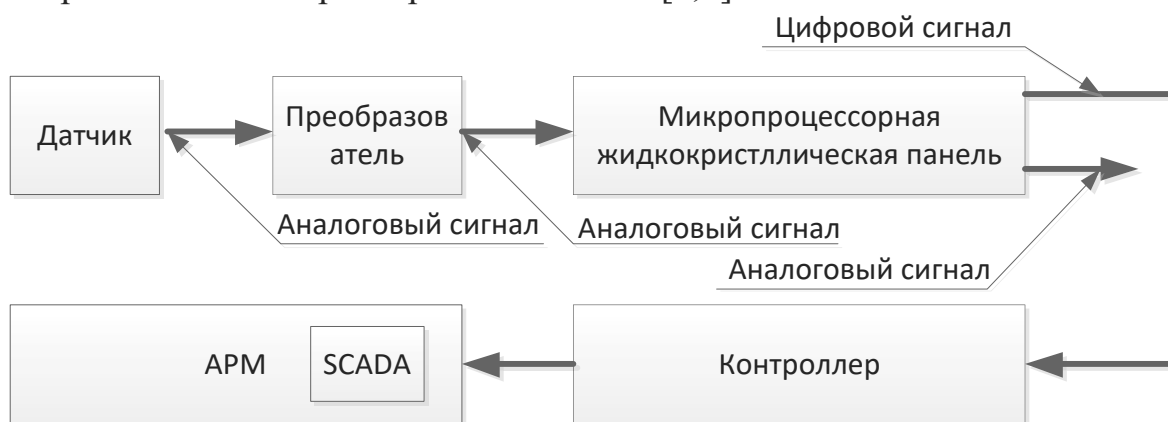


Рис. 1. Структура стационарного устройства химического контроля.

В типовом случае аналоговый сигнал от датчика идет на преобразователь (рис.1), аналоговый сигнал с преобразователя – на жидкокристаллическую панель, которая может при необходимости быть местным индикатором и имеет на выходе и аналоговый унифицированный сигнал (например, 4-20 мА) и цифровой сигнал (например, по интерфейсу RS-485). В составе цифрового сигнала передается не только информация о значении химического параметра, температуры среды и т.д., но и информация о работе прибора, например, о статусе датчика (включен,

отключен, выполняется калибровка, параметр вышел за допустимый диапазон), об ошибках при калибровке, о значении напряжения на датчике и т.д. Зачастую эта информация никак не используется, в лучшем случае – записывается в базу данных и хранится в ней.

Для повышения надежности работы оборудования химического контроля, а также основного и вспомогательного оборудования ТЭС предлагается информационная система, построенная на базе современных SCADA-систем и использующая передаваемую в составе цифрового сигнала информацию о работе прибора. Данная система предоставляет сотрудникам станции информацию по вызову, также имеется система сигнализации, которая сообщает о наличии ошибок в работе прибора. Модель этой системы реализована на базе технических средств Техноприбор и Овен и программных пакетов CODESYS и Trace Mode.

Применение такой системы может повысить надежность, экономичность и экологичность работы ТЭС.

Список литературы

1. **Егошина О.В.** Системы химико-технологического мониторинга – М.: Издательство МЭИ, 2013. – 48 с.
2. **Егошина О.В., Воронов В.Н., Назаренко М.П.** Современное состояние систем химико-технологического мониторинга на тепловых станциях на основе опыта МЭИ и НПЦ «Элемент». // Теплоэнергетика. 2014. № 3. С.39—45.
3. **Yuliang Dong, Yujiong Gu, Yaqiong Li and Kun Yang**, "Fault Diagnosis of Reverse Osmosis System for Chemical Water Treatment in Power Plant Based on FMEA and Rough Set Theory," *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, 2006, pp. 5572-5576. doi: 10.1109/WCICA.2006.1714140

Долотовский И.В., Долотовская Н.В.
Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А, 410054,
Саратов, Политехническая, 77
dolotowsky@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ЖАРОТРУБНЫХ И ЖАРОТРУБНО - КОНТАКТНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯХ

Водонагреватели жаротрубные и жаротрубно-контактные емкостного типа используются в установках подготовки и хранения воды хозяйственно-питьевого, противопожарного и технологического назначения, эксплуатируемых в регионах с холодным и умеренным климатом. Возможно их использование для нагрева воды в системах автономного теплоснабжения для горячего водоснабжения и отопления.

Водонагреватель содержит следующие основные узлы:

цилиндрический теплоизолированный резервуар вместимостью от 100 до 2000 м³ (с теплоизолированной крышей); обвязку горелок, размещенную в теплоизолированном укрытии; жаровые трубы (верхняя часть труб содержит дефлекторы), встроенные в резервуар и укомплектованные горелками; световой люк. В жаротрубно-контактных водонагревателях уходящие продукты полного сгорания газообразного топлива контактируют на выходе из жаровых труб с поверхностью нагреваемой воды. Этот способ нагрева приемлем в случае отсутствия повышенных требований к качеству нагреваемой воды и при необходимости обеспечения более высокого значения теплового КПД.

Для расчета конструктивных и режимных характеристик этих аппаратов разработана математическая модель (с использованием методики расчета цилиндрических трубчатых печей), представленная уравнениями теплового баланса, теплопередачи, лучистого теплообмена, уравнениями расчета физико-химических свойств веществ (воды, природного газа, дымовых газов). В математической модели расчета теплообмена в жаровых трубах основной рассчитываемой переменной является обобщенная характеристика процесса в виде функции известных конструктивно-параметрических показателей и критериев:

1. суммарного объема продуктов сгорания;
2. числа Больцмана;
3. приведенной степени черноты топки;
4. лучевоспринимающей поверхности;
5. коэффициента конвективного теплообмена;
6. приведенной характеристики теплообмена в топке;
7. объемных долей водяных паров и диоксида углерода, и суммарной доли трехатомных газов в продуктах сгорания;
8. эффективной толщины излучающего слоя.

В математическую модель включены также неравенства, учитывающие ограничения на параметры протекающих процессов и ограничения по размерам применяемых стандартных труб и горелочных устройств.

Разработанная математическая модель реализована в программе расчета основных конструктивных и режимных характеристик водонагревателей (№2012612727) в среде Delphi. Заданными параметрами являются: расход нагреваемой воды; температуры воды на входе и выходе из аппарата; конструктивные характеристики (число жаровых труб, их наружный диаметр и толщина стенки, длина горизонтального участка и высота вертикального участка труб, диаметр резервуара); состав топливного газа по компонентам; температура окружающего воздуха; коэффициент избытка воздуха.

Результаты расчета: тепловой КПД аппарата; расход топливного

газа; теплота, переданная в жаровых трубах; среднее теплонапряжение теплопередающей поверхности; средняя температура стенки жаровой трубы; полезная теплопроизводительность; суммарный объем дымовых газов.

Программа позволяет осуществить проектирование водонагревателей с определением возможности их эксплуатации без конденсации водяных паров в жаровых трубах при низкой тепловой нагрузке и температуре окружающего воздуха. С использованием программы можно также провести численные эксперименты на водонагревателе заданной конструкции и сформировать режимные карты работы аппарата с варьируемыми эксплуатационными параметрами: расходом нагреваемой воды и ее температурой; составом топливного газа; температурой окружающего воздуха.

А.А. Дудолин, А.Н. Ефремов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
anefremow@mail.ru

АНАЛИЗ ОПЫТА СТРАН ЕС ПО ПРИМЕНЕНИЮ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ГАЗООЧИСТКИ ТЭС НА ТКО ПО УДАЛЕНИЮ КИСЛЫХ ГАЗОВ

На современном рынке оборудования термического обезвреживания отходов поставщики предлагают различные схемы подготовки отходов, термического обезвреживания, газоочистки в составе энергетического комплекса ТЭС на ТКО.

Отсутствие справочных материалов, отражающих опыт эксплуатации ТЭС на ТКО с различными схемами термического обезвреживания и газоочистки, статистических материалов отражающих средние и предельные показатели концентраций загрязнителей при работе установок приводит к невозможности объективной оценки различных схем ЭК при работе на ТКО. Затрудняется проведение анализа достоинств и недостатков схем необходимо на этапе предпроектной проработки для вновь строящихся объектов.

Проведенные исследования работы существующих на территории России ЭК на ТКО [1], [2] не могут в полной мере быть использованы как базовые материалы для разработки рекомендаций по выбору структурных схем вновь проектируемых объектов на этапе технико-экономического обоснования из-за малого количества исследуемых объектов.

В странах ЕС имеется большое количество эксплуатируемых ТЭС на ТКО, имеющих различные структурные схемы. Анализ статистических

данных, полученных на большом количестве действующих предприятий позволит сделать выводы о среднестатистических показателях выбросов по контролируемым показателям, предельных значениях выбросов, расходах реагентов для различных схем газоочистки.

Авторами проведен анализ результатов эксперимента, проведенного в ЕС, связанного с определением концентраций загрязнителей в ДГ ТЭС на ТКО различной производительности, построенных в разные годы и имеющих различные схемы газоочистки и термического обезвреживания [3].

Эксперимент по сбору статистических данных по выбросам от ЭК на ТКО проведен в 2016 году, на 204 объектах термической утилизации отходов. Контроль выбросов производился для постоянно контролируемых показателей с получасовым временным разрешением в течении года. Для каждого контролируемого параметра была собрана серия из 17 520 среднечасовых значений концентраций загрязнителей. На основе данных о выбросах определены максимальные среднесуточные концентрации загрязнителей в ДГ, среднегодовые концентрации, определены средние расходы реагентов, приведенные к тонне утилизируемых отходов.

В настоящей статье приведены результаты анализа данных о концентрации кислых газов в дымовых газах, в зависимости от применяемой системы газоочистки, расходе реагентов на нейтрализацию кислых газов.

Анализ данных среднесуточных и среднегодовых выбросов HCl показал наличие зависимости концентрации HCl в дымовых газах ТЭС на ТКО от применяемой системы газоочистки (см. рис. 1). В то время, как концентрации HCl в ДГ установок с сухой (DSI) и полусухой (SemiWS) системах газоочистки сопоставимы и имеют различие в пределах 10%, концентрация HCl в дымовых газах установок с мокрой системой газоочистки (WS) ниже более чем в 2 раза. Максимальные зафиксированные суточные концентрации HCl установок с DSI и SemiWS сопоставимы, для установок с WS максимальная среднесуточная концентрация HCl ниже на 15%.

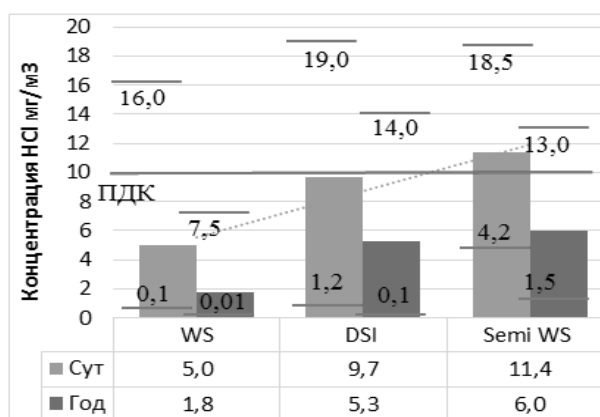


Рис.1 Средние годовые и максимальные суточные концентрации HCl для различных систем

На рисунке 2 приведен график распределения установок с различными системами газоочистки по среднегодовым выбросам HCl.

В соответствии с результатом анализа данных - 63,3% установок с WS имеют среднегодовые концентрации HCl менее 2 мг/м³, при этом 100% установок имеют среднегодовые концентрации менее 8 мг/м³.

Среди исследуемых объектов с DSI- на 7,7% объектов концентрация HCl в среднем по году выше ПДК. Среди исследуемых объектов с SemiWS- на 4,3% объектов концентрация HCl в среднем по году выше ПДК.

Технологические схемы газоочистки непрерывно модернизируются, наличие опыта эксплуатации систем газоочистки позволил производителям предлагать на рынке более экономичные схемы газоочистки, проведение анализа зависимости между годом ввода объекта в эксплуатацию и примененной системой газоочистки позволило определить тенденцию частоте применения различных схем. Зависимость между годом ввода ТЭС на ТКО в эксплуатацию и применяемой системой газоочистки в исследуемой группе, приведенная на рис. 3 показывает, что на объектах, построенных до 2000 года мокрая система газоочистки применялась на 52,7% случаев. Для объектов, построенных после 2006 года 79,1% объектов оснащаются сухой и полусухой системами газоочистки.

Данные о расходе реагентов на нейтрализацию кислых газов, приведенные на рис.4 (расход реагента приведен к расходу негашеной извести по стехиометрическому соотношению) показывают, что для установок с мокрой системой очистки дымовых газов расход реагентов ниже чем для систем с полусухой системой газоочистки на 52% и на 8,5% меньше чем для установок с сухой системой газоочистки. Максимальные

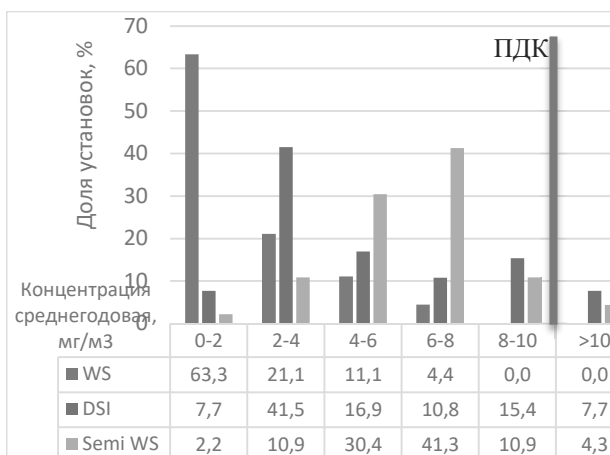


Рис.2 Распределение объектов по среднегодовым выбросам HCl

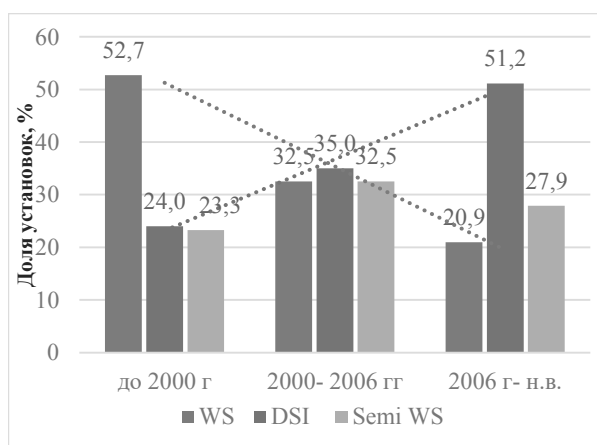


Рис.3 Распространенность систем газоочистки в зависимости от года ввода объекта в эксплуатацию

зафиксированные значения расхода реагентов для установок с мокрой системой газоочистки в среднем на 27% меньше, чем для остальных систем газоочистки.

Таким образом, на основании статистических данных можно сделать выводы:

- системы газоочистки с мокрым реактором WS имеют лучшие показатели по удалению HCl и HF в сравнении с остальными, также лучшие показатели по удалению SOx в среднем по году;

- показатели очистки ДГ от кислых газов для систем с сухим и полусухим реактором- сопоставимы (удаление HCl и SOx лучше происходит на установках с сухим реактором, удаление HF лучше происходит на установках с полусухим реактором);

- расход реагентов для систем с мокрым реактором ниже чем для остальных систем, при этом- реагент используемый в данной технологии не переходит в золовые отходы ТЭС на ТКО, удаляется системой очистки сточных вод, что сокращает объем образующейся золы;

- на современных объектах по термическому обезвреживанию ТКО всё чаще применяются системы сухой и полусухой очистки ДГ от кислых газов, что связано с хорошими показателями работы, низкими CAPEX и OPEX.

При строительстве ТЭС на ТКО в условиях городской застройки и стремлении к минимизации валовых выбросов кислых газов в атмосферный воздух может быть рекомендована система с мокрым реактором, которая обеспечит низкие выбросы HF, HCl, SOx. Система с мокрым реактором позволит сократить валовые выбросы вредных веществ при строительстве ТЭС на ТКО большой производительности и в этом случае является обоснованной.

При строительстве ТЭС на ТКО средней мощности (до 350 тыс. тонн ТКО в год) может быть рекомендовано применение полусухого и сухого реактора, при этом наибольшее предпочтение следует отдавать технологии с полусухим реактором как наиболее перспективной [3].

Список литературы

1. Тугов А.Н. Исследование процессов и технологий энергетической утилизации бытовых отходов для разработки отечественной ТЭС

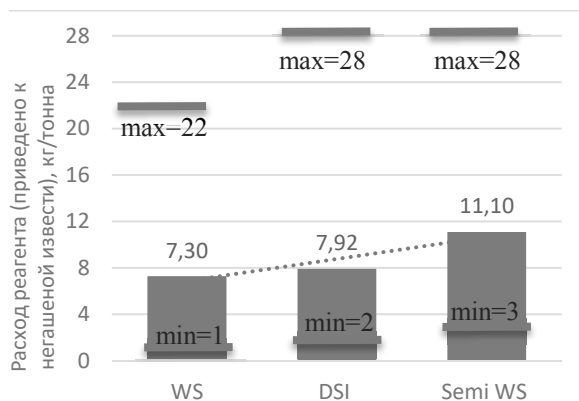


Рис.4. Расход щелочного реагента в системе газоочистки (по негашеной извести)

- на ТБО, Москва, дис. ... докт. техн. наук: 05.14.14: защищена 1.11.12 2012.
2. Дыган М.М. Экологическая безопасность мусоросжигательных заводов при переменной мощности по сжиганию твердых бытовых отходов, Москва, дис. ... канд. техн. наук: 03.02.08: защищена 29.02.12 2012.
 3. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, Frederik Neuwahl, Gianluca Cusano, JRC Science for policy report. European Commission, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU, 2019.
 4. JRC Reference Report on Monitoring of Emissions to Air and Water in IED installations, 2018, EU.

А.А. Дудолин¹ А.Н. Ефремов²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
anefremow@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ТЭС НА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДАХ

Термическое обезвреживание отходов является технически сложным и дорогостоящим процессом (удельные капитальные затраты составляют около 300-800 евро/тонну отходов в год). Выполнение высоких экологических требований, предъявляемых к ЭК, утилизирующих ТКО в условиях постоянно изменяющегося состава топлива представляет собой сложную задачу. В условиях современного Российского рынка тепловой и электрической энергии без привлечения дотаций со стороны государства, или сложных схем возврата инвестиций инвесторам, применение ЭК на ТКО не может быть конкурентоспособно и окупаемо. Затраты на строительство конденсационных энергоблоков на ТКО достигают 5500-6500 \$/кВт.

При составлении схемы обращения с отходами городов и регионов рекомендуется применение схемы с максимальным использованием вторичного сырья из отходов и термической утилизацией только остатков, не подлежащих повторной переработке, из которых извлечены фракции, содержащие наибольшее количество загрязнителей (RDF топливо). Схема с применением глубокого извлечения вторичного сырья позволит упростить структуру ТЭС на ТКО, сократить капитальные и

эксплуатационные затраты, а главное снизить выбросы вредных веществ в атмосферу с дымовыми газами, золой и шлаком.

В связи с особенностями эксплуатации ЭК на ТКО и малой мощностью объекта по отпуску энергии (400-700 кВт ЭЭ/тонна или 2000-2800 кВт тепла/ тонна), на этапе ТЭО целесообразно рассмотрение варианта размещения комплекса по термической утилизации отходов в структуре действующего энергетического предприятия, что позволит обеспечить сокращение капитальных затрат, необходимую загрузку оборудования в процессе эксплуатации.

В докладе рассмотрены основные этапы в выборе оптимальной технологии термической утилизации твердых коммунальных отходов на этапе выполнения технико-экономического обоснования. Проведен анализ оценки влияния топливной составляющей на структуру энергетического комплекса. Разработаны рекомендации к выбору оптимальной энергетической структуры ТЭС на ТКО, схемы обращения с золой и шлаком, технологии термической утилизации наиболее подходящих для условий размещения объекта. Проведено исследование, посвященное влиянию выбранной структуры энергетического комплекса на принятие решения о выборе системы газоочистки и схемы очистки сточных вод. Проведено сравнение критериев в выборе структуры энергетического комплекса на ТКО в сравнении с энергетической ТЭС.

Список литературы

1. Commission E. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, JOINT RESEARCH CENTRE, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU.
2. Тугов А.Н. Исследование процессов и технологий энергетической утилизации бытовых отходов для разработки отечественной ТЭС на ТБО, Москва, дис. ... докт. техн. наук: 05.14.14: защищена 1.11.12 2012.
3. Дыган М.М. Экологическая безопасность мусоросжигательных заводов при переменной мощности по сжиганию твердых бытовых отходов, Москва, дис. ... канд. техн. наук: 03.02.08: защищена 29.02.12 2012.

Дуников Д.О.^{1,2}, Борзенко В.И.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А
ddo@mail.ru

ВОДОРОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Мировой энергетический сектор в настоящее время трансформируется на основе принципов энергетической безопасности, экономической эффективности, защиты окружающей среды и надежности (концепция 3E+S). Ставятся цели по преобразованию энергетических систем в доступные, надежные, устойчивые и имеющие низкие выбросы парниковых газов, и декларируется приверженность к среднесрочной оптимизации и постепенной ликвидации неэффективных субсидий для ископаемого топлива, которые приводят к расточительному потреблению [1].

В результате возрастает роль возобновляемых источников энергии и распределенной генерации, которые негативно влияют на устойчивость традиционных электрических сетей в первую очередь из-за своей переменной и слабо предсказуемой природы. Традиционно избыточные мощности ВИЭ ограничивались и избыточная генерация не использовалась в энергосистеме из-за отсутствия крупномасштабных систем хранения энергии. Например, в 2018 году в эксплуатацию было введено 100 ГВт солнечных и 51 ГВт ветровых электростанций, в то время как для различных регионов мира средний КИУМ находится в диапазоне от 0.14 до 0.22 для солнечных и от 0.28 до 0.48 для ветровых электростанций [2].

Большие надежды в повышении гибкости энергетических систем возлагаются на меры по совершенствованию рынков, повсеместной цифровизации и повышению уровня электрификации экономики в целом, и в первую очередь транспортного и бытового секторов. Без развития крупномасштабных систем долговременного аккумулирования энергии решить задачу трансформации энергетического сектора невозможно. В настоящее время фактически единственной технологией в этой области является гидроаккумулирование, однако существующих мощностей (160 ГВт [2]) определенно недостаточно для поддержания развития ВИЭ в мире. И хотя электрохимические системы, такие как литий-ионные аккумуляторы, демонстрируют впечатляющие темпы роста и снижения стоимости, они составляют лишь малую долю от общей установленной мощности систем аккумулирования энергии (3.3 ГВт [2]) и в перспективе

могут быть использованы лишь в системах кратковременного хранения энергии и на транспорте.

В этой связи для целей хранения, транспортировки и распределения энергии предлагается использовать вторичные энергоносители, среди которых водород выделяется за счет высочайшей энергоемкости и экологической чистоты. В настоящее время использование водорода в энергетике и для электрификации смежных отраслей рассматривается в рамках концепции «power-to-X», где водород, полученный электролизом воды за счет ВИЭ используется в топливных элементах, для заправки электромобилей, получения синтетических топлив (включая метан) и т.д. Возможности водорода в дальнейшем развитии инновационных чистых и энергоэффективных технологий для преобразования энергетических систем, признается лидерами стран «Группы двадцати» [1]. Это решение возродило интерес к водородным технологиям во всем мире, включая и Россию. Наша страна обладает громадным опытом в развитии водородных энергетических технологий. Создание программы развития новых технологий производства, хранения и использования водорода позволит России достойно ответить на вызовы, стоящие перед российской энергетикой.

Список литературы

1. Осакская декларация лидеров стран «Группы двадцати» 29 июня 2019 года, <http://kremlin.ru/supplement/5425>
2. **REN21**. Renewables 2019 Global Status Report // Paris: REN21 Secretariat, 2019.
3. **IEA**. Status of Power System Transformation 2019 // Paris: IEA, 2019.

Дяченко Ф.В, Петрова Т.И..

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

НОРМЫ КАЧЕСТВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ БАРАБАННЫХ КОТЛОВ СО СТУПЕНЧАТЫМ ИСПАРЕНИЕМ ПРИ ПОЛИАМИННОМ ВХР

Комплексные реагенты на основе пленкообразующих аминов (ПОА) применяют для коррекции качества теплоносителя барабанных энергетических котлов и котлов-утилизаторов энергоблоков с парогазовыми установками (ПГУ) с целью снижения скорости коррозии конструкционных материалов и образования отложений. Одним из широко используемых в комплексных реагентах ПОА является полиамин олеилпропилендиамин. Комплексные реагенты на основе этого полиамина (КРПА) различаются составом: кроме полиамина, они могут содержать подщелачивающие амины, эмульгаторы, восстановители или диспергаторы в разных пропорциях. Производители комплексных

реагентов держат в секрете их точный состав и поставляют уже готовые смеси под различными торговыми марками, такими как Хеламин, Финамин, Цетамин и др. Водно-химический режим с применением комплексного реагента на основе полиамина называется полиаминным водно-химическим режимом (ПАВР). ПАВР с использованием реагентов марки Хеламин носит название хеламинный ВХР.

В 2002 г. был разработан и утвержден Департаментом научно-технической политики и развития РАО "ЕЭС России" первый отечественный нормативный документ по применению КРПА Хеламин [1]. В 2016 г. международная ассоциация по свойствам воды и водяного пара (IAPWS) утвердила первый международный документ по использованию ПОА и продуктов на их основе [2]. Подробный обзор этих и других существующих нормативно-технических документов был представлен на международной конференции "Современные проблемы теплофизики и энергетики" (2017, НИУ "МЭИ", г. Москва) и опубликован [3, 4]. Ни один из этих документов не содержит нормируемых значений, которые были бы разработаны для барабанных энергетических котлов со ступенчатым испарением с учетом разнородных конструкционных материалов конденсатно-питательного тракта (КПТ) при ПАВР.

В докладе рассмотрены показатели качества воды и пара, которые содержатся в действующих отечественных и международных нормативных документах для барабанных котлов, представлены нормируемые значения качества теплоносителя для барабанных энергетических котлов давлением до 16 МПа со ступенчатым испарением в зависимости от наличия сплавов на основе меди в конденсатно-питательном тракте при ПАВР, разработанные на кафедре ТОТ им. М.П.Вукаловича НИУ "МЭИ".

Проведено сравнение предлагаемых норм с результатами химического контроля на двух электростанциях, содержащих медные сплавы в КПТ, а также на двух энергоблоках ТЭС, на которой медные сплавы в КПТ отсутствуют. Отмечено, что предлагаемые нормы дополняют или ужесточают существующие нормы, прописанные в режимных картах, разработанных на основе действующих нормативных документов. Средние значения показателей химического контроля на примере трех ТЭС показывают, что рекомендуемые значения реализуемы, и качество теплоносителя при их соблюдении будет улучшено. Отмечено, что для ТЭС с отсутствием сплавов на основе меди в КПТ, рекомендованы более высокие значения рН питательной воды и конденсата, чем указанные в режимных картах, т.к. существующие режимные карты основаны на правилах ПТЭ [5], в которых прописаны нормируемые значения для гидразинно-аммиачного ВХР. В отсутствие медьсодержащих сплавов в КПТ целесообразнее руководствоваться нормами для аммиачного ВХР, что также учтено при выборе нормируемых значений.

Список литературы

1. РД 153-34.1-37.534-2002 Временный регламент по коррекционной обработке Хеламином теплоносителя котлов давлением 2,4-13,8 МПа (Хеламинный водно-химический режим)
2. IAPWS TGD8-16 "Application of Film Forming Amines in Fossil, Combined Cycle, and Biomass Power Plants", www.iapws.org
3. Dyachenko F.V., Petrova T.I., Cycle water chemistry based on film forming amines at power plants: evaluation of technical guidance documents // Journal of Physics: Conf. Series, №891, p.1-5.
4. Петрова Т.И., Дяченко Ф.В., Использование реагентов на основе пленкообразующих аминов на ТЭС: оценка нормативных документов // Материалы Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 9—11 октября 2017) : в 2 т. Т. 2. — М.: Изд. дом МЭИ, 2017, том 2, с. 171-172.
5. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. М.: СПО ОРГРЭС, 2003

Егорова Н.В.¹, Яковлев А.В.², Никифоров А.Г.³

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

² ООО "Консультационно-экспертный центр", Московская
государственная экспертиза,
125047, г. Москва, ул. 2-я Брестская, д. 8.

³ФГОУ ВПО «Смоленская ГСХА», 214000, г.Смоленск, ул.Большая
Советская, д.10/2.

YegorovaNatV@mpei.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Разработка схем теплоснабжения городов, районов, микрорайонов является важной задачей для обеспечения потребителей качественной тепловой энергией.

Согласно п.6.1[1] "выбор системы теплоснабжения объекта производится на основании утвержденной в установленном порядке схемы теплоснабжения". Принятая схема теплоснабжения должна обеспечивать энергетическую эффективность теплоснабжения и потребления тепловой энергии.

При новом строительстве поселений разрабатываемые схемы тепловых сетей в большинстве своем учитывают экономическую составляющую на начальном этапе, оптимизация схем сводится к определению оптимальных диаметров тепловых сетей (т.е. капитальных затрат на строительство тепловой сети) для наиболее рациональной на интуитивном уровне схемы теплоснабжения.

Наиболее эффективным методом трассировки тепловых сетей [2] является перебор деревьев исходной избыточной схемы и выбор оптимальной подсети в виде дерева. Данный метод успешно применяется при решении задач с заранее намеченным избыточным деревом тепловой сети, представляющий собой построенную исследователем расчетную схему как совокупность всех допустимых вариантов тепловой сети.

Метод перебора деревьев исходной избыточной схемы успешно использовался для нахождения оптимальной конфигурации и параметров тепловых сетей сложной структуры в крупных городах, где требуется учет таких факторов, как необходимость резервирования тепловых сетей, привязки к градостроительному плану, необходимости установки подкачивающих или дросселирующих подстанций при изменяющемся рельефе местности [3].

Разрабатываемый численный эксперимент анализирует перебор возможных трассировок тепловой сети. Начальное состояние системы характеризуется деревом, когда каждый потребитель снабжается от магистральной сети через индивидуальное ответвление, т.е. количество врезок в магистральную сеть равно количеству потребителей. Все остальные состояния генерируются начиная от первого.

Предлагаемый алгоритм предполагает направленный поиск оптимального состояния системы - тепловой сети. Поиск реализуется путем генерирования деревьев тепловой сети на основе сформулированной постановки задачи: необходимо определить группы потребителей, которые снабжаются через общие ответвления и потребителей, снабжаемых через индивидуальные ответвления от магистральной сети. При сравнении генерируемых конфигураций выбирается оптимальное состояние системы. Результаты, полученные при работе алгоритма – оптимальная конфигурация и оптимальные параметры тепловой сети.

Предлагаемый метод выбора схем теплоснабжения позволит определять оптимальную схему теплоснабжения, уменьшать потери тепловой энергии, уменьшать затраты электроэнергии, и, конечно, учитывать экономическую составляющую

Определение оптимальной конфигурации тепловой сети (диаметров, длин участков, потерь давления) определяется путем необходимого количества итераций и выбора наиболее энергоэффективной схемы.

Список литературы:

1. СП 124.13330.2012 Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003.
2. **Сеннова Е.В.,** В.Г.Сидлер. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. – Новосибирск: Наука, 1987.

3. Шифринсон Б.Л., Леонтьева Т.К. Трассировка тепловых сетей // Электрические станции. – 1950. – №3 – С. 6-10.

Егошина О.В., Звонарева С. К.

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»

Россия, 111250 Москва, Красноказарменная, 14

sofi.zvonareva@yandex.ru

ОЦЕНКА НЕОБХОДИМОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТИПОВЫХ ИЗОКИНЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОТБОРА ПРОБ ВОДЫ И ПАРА В СИСТЕМАХ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЭС И АЭС

В настоящее время основными источниками, раскрывающими теоретические основы оснащения паровых стационарных котлов устройствами для отбора проб пара и воды, являются руководящие документы по стандартизации [1].

При отборе пробы должно соблюдаться три условия: Первое – представительность пробы, Второе – поддержание расхода не менее 60 кг/ч. Доказано, что при изменении расхода погрешность определения состава рабочей среды может составить: по меди – 400%, по железу до 200%, по натрию до 70%. При увеличении расхода с 40 до 60 л/ч, погрешность уменьшается до 30-60% [2]. Исходя из вышеизложенного, можно заключить: особое внимание должно быть обращено на обеспечение требуемого расхода пробы. Третье условие - входное сечение зонда выбирают таким, чтобы скорость входа пара в него равнялась скорости пара в пароотводящей трубе при номинальной нагрузке котла. Используемые на данный момент типовые пробоотборные устройства не обеспечивают соблюдение всех условий отбора.

В рамках работы исследована необходимость модернизации изокинетических устройств отбора пробы и были определены: действительный расход отбираемой пробы существующего пробоотборного устройства, требуемый диаметр пробоотборного зонда для обеспечения расхода пробы 60 кг/ч, также были разработаны номограммы, позволяющие определить диаметр входного сечения пробоотборного устройства для обеспечения необходимого расхода пробы.

Объектом исследования являлся перегретый пар трехконтурного котла-утилизатора П-133 на парогазовой установке. Для каждой точки был рассчитан действительный расход пробы на входе в пробоотборное устройство: расход пробы контура низкого и среднего давления не достигает требуемого значения расхода - 60 кг/ч, составляет соответственно 8 и 33 кг/ч, тогда когда расход пробы высокого давления является избыточным – примерно в 2,5 раза выше требуемого.

Полученные результаты приводят к нарушениям в работе систем автоматического и лабораторного химического контроля, а именно недостоверности измерений показателей качества перегретого пара.

Для модернизации типовых пробоотборных устройств предлагаем изменить внутренний диаметр входного отверстия зонда. Результаты расчета перегретого пара контура высокого, среднего и низкого давления представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета требуемого диаметра пробоотборного устройства

Параметр	Ед.	Высокое давление	Среднее давление	Низкое давление
Расход пробы	кг/ч	60	60	60
Диаметр	мм	∅ 8 × 2	∅ 12 × 2	∅ 20 × 2

Таким образом, для контура низкого давления необходимо увеличить диаметр входного отверстия зонда не менее чем на 10 мм, для контура среднего давления необходимо увеличить примерно на 2 мм. В данной работе предлагается рассмотреть необходимость модернизации изокINETических устройств для отбора проб воды и пара в системах химического контроля на ТЭС и АЭС.

Литература

1. 24.031.121-2012 Методические указания. Оснащение паровых стационарных котлов устройствами для отбора проб воды и пара. ОАО "ЦКТИ", 2012.
2. Принципы создания и опытно-промышленное внедрение систем химико-технологического мониторинга на электростанциях. Заключительный отчет: НИР/Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ), Кафедра технологии воды и топлива (ТВТ); Рук.темы В. Н. Воронов . – 2006 . – 21с.

Егошина О.В., Большакова Н.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
[BolshakovaNA@list.ru](mailto:VolshakovaNA@list.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДОЗИРОВАНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ РЕАГЕНТОВ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

В настоящее время значительное внимание уделяется повышению надежности работы энергетического оборудования за счет совершенствования систем химико-технологического мониторинга и совершенствования автоматических приборов химического контроля. Одним из вопросов совершенствования систем химико-технологического мониторинга является изучение влияния типовых нарушений водного

режима на динамику системы автоматического дозирования корректирующих реагентов с последующей компенсацией нарушений в системах автоматического дозирования реагентов.

Наличие внешних возмущений в системе контроля и управления водным режимом таких, как повышение температуры пробы, изменения расхода пробы или ее неудовлетворительное качество приводит к искажению действительных значений показателей качества воды и пара относительно нормируемых значений и нарушению регулирования в системе автоматического дозирования корректирующих реагентов.

Задачей данной работы было изучить влияние основных типов нарушений водных режимов на динамику систем автоматического управления водно-химическим режимом при дозировании аммиака и аминоксодержащего реагента; определить наиболее существенное возмущение и разработать систему автоматического дозирования корректирующих реагентов с компенсацией влияния нарушений химико-технологических процессов в системе автоматического химического контроля.

В результате выполненного исследования была разработана система автоматического дозирования корректирующих реагентов с компенсацией изменения параметров пробы и расхода питательной воды применительно к водно-химическим режимам на ТЭС с парогазовыми установками и практически обоснована возможность использования данной системы на ТЭС в номинальном и переменных режимах работы энергетического оборудования. Произведено моделирование компенсации изменения параметров пробы и расхода питательной воды в системе автоматического дозирования корректирующих реагентов. В результате данной работы снижено отклонение нормируемого показателя рН в соответствии с диапазоном нормативного значения рН питательной воды на ТЭС с энергоблоками ПГУ.

Егошина О.В., Звонарева С. К.

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»
Россия, 111250 Москва, Красноказарменная, 14

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ ИЗОКИНЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОТБОРА ПРОБ ВОДЫ И ПАРА В СИСТЕМАХ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЭС И АЭС

По отечественным и зарубежным данным[1] до 60% всех случаев вынужденных остановов энергоблоков связано с нарушением качества воды и пара. Внезапные или кратковременные нарушения качества воды или пара могут быть надежно зафиксированы только при непрерывном отборе проб и наличии автоматических аналитических приборов

непрерывного действия. Важнейшим требованием к отбору пробы является представительность пробы, она достигается выбором конструкции и места расположения пробоотборных устройств. В настоящее время основными источниками, раскрывающими теоретические основы оснащения паровых стационарных котлов устройствами для отбора проб пара и воды, являются руководящие документы по стандартизации [2].

Традиционно предъявляются требования к отбору пробы воды и пара. С одной стороны, проба должна быть представительной, с другой стороны, должен быть обеспечен расход пробы не менее 60 кг/ч. Обеспечение расхода пробы не менее важная задача, чем представительность пробы.

Исследования влияния расхода пробы на погрешность определения показателей качества рабочей среды показали, что при изменении расхода с 20 до 60 кг/ч ошибка измерения концентрации (в области 0-5 мкг/кг) может составить: по меди – 400%, по железу до 200%, по натрию до 70%. При увеличении расхода с 40 до 60 л/ч, погрешность уменьшается до 30-60% по продуктам коррозии [1]. Исходя из вышеизложенного, можно заключить: особое внимание должно быть обращено на обеспечение требуемого расхода пробы.

В рамках работы исследована возможность разработки изокинетических устройств отбора пробы и были определены: действительный расход отбираемой пробы существующего пробоотборного устройства, требуемый диаметр пробоотборного зонда для обеспечения расхода пробы 60 кг/ч. Объектом исследования являлся теплоноситель трехконтурного котла-утилизатора П-133 на парогазовой установке. В контуре высокого давления рассмотрены две пробоотборные точки. Отбор насыщенного пара производился однососковым зондом, а отбор пароводяной смеси - трубчатым зондом. В контуре среднего давления рассмотрены две пробоотборные точки. Отбор насыщенного пара производится однососковым зондом, а отбор котловой воды - трубчатым зондом. Результаты расчета насыщенного пара контуров высокого и среднего давления представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета требуемого диаметра пробоотборного устройства для насыщенного пара контура высокого и среднего давления

Параметр	Ед.	Высокое давление	Среднее давление
Расход пробы	кг/ч	60	60
Диаметр	мм	Ø 8 × 2	Ø 12 × 2

Исходя из табл. 1 видно, для обеспечения расхода пробы, равного 60 кг/ч необходимо для среднего давления диаметр пробоотборной трубки увеличить на 2мм. Следовательно, использование стандартных зондов для отбора проб насыщенного пара [2] не обеспечивает требуемого расхода.

В данной работе предлагается рассмотреть возможность использования изокинетических устройств для отбора проб воды и пара в системах химического контроля на ТЭС и АЭС. Необходимо модернизировать стандартные конструкции зондов с учетом отбора пробы теплоносителя для различных уровней давлений.

Литература

1. Принципы создания и опытно-промышленное внедрение систем химико-технологического мониторинга на электростанциях. Заключительный отчет: НИР/Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ), Кафедра технологии воды и топлива (ТВТ); Рук.темы В. Н. Воронов. – 2006. – 21с..
2. РД 24.031.121-2012 Методические указания. Оснащение паровых стационарных котлов устройствами для отбора проб воды и пара. ОАО "ЦКТИ", 2012.

Ермак Д.Е.¹, Загородний И.В.²

¹Сибирский Федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
²ООО «СГК», АО «Красноярская ТЭЦ-1»,
660004, г. Красноярск, ул. Фестивальная, 2
zigzagorodniy@gmail.com

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ ШЛАКОВАНИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Разработка системы технической диагностики процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева пылеугольных паровых котлов, функционирующая в режиме online на основе интерпретации штатной информации АСУ ТП и научно-обоснованных алгоритмов обработки балансовых уравнений для оценки тепловой эффективности радиационных, полурadiационных и конвективных поверхностей нагрева. Система реализована на уровне алгоритмического и программного обеспечения на языке программирования C#, встроенную в действующую систему АСУ котельного агрегата.

Для оценки интенсивности шлакования наиболее оптимальным с точки зрения он-лайн измерений является измерение коэффициента тепловой эффективности Ψ и коэффициента загрязнения ε для поверхностей нагрева в силу их нормируемости и безразмерности. Оценка коэффициента тепловой эффективности осуществляется по следующему соотношению:

$$\psi = \frac{K_{\text{факт}}}{K_{\text{чист}}},$$

где $K_{\text{факт}}$ – фактический коэффициент теплопередачи реальной поверхности нагрева, кВт/(м² С); $K_{\text{чист}}$ – коэффициент теплопередачи для чистой поверхности, кВт/(м² С).

Фактический коэффициент теплопередачи находится последующему уравнению 2:

$$K_{\text{факт}} = \frac{Q_{\text{факт}} B_p}{F \Delta t}$$

где F – площадь поверхности нагрева, м²; Δt – среднелогарифмический температурный напор, °С; $Q_{\text{факт}}$ – фактическое тепловосприятие поверхности нагрева, кДж/кг; B_p – расчетный расход топлива, кг/с.

Проект направлен на повышение надежности и эффективности работы паровых котлов путем оперативного поддержания поверхностей нагрева в эксплуатационном чистом состоянии, обеспечивающим оптимальные режимные характеристики основного технологического оборудования.

Желяскова О.И.¹, Султанов М.М.¹, Шестопалова Т.А.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Волжский, 404110, проспект Ленина, 69

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
opp77@bk.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА БАЗЕ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ НАДЕЖНОСТИ

С развитием теплоустановок возникает проблема транспортировки энергии потребителям. В связи с изношенностью энергетического оборудования выдача мощности производится не в полной мере во многих районах потребления.

Применение гибридных энергокомплексов является основным способом увеличения качества выдачи энергии, а также повышения пропускной способности. В пособии [1] предложен алгоритм оценки внедрения новых источников генерации. Основными действиями предложенного алгоритма являются:

- а) выбор мощности и местонахождения нового источника малой генерации;
- б) определение ближайших потребителей электрической энергии;
- в) создание схемы линий электропередачи от источника малой генерации до потребителя с расчетом в ней потерь;

г) определение существующих линий, подходящих к потребителю;
д) расчет потерь в линиях электропередачи от действующего источника генерации до потребителя при уменьшении выдаваемой мощности вследствие ввода малой генерации;

е) определение, на сколько уменьшились потери в электрических сетях после внедрения малой генерации;

ж) расчет сэкономленного топлива на тепловой станции в результате уменьшения выдаваемой мощности.

Разработана программа [2] по расчету и построению графиков энергетической системы. На рисунке 1. представлен график построенный в программе по рассчитанным данным, который наглядно демонстрирует пиковые нагрузки и их провалы, предназначенный для анализа и выбора загрузки оборудования.

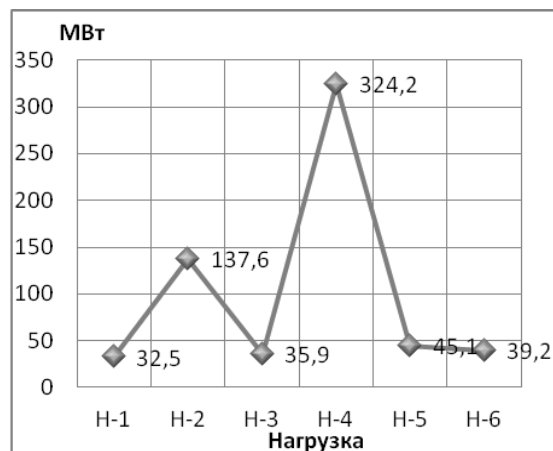


Рис. 1. График активной нагрузки энергосистемы (укрупненной до 6-ти потребителей)

Совместная работа указанного алгоритма с разработанной программой позволит в полной мере проводить моделирование процесса передачи мощности от генерирующих объектов к потребителям. Также позволит оценить возможность передачи энергии и тепла в отдельных участках энергосистемы и уточнить пропускную способность с точки зрения надежности.

В ходе применения математической модели оперативного расчета пропускной способности при внедрении новых мощностей на ТЭЦ могут быть выявлены закономерности прогнозирования пропускной способности с целью снижения инвестиционных затрат по необоснованному развитию линий электропередач, а также определению качественного подхода там, где необходимо повысить безопасность и надежность.

Список литературы

1. Исследование энергетической эффективности генерирующих систем в современных условиях энергопотребления: учебно-методическое пособие / М.М.Султанов, О.И. Желяскова, И.Л. Рига. Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2019. 59 с.
2. Султанов М.М., Желяскова О.И. Программа расчета параметров и построения графиков энергетической системы. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Свидетельство №2019667320 от 23.12.2019.

Зайцев Н.О., Климчук А.А.
Одесский национальный политехнический университет,
Одесса, 65002, пр. Шевченко, 1
zaitsevnikita@ukr.net

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЖАРОТРУБНЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

В любой развитой стране остро стоит проблема обеспечения населения топливно-энергетическими ресурсами. При этом изношенность тепловых сетей, теплогенерирующего оборудования и, соответственно, не соответствие услуг, предоставляемых потребителю, вынуждает последнего отказываться от централизованного теплоснабжения в пользу децентрализованного. Также централизованное теплоснабжение инерционно ввиду технических особенностей (отсутствие соответствия количества генерируемого тепла требуемому потребителями).

Эта проблема решается путем установки индивидуальных теплогенерирующих установок. Однако, учитывая Европейский опыт, когда при проектировании и эксплуатации децентрализованных систем теплоснабжения основное внимание уделяется не капитальным затратам, а эксплуатационным, необходимо констатировать, что теплогенерирующие установки малой мощности большую часть времени работают не в номинальном режиме ввиду особенностей подбора оборудования.

Наиболее перспективно направление по увеличению коэффициента использования топливных ресурсов именно в нестационарных режимах.

Для повышения эффективности работы теплогенерирующей установки путем управления полем скорости и равномерного распределения температуры по объему топки при изменении тепловой нагрузки предложено выполнять подачу предварительно (полностью или частично) смешанного топлива с окислителем в топку двумя соосными струями – осевой прямоточной и закрученной коаксиальной, внешней к осевой. При этом степень крутки внешней струи может варьироваться от $0,3 < S < 1,2$, что соответствует развитию струи от слабо закрученной до сильно закрученной с развитой центральной областью обратных токов.

Варьирование дальнобойности результирующей струи при предложенном взаимодействии осуществляется изменением расхода в осевой прямоточной струе. Кроме того, указанный диапазон крутки внешней струи позволяет регулировать либо тормозить, либо увеличивать скорость осевой струи, что позволяет получить равномерное распределение скорости и температуры в топке жаротрубного котла, то есть исключить зоны недогрева или перегрева при изменении тепловой нагрузки котла.

В данной работе выполнено экспериментальное исследование поля скорости изотермического и неизотермического взаимодействия коаксиальных осевой прямоочной и внешней закрученной струй.

Полученные результаты подтверждает возможность управления полем скорости и распределением температуры при изменении суммарного расхода топлива и окислителя. Также в работе показано соответствие температурного поля скоростному при взаимодействии неизотермических струй.

Список литературы

1. **Averkova, O.A., Logachev, I.N., Logachev, K.I., Zaytsev, O.N.** Cross-flow of air through sealed elevator enclosures. 5th International Conference on Particle-Based Methods – Fundamentals and Applications, PARTICLES (2017) 33-44.

2. **Zaytsev O.N., Lapina E.A.** Increasing the efficiency of the condensing boiler. The International Conference "Problems of Thermal Physics and Power Engineering" (РТПРЕ-2017). 891 (2017).

Зайцев О.Н.¹, Егоров С.А.¹, Цыплина А.А.¹

¹ Крымский федеральный университет им. В.И.Вернадского,
Симферополь, 295493, Киевская, 181
zon071941@mail.ru

КОМБИНИРОВАННАЯ АВТОНОМНАЯ УСТАНОВКА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В ЖИДКОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ

В современных условиях в любой развитой и развивающейся стране остро стоит проблема утилизации твердых бытовых отходов, в частности, пластмассы, как наиболее токсичных материалов. Особенно эта проблема актуальна в отдаленных поселениях и усугубляется отсутствием отдельного сбора отходов. низкой плотностью населения, а обеспечение топливно-энергетическими ресурсами происходит периодически. При этом получение генераторного газа при переработке таких отходов вызывает сложности в его использовании и хранении.

Наиболее рациональной представляется схема с утилизацией отходов и получением топлива, пригодного для работы бытовых водогрейных котлов в жидкой фазе.

Предложена комбинированная автономная установка по переработке пластмассовых отходов, характеризуется тем, что, состоит из соосно расположенных коаксиальной камеры для загрузки сырья, которая расположена концентрично относительно осевой трубы по отводу дымовых газов, газовой горелки для нагрева данной емкости, установленных на платформу, соединительной трубы от камеры загрузки

сырья к охладителю. При этом охладитель и отстойник для топлива соединены между собой трубкой в 1.25-1.3 раза меньшего диаметра, чем труба между камерой загрузки и охладителем, а сам отстойник имеет два выхода для теплоносителя и установлен на платформу конусного типа.

Выполнено экспериментальное исследование для определения температурных режимов работы предложенной установки.

Получены данные о производительности установки – из 1 кг пластмассы получено 0,5 кг жидкого топлива. Также определена низшая теплота сгорания полученного топлива – $Q=51,7$ МДж/кг.

В результате выполненных экспериментов получены адекватные уравнение регрессии для распределения температуры в установке в начальной стадии ее работы (при расплаве отходов), основной стадии – испарении в камере загрузки сырья и конденсации летучих в теплообменнике и последней стадии – охлаждения установки.

Получены данные по изменению давления на различных стадиях работы установки и расходу топлива для образования летучих из загруженного в камеру сырья.

Список литературы

1. Zaytsev O.N., Lapina E.A. Increasing the efficiency of the condensing boiler. The International Conference "Problems of Thermal Physics and Power Engineering" (PTPPE-2017). 891 (2017).

2. Shtym A.N., Shtym K.A., Dorogov E.Y. Boiler installations with cyclone pretopacks: monograph. Publishing House Dalnevostsialmash, 2012.

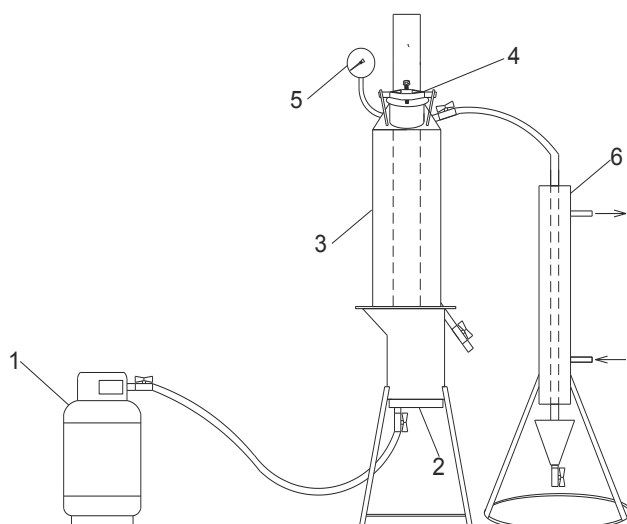


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки по переработке твердых отходов в жидкое топливо: 1 - Топливо для переработки сырья; 2 – Горелки для нагрева сырья в загрузочной камере; 3 – Загрузочная камера; 4 – Крышка загрузочной камеры; 5 – Манометр; 6 – Теплообменник.

Замалеев М.М., Губин И.В., Абрамов А.В., Яковлев А.А.
Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ),
Ульяновск, 432027, ул. Северный Венец, 32
gubin_igor_91@mail.ru

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛА ТЭЦ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЕЁ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Повышение энергетической эффективности теплоэлектростанций (ТЭЦ) всегда являлось первостепенной задачей для развития теплоэнергетической отрасли.

Однако принципы функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ), не учитывающие расстояние передачи электроэнергии от электростанции до потребителя, существенно осложняют возможности ТЭЦ конкурировать с другими источниками электроэнергии, такими как АЭС, ГЭС и ГРЭС. Происходит это в связи с тем, что, несмотря на расположение ТЭЦ в центре нагрузок, тарифы на электроэнергию включают в себя транспортную составляющую, сопоставимую со стоимостью производства электроэнергии. Вместе с этим происходит падение отпуска теплоты от ТЭЦ с горячей водой и технологическим паром, что приводит к сокращению выработки электроэнергии на тепловом потреблении и снижению тепловой экономичности.

Решением поставленной проблемы является расширение функционала ТЭЦ, за счет использования энергетического потенциала теплоэлектростанций в городской инженерной инфраструктуре. Это обусловлено возможностью комбинированного производства тепловой и электрической энергии, а также продукции и услуг, необходимых в городском коммунальном хозяйстве.

Повышение энергетической эффективности ТЭЦ может быть обеспечено за счет реализации следующих технологий:

- утилизация вывозимого с улиц снега за счет использования низкопотенциальных источников тепловой энергии;
- применение городских ТЭЦ в схеме подготовки питьевой воды системы централизованного холодного водоснабжения;
- включение в цикл работы ТЭЦ мусоросжигательных заводов (МСЗ) с целью повышения эффективности процесса утилизации мусора.

Эффективная утилизация вывозимого с городских улиц снега может быть реализована за счет использования стационарной снегоплавильной установки (ССУ), расположенной на ТЭЦ. Основными преимуществами такого решения являются: возможность использования в качестве греющего агента ССУ низкопотенциальных тепловых потоков; транспортная доступность, связанная с размещением ТЭЦ в черте города; наличие на ТЭЦ цехов химической очистки воды; наличие

на ТЭЦ относительно чистых стоков, например, продувочной воды оборотных систем технического водоснабжения, для организации ее смешения с загрязненной талой водой с последующим сбросом в городскую канализацию.

Одним из вариантов совместного использования инженерной инфраструктуры централизованного тепло- и водоснабжения потребителей является применение городских ТЭЦ в схеме подготовки питьевой воды системы централизованного холодного водоснабжения. Предложенная технология осуществляется путем включения конденсатора паровой турбины ТЭЦ (мини-ТЭЦ) по охлаждающей среде в трубопровод исходной или очищенной питьевой воды перед подачей в систему централизованного холодного водоснабжения. Таким образом, обеспечивается подогрев исходной воды перед водоочистными сооружениями или повышение температуры холодной питьевой воды перед подачей потребителям. Использование исходной или очищенной питьевой воды в качестве охлаждающей среды в конденсаторе позволяет увеличить выработку электроэнергии на тепловом потреблении.

Повышение энергетической эффективности ТЭЦ может быть достигнуто за счет включения в ее цикл мусоросжигательного завода. Такое решение имеет ряд преимуществ как для самой теплоэлектроцентрали, так и для коммунальной сферы: наличие низкопотенциальных источников теплоты, пригодных для «мягкой» сушки отходов и увеличения их калорийности; снижение капитальных затрат на строительство мусоросжигательного завода; транспортная доступность, связанная с размещением ТЭЦ в черте города и снижение расхода топлива на вывоз отходов; возможность использования котлов ТЭЦ для термического разложения токсичных газов; возможность использования создаваемой инфраструктуры для круглосуточной энергоэффективной и экономически выгодной утилизации отходов.

Расширение функционала ТЭЦ за счет комбинирования выработки тепловой и электрической энергии и технологических процессов, необходимых для городского хозяйства, позволяет максимально эффективно использовать существующую инфраструктуру тепловой электрической станции и повысить ее энергетическую эффективность.

Замалеев М.М., Камалова Р.И., Пазушкина О.В.
Ульяновский государственный технический университет,
Ульяновск, 432027, Северный Венец, 32
752479@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ДЕСОРБЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА ИЗ ВОДЫ УХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ КОТЛА

Процесс удаления коррозионно-активных газов из питательной воды для котельных установок тепловых электрических станций является сложным синтезом одновременного протекания двух его составляющих – теплообмена и массообмена. Теплообмен являет собой процесс нагрева деаэрируемой воды до температуры насыщения. Массообмен обеспечивается выделением коррозионно-агрессивных газов из деаэрируемой воды в паровую среду. Водяной пар при этом считается традиционным видом десорбирующего агента и на сегодняшний момент является единственной широко применяемой средой, обеспечивающей процесс дегазации питательной воды котлов и подпиточной воды теплосети.

Необходимость дополнительных затрат пара на деаэрацию в цикле работы тепловых электрических станций, дополнительные потери теплоты с выпаром деаэратора являются неизбежными недостатками метода термической деаэрации, обеспечивая тем самым потребность в поиске новых энергетически эффективных способ деаэрации воды.

Научно-исследовательская лаборатория «Теплоэнергетические системы и установки» Ульяновского государственного технического университета предлагает различные решения для повышения энергоэффективности процесса деаэрации воды [1, 2]. Одним из перспективных направлений разработок в данной сфере является повышение тепловой экономичности процесса деаэрации с применением нетрадиционных низкотемпературных сред в качестве десорбирующего агента.

Одним из таких решений является использование в деаэраторе в качестве десорбирующего агента уходящих газов котла, работающего на природном газе [3].

Данная технология предложена для реализации процесса дегазации питательной воды с использованием атмосферного деаэратора. При этом не требуется существенного изменения конструкции самого аппарата, необходимо только обеспечить подвод десорбирующей среды к колонке деаэратора.

Для оценки массообменной и энергетической эффективности данного решения произведен расчет теоретически необходимого удельного расхода десорбирующего агента для удаления из воды растворенного

кислорода $d_{\text{газа}}^{\text{min}}$, кг/т. Расчет выполняется на основе решения балансовых уравнений процессов массообмена и теплообмена при термической деаэрации при условии, что на выходе из деаэратора достигается равновесие между фазами [4]. При этом принимается, что максимальная массообменная и энергетическая эффективность термического деаэратора достигается при минимально возможных расходах десорбирующего агента и смеси выделившихся газов, выпускаемым деаэратором.

Уходящие газы котла практически не содержат кислорода вследствие его полного расходования на процесс горения топлива (природного газа) в топке котла. В связи с несовершенством аэродинамики топочных устройств и невозможностью идеального (т.е. на молекулярном уровне) смешения топлива и окислителя в реальных условиях, для полного сгорания топлива необходимо несколько большее количество воздуха, чем теоретический объем воздуха, полученный из стехиометрических уравнений горения. Концентрация кислорода в десорбирующем агенте на выходе из деаэратора зависит от схемы движения воды и пара в аппарате.

Отметим, что область применения предложенного технического решения достаточно ограничена. Наибольшая эффективность может быть достигнута при нестехиометрическом сжигании природного газа [5].

Разработка описываемого метода дегазации воды также включает в себя решение проблемы избыточного содержания двуокиси углерода в уходящих газах и ее негативного воздействия на качество деаэрированной воды. Для нейтрализации угольной кислоты в деаэрированной воде предлагается дозирование в трубопровод питательной воды щелочного реагента, например, гидроксида натрия.

Список литературы

1. Подготовка подпиточной воды систем теплоснабжения с применением вакуумных деаэраторов / В.И. Шарапов. М.: Энергоатомиздат, 1996. 176 с.
2. Справочно-информационные материалы по применению вакуумных деаэраторов для обработки подпиточной воды систем централизованного теплоснабжения / В.И. Шарапов. М.: СПО ОРГРЭС, 1997. 20 с.
3. **Шарапов В.И., Камалова Р.И., Кудрявцева Е.В., Рогачев С.С.** Котельная установка // Патент на изобретение RU 2629321 C1. Изобретения полезные модели. 2017. №25.
4. Термические деаэраторы / В.И. Шарапов, Цюра Д.В. Ульяновск: изд-во УлГТУ, 2003. 560 с.
5. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях / Росляков П.В., Закиров И.А. М.: Издательство МЭИ, 2001.

Зенина Е.Г.¹, Стрижиченко А.В.¹, Ефимов В.В.

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Волжский, 404110, проспект Ленина, 69
zeninaeg@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ПРИМЕРЕ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Повреждения силовых трансформаторов электростанций и подстанций оказывают значительное влияние на надежность электроснабжения в целом. Поэтому своевременное обнаружение развивающихся дефектов силовых трансформаторов является важной задачей и может применяться в современных системах контроля показателей технического состояния электрооборудования.

В настоящее время непрерывная оценка технического состояния силовых трансформаторов ведется по комплексу контролируемых показателей и их нормированным значениям, закрепленным в РД 34.45-51.300-97 Объем и нормы испытания электрооборудования. Эти мероприятия показали достаточно хорошую эффективность при использовании в процессе периодических и плановых испытаний при эксплуатации оборудования электростанций. Однако в настоящее время в действующей системе нормативно-технической документации не закреплены требования и нормативы по выявлению и количественной оценке параметров, которые могут своевременно обнаружить возникающие дефекты и процессы, приводящие к их развитию.

В данной работе проанализированы существующие нормативно закрепленные показатели технического состояния силовых трансформаторов. Выявлены дополнительные показатели, позволяющие оценить состояние силового трансформатора. Проведен анализ предложенной системы непрерывного мониторинга на основе применения дерева отказов для выявления уязвимых мест и вероятных сценариев развития аварийной ситуации. При анализе развития аварийных сценариев учтены не только внутренние факторы и физические, тепловые процессы, но и возможные внешние факторы, воздействующие на рассматриваемое оборудование. На основе вероятностного подхода рассмотрены вероятности перехода между состояниями системы и математические ожидания попадания в данное состояние.

Предложены дополнительные показатели и их количественные оценки, позволяющие своевременно принимать решение о выводе

оборудования в ремонт до наступления критических изменений в техническом состоянии трансформатора без угрозы взрыва или пожара.

Зиганшина С.К., Кудинов А.А., Хусаинов К.Р.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Самара, 443100, Молодогвардейская, 244, Главный корпус, кафедра ТЭС
svet.zig@yandex.ru

ОТВОД УХОДЯЩИХ ГАЗОВ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ПГУ В АТМОСФЕРУ ЧЕРЕЗ ВЫТЯЖНУЮ БАШНЮ ГРАДИРНИ

С целью повышения экономичности парогазовой ТЭС предложено осуществлять отвод уходящих газов котла-утилизатора (КУ)

газотурбинной установки (ГТУ) в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной вентиляцией воздуха (рис. 1) [1]. По методике, изложенной в [2, 3], выполнен расчет башенной градирни ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ. В состав ПГУ-200 входят две ГТУ PG6111FA, два паровых котла-утилизатора КУП-110/15-8,0/0,7-540/200 и одна паровая турбина Siemens SST-600 (мощностью 60/75 МВт в теплофикационном и конденсационном режиме соответственно) с генератором S-GEN5-100.

Расчет башенной градирни выполнен для двух случаев: без применения и с применением отвода уходящих газов от двух котлов-утилизаторов ПГУ-200 в атмосферу через вытяжную башню градирни в количестве $G_T=380$ кг/с. Анализ результатов расчетов показал, что при применении отвода уходящих газов от котлов-утилизаторов в атмосферу через вытяжную башню градирни возрастают температура отводимого воздуха (смеси воздуха с газами) с 28 до 39 °С, общий коэффициент сопротивления градирни $\xi_{\text{общ}}$ с 45,5 до 53,5, самотяга Δp с 24,47 до 55,24 Па, скорость воздуха с 0,92 до 1,29 м/с, расход воздуха с 1929,8 до 2642,9 кг/с. При этом температура циркуляционной воды на выходе из градирни снижается с 29,5 до 27 °С, что обеспечивает более глубокий вакуум в конденсаторе паровой турбины парогазовой установки [3].

Расход топлива (природного газа) в камеру сгорания одной ГТУ,

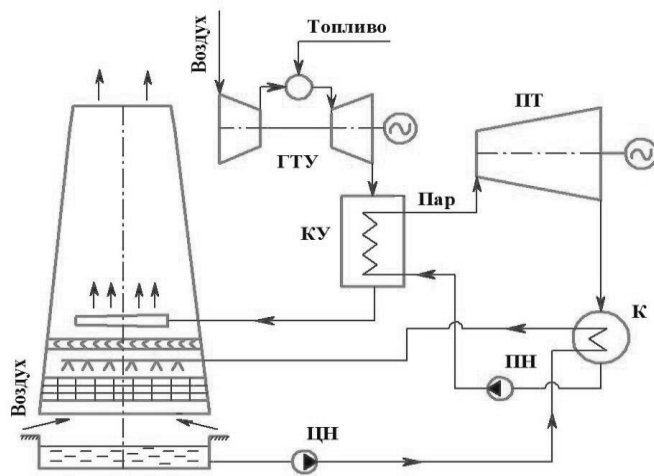


Рис. 1. Тепловая схема ПГУ с отводом дымовых газов от котла-утилизатора в атмосферу через вытяжную башню градирни

работающей на номинальном режиме, равен $B_{\text{ГТУ}}=4,24$ кг/с, мощность $N_5^{\text{ГТУ}}=73,65$ МВт, электрический КПД ГТУ $\eta_5^{\text{КПД}}=35,2\%$. Температура газов на входе в котел-утилизатор и на выходе из него 425 и 91 °С соответственно. Начальные и конечные параметры водяного пара: $p_0=7,56$ МПа, $t_0=400$ °С, $p_k=0,005$ МПа, $t_k=32,88$ °С. При дополнительном понижении температуры циркуляционной воды на 2,5 °С $t_k=30,38$ °С, $p_k=0,00434$ МПа.

Определено, что при осуществлении отвода уходящих газов от двух котлов-утилизаторов ПГУ Сызранской ТЭЦ в атмосферу через вытяжную башню градирни повышаются термический КПД цикла Ренкина паросиловой установки на 0,25% (с 39,77 до 40,02%), КПД паротурбинной установки на 0,205% (с 32,628 до 32,833%), КПД парогазовой установки на 0,107% (с 52,114 до 52,221%), при этом удельный расход условного топлива уменьшается на 0,48 г/(кВт·ч) (с 236,02 до 235,54 г/(кВт·ч)).

Для ПГУ Сызранской ТЭЦ мощностью 192,25 МВт экономия условного топлива составит 0,09228 т/ч. При стоимости условного топлива 4700 руб/т.у.т и наработке ПГУ 6500 ч/год экономическая эффективность за счет отвода уходящих газов от котлов-утилизаторов в атмосферу через вытяжную башню градирни составит 2 млн. 819 тыс.руб/год.

Список литературы

1. Патент на изобретение № 2453712 РФ. МПК⁷ F 01 K 23/10. Парогазовая установка электростанции / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, С.П. Горланов // Бюл. № 6, 2012. 6 с.
2. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1998. 376 с.
3. Кудинов А.А., Зиганшина С.К., Горланов С.П. Повышение эффективности парогазовой ТЭС путем отвода уходящих газов котла-утилизатора ГТУ в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной вентиляцией воздуха // Промышленная энергетика. 2017. № 3. С. 33-38.

Зройчиков Н.А.¹, Пай А.В.¹, Степанов С.Ю.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
PaiAV@mpei.ru

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТОВ КАВИТАТОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS FLUENT С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В России и странах СНГ на большинстве ТЭС мазут является резервным топливом, и основным для регионов, расположенных в удалении от газовых магистралей [1].

Использование мазута осложняется его обводнением в процессе приемки и длительного хранения, а также нестабильным горением при грубодисперсном распределении влаги в объеме мазута.

Для устранения негативного воздействия влаги на работу котельных установок применяются эмульгирующие устройства - кавитаторы. Конструкция плоского проточного гидродинамического кавитатора [2] представлена на рисунке 1.

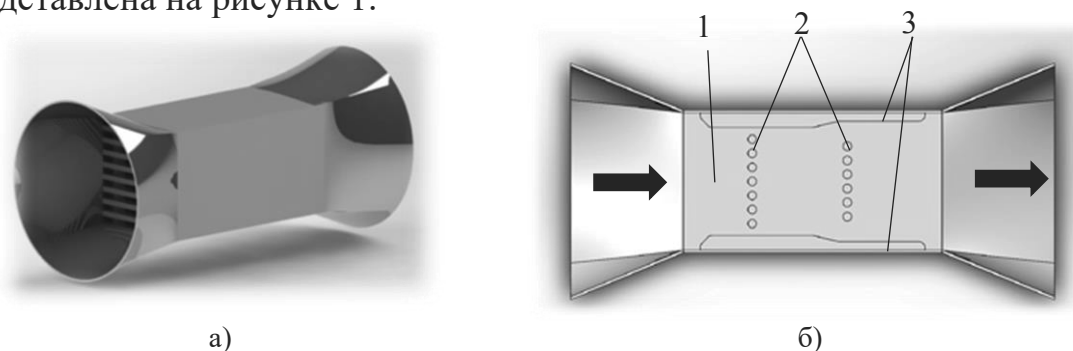


Рис. 1. Устройство кавитатора: а – общий вид, б – проточная часть в центральном сечении: 1 – профилированный канал, 2 – регулирующие стержни (тела кавитации), 3 - направляющие

Работа устройства основана на кавитации и турбулизации потока. В результате обтекания средой неподвижно закрепленных тел возникают кавитационные и волновые явления, которые интенсифицируют процесс диспергирования. Благодаря чему достигается устойчивая мелкодисперсная водо-мазутная эмульсия.

Выполнено численное моделирование кавитатора в программном комплексе ANSYS FLUENT и верификация результатов с данными натурных испытаний физической модели. Результаты моделирования показывают, что потери давления на устройстве составляют $\Delta P=0.23$ МПа. На рисунке 2 представлен градиент давлений в кавитаторе.

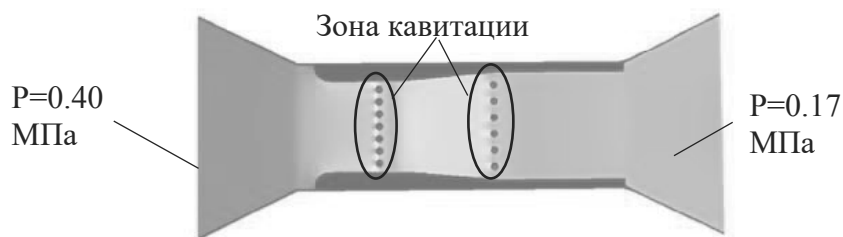


Рис. 2. Градиент давлений в центральном сечении кавитатора

Полученные значения хорошо соотносятся с данными натурных испытаний [2], где при полностью вставленных регулирующих стержнях потери составили $\Delta P = 0,24$ МПа. Расхождение полученных значений не превышает $\Delta = 5\%$.

Полученная математическая модель используется для многовариативной оптимизации проточной части кавитатора с целью минимизации гидравлических потерь и повышения интенсивности процесса кавитации.

Список литературы

1. Назмеев Ю.Г. Мазутные хозяйства ТЭС М.: Изд-во МЭИ, 2002. 612 с.
2. Сжигание водомазутной эмульсии в паровых котлах ТЭЦ-23 ОАО МОСЭНЕРГО в сочетании с режимными и технологическими мероприятиями / Н. А. Зройчиков, М. Г. Лысков, В. Б. Прохоров, И. В. Галас // Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: информационный сборник. М: Издательский дом МЭИ, 2007. С. 192-196.

Зройчиков Н.А.^{1,2}, Каверин А.А.², Василенко А.М.²

¹ Акционерное общество «Энергетический институт
им. Г. М. Кржижановского»,

119071, Москва, Ленинский пр-т, 19

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

alexander_7@bk.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ АЭРОДИНАМИКИ ВОЗДУХОВОДОВ КОТЛА ПК-14 МЕТОДАМИ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Современное состояние отечественного теплоэнергетического оборудования на действующих объектах характеризуется значительным износом и низкими показателями экономичности и экологической безопасности. Сказанное выше справедливо в частности и для действующих котельных установок. Нередко котельные агрегаты вынуждены работать с повышенными избытками воздуха из-за неравномерной раздачи воздуха по горелкам, что приводит к снижению КПД брутто и нетто котла, а также увеличению выбросов оксидов азота. Решить данную проблему возможно за счёт оптимизации конструкции и трассировки воздухоподводящих коробов.

Выбор оптимальной конструкции воздухоподводящих коробов производится на основании предварительных модельных исследований. В России и мире хорошо зарекомендовали себя физическое и математическое (численное)

моделирование аэродинамики участков воздушного тракта котлов. Физическое моделирование основано на теории подобия, при исследовании на изотермической физической модели с развитым турбулентным режимом течения модельной среды достаточно обеспечения равенства критерия Эйлера и геометрического подобия физической модели и реального объекта [1]. Численное моделирование основано на системе дифференциальных уравнений сохранения потока, а также добавляемых отдельно уравнений, учитывающих турбулентность потока [2]. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки и

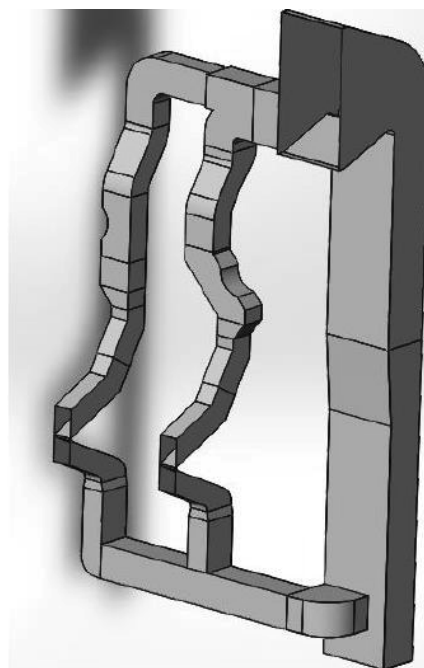


Рис. 1. 3D модель участка
воздушного тракта котла
ПК-14 с раздачей воздуха
на две газовые горелки

не может рассматриваться как более достоверный или самодостаточный. Наибольший эффект достигается при комбинированном применении двух указанных методов исследования.

В данной работе исследуется аэродинамика воздушного тракта котла ПК-14. Котёл паровой, с естественной циркуляцией, имеет 4 газовые плоскофакельные горелки, установленные в 1 ярус на боковых стенах топки. Участок воздушного тракта котла, характеризующий раздачу воздуха на горелки одной боковой стены, показан на рис. 1. Как видно из рисунка, участок характеризуется разной длиной и конфигурацией нижних и верхних воздушных ниток. Ситуация осложняется совместным сжиганием на котле природного и доменного газа. Неравномерность раздачи воздуха по горелкам природного газа доходит до 20%, доменного до 40%. Т.о. для поддержания стабильного выгорания топлива приходится увеличивать избыток воздуха до значений 1.3 и выше.

В работе методом численного моделирования исследуются варианты оптимизации данного участка и определяется степень неравномерности раздачи воздуха по горелкам. В дальнейшем предполагается верификация результатов численного моделирования наиболее оптимального варианта на физической модели.

Список литературы

1. Кирпичев М.В. Теория подобия – М.: Изд-во АН СССР, 1953, 96 с.
2. ANSYS Fluent 18.2 / Theory guide

*Зубков А.Г.², Зорин В.М.¹, Аникеев А.В.¹, Семченков Ю.М.², Силин В.А.²,
Олексюк Д.А.²*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, 123098, пл. Академика Курчатова, 1
antonzubkov97@yandex.ru

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ АКТИВНЫХ ЗОН СКД РЕАКТОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛИКА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СТЕНДА

подавляющее большинство ядерных энергетических реакторов, работающих на данный момент в мире – это реакторы, охлаждаемые водой. В настоящий момент в рамках международного форума Generation IV разрабатываются водоохлаждаемые реакторы следующего поколения (поколения 4) со сверхкритическими параметрами теплоносителя.

Среди мировых разработок реакторов сверхкритического давления (СКД) преобладает одноконтурная тепловая схема с околокритической температурой на входе в активную зону (АЗ) и значительно выше

критической на выходе из АЗ (CSR1000, HPLWR, ВВЭР-СКД-1700 и др.) [1]. Высокие температуры теплоносителя и его большой подогрев в АЗ приводят к многозаходным схемам циркуляции, а сильное изменение плотности – к сложным конструкциям ТВС. Вкупе со сложностью процессов теплообмена в области псевдофазового перехода возникают вопросы по теплотехнической надежности АЗ.

С конца 80-х годов прошлого века в НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается концепция реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя и интегральной компоновкой первого контура - ВВЭР СКДИ [2]. Отличительной чертой реактора являются двухконтурная тепловая схема и умеренный уровень температур в активной зоне (375-395°C), в отличие от одноконтурных разработок (290-540°C).

На кафедре АЭС НИУ МЭИ, среди прочих работ по СКДИ, выполнены следующие:

- разработана конструктивная схема парогенератора и математические модели контура естественной циркуляции реактора и парогенератора [3];
- проработана возможность повышения тепловой мощности активной зоны путем выравнивания средней температуры теплоносителя на выходе из АЗ;

Анализ работ показал, что требуют решения вопросы, касающиеся, в первую очередь, специфики теплообмена и гидравлики в области ПФП. В рамках ответа на эти вопросы необходимы исследования в областях:

- режимов теплоотдачи при ПФП и определения условий возникновения режимов ухудшенной теплоотдачи (РУТ) и пульсаций давления (РПД), определения границ возникновения РУТ и РПД;
- влияния процессов образования и смыва отложений при переходе водного теплоносителя через точку ПФП на работу твэлов;

Как видно, все перечисленные проблемы реакторов связаны с теплофизикой процессов, происходящих в области ПФП воды и теплофизической надежностью АЗ.

Режимы теплообмена в околокритической области имеют ярко выраженную специфику, определяемую резко изменяющимися свойствами воды в окрестности псевдофазового перехода. Кроме того, как показали проведенные исследования, специфика теплообмена при СКД в трубе отличается от многостержневой геометрии ТВС, прежде всего, границами начала РУТ. Определение закономерностей процесса тепломассообмена в ТВС невозможно без проведения экспериментов на многостержневом пучке, параметры которого максимально приближены к параметрам активных зон разрабатываемых СКД реакторов.

Список литературы

1. **Schulenberg T., Leung L.** Super-critical water-cooled reactors //Handbook of Generation IV Nuclear Reactors. Woodhead Publishing, 2016. С. 189-220.
2. **Silin V. A., Voznesensky V. A., Afrov A. M.** The light water integral reactor with natural circulation of the coolant at supercritical pressure B-500 SKDI //Nuclear Engineering and Design. 1993. Т. 144. №2. С. 327-336.
3. **Силин, В. А., Митькин, В. В., Зорин, В. М. и др.** Расчетное исследование контура естественной циркуляции реактора В-670 СКДИ //Вестник МЭИ. 2014. №. 3. С. 28-34;

Иванин О.А.^{1,2}, Романов А.А.², Басидов Р.И.², Кирюхин А.А.²

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская 13, стр. 2

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
oleggin2006@yandex.ru

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ НА БАЗЕ МИНИ-ТЭЦ

Системы аккумулирования тепла традиционно имеют широкое распространение в гелиоэнергетике, однако, редко применяются в малой энергетике при наличии источника тепла, использующего традиционное углеводородное топливо. Это объясняется тем, что характеристики КПД современных водогрейных котлов мало зависят от относительной нагрузки и обычное выравнивание графика потребления тепла не приносит ощутимой экономии топлива, как в случае с электроэнергетикой. Также, капитальные затраты на сооружение системы аккумулирования тепла, которая позволит сгладить пиковую тепловую нагрузку не сильно отличаются от капитальных затрат на сооружение пикового водогрейного котла.

Существенное повышение эффективности энергоснабжения с помощью системы аккумулирования тепла может быть обеспечено при наличии источника тепла, график работы которого по каким-либо причинам не может быть согласован с нагрузками потребителя. Таким источником могут стать объекты солнечной теплоэнергетики, промышленные предприятия, производственный цикл которых связан с необходимостью утилизации значительных объемов тепла, либо когенерационные установки. Для отечественной распределенной энергетики именно последний случай будет наиболее характерным,

потому как экономическая эффективность систем солнечного отопления недостаточно высока для большей части территории России, а типичным потребителем является небольшой населенный пункт, на территории которого маловероятно наличие предприятий.

Когенерационные установки обладают жесткой зависимостью между тепловой и электрической мощностью. В случае, если мини-ТЭЦ является единственным источником электроэнергии, график электрической нагрузки будет для нее приоритетным. В таком режиме работы вырабатываемая тепловая мощность может не соответствовать нагрузке потребителя. Недостаток тепловой мощности компенсируется за счет пикового источника тепла (котельная), а избыток – сбрасывается. Наличие системы аккумулирования тепла позволяет более эффективно использовать тепловую мощность мини-ТЭЦ и снизить нагрузку на котельную.

В работе рассматривается энергетический комплекс, включающий в себя мини-ТЭЦ на базе двигателя внутреннего сгорания и водогрейный котел. Возможная эффективность установки системы аккумулирования тепла оценивалась для поселка Жиганск, расположенного в Якутии. Для выбора оптимальной емкости системы теплового аккумулирования применялся метод оптимизации схем энергетических комплексов на базе симплексного метода [1]. Показано, что применение системы аккумулирования тепла может быть эффективно только при определенных сочетаниях графиков нагрузок и выработки сбросного тепла. В случае с мини-ТЭЦ необходимо наличие периодов, в которых тепловая нагрузка ниже и выше тепловой мощности мини-ТЭЦ, а также чередование этих периодов. Предложен критерий, позволяющий провести первичную оценку эффективности внедрения системы аккумулирования тепла.

Список литературы

1. Ivanin O.A., Director L.B. The solution of the optimization problem of small energy complexes using linear programming methods // Journal of Physics: Conference Series, volume 774, 2016. Doi: 10.1088/1742-6596/774/1/012046.

*Иваницкий М.С.¹, Константинов А.А.¹, Султанов М.М.¹,
Курьянова Е.В.¹*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Волжский, 404110, пр. Ленина, 69
mseiv@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ТЭС ПО КРИТЕРИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Базовую основу российской электроэнергетики составляют тепловые электростанции (ТЭС), в том числе теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), использующие в качестве топлива природный газ, мазут и уголь. Установленная мощность ТЭС России составляет порядка 153,5 ГВт, что обеспечивает выработку 66 % всей электрической энергии в стране. Эксплуатация паросиловых установок на различных режимах работы в совокупности с их индивидуальными рабочими характеристиками приводит к необходимости совершенствования математических моделей и методик, учитывающих параметры энергетических установок и экологические нормативы для оптимальной загрузки работающего оборудования и улучшения технико-экономических показателей генерирующих систем, в том числе с применением современных эффективных механизмов управления оборудованием в условиях рыночной и цифровой экономики [1].

В соответствии с Федеральным законом от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» установлены новые принципы природоохранной политики государства, предусматривающие в частности [2]: разделение всех промышленных предприятий на 4 категории и применение к каждой категории дифференцированных мер государственного регулирования; введение технологического нормирования на принципах наилучших доступных технологий (НДТ); систематизацию экологической информации о предприятии в рамках ведения государственного экологического учета объектов.

Следовательно, на все промышленные предприятия распространяется требование Федерального закона 219-ФЗ [2, 3] об оснащении источников загрязнения атмосферы системами автоматического непрерывного контроля и учета вредных выбросов (СНКиУВ) в окружающую среду. При этом, основными задачами внедряемых СНКиУВ являются [3]: непрерывный инструментальный контроль и учет концентраций и массовых выбросов вредных веществ в атмосферу; снижение объема вредных выбросов в атмосферу за счет

контроля и регулирования режимов сжигания топлива и работы пыле-, газоочистного оборудования; контроль за соблюдением установленных для ТЭС предельно допустимых выбросов; расчет платы за выбросы по результатам инструментальных измерений; передача информации о выбросах энергетических объектов в фонд данных государственного мониторинга окружающей среды.

Суммарный показатель вредности продуктов сгорания котельных установок отражает уровень экологической безопасности ТЭС и в рамках нового экологического законодательства может быть использован для оценки эффективности технологического процесса. Для этого в работе обобщены и проанализированы данные о содержании в продуктах сгорания энергетических котлов ТЭС наиболее опасных веществ, представленных оксидами азота, диоксидом серы, монооксидом углерода, твердыми частицами золы.

В рамках обеспечения комплексного подхода к решению задачи повышения эффективности технологического процесса в работе предложена математическая модель оптимизации состава и режимов работы паровых котлов ТЭС по критерию экологической безопасности. Математическая модель включает в себя: блок сбора исходных данных о режимах работы котельного оборудования (тепловая мощность, температура и давление рабочего тела, характеристики тепловых потерь с уходящими газами, с химическим и механическим недожогом топлива, потери тепла от наружного охлаждения, потери энергии с физической теплотой шлаков и сопутствующие их определению параметры технологического процесса; расчет блок определения концентраций маркерных вредных (загрязняющих) веществ, образующихся в результате сжигания топлива); оптимизационный блок для определения наиболее выгодного варианта состава и режима работы котельного оборудования и ранжирования топливосжигающих установок по критерию экологической безопасности топочного процесса. Полученные результаты могут быть применены для обеспечения оптимальной загрузки котельного оборудования действующих тепловых электрических станций для улучшения технико-экономических и экологических показателей работы энергоблоков ТЭС.

Список литературы

1. **Sultanov M.M., Boldyrev I.A., GorbanYu.A.** Electrical generator unit technical and economic indexes parameter study // Processing of the 1st IEEE 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, March 14-15 2019. 2019. № 1. p. 25.
2. **Федеральный закон РФ от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации»**// Собрание законодательства РФ. № 30. 2014. пункт 4220.

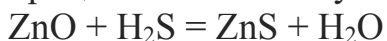
3. **Кондратьева О.Е.** Основные подходы к созданию систем мониторинга воздействия ТЭС на окружающую среду // Энергетик. 2016. №12. С. 32 – 40.

Каграманов Ю.А., Тупоногов В.Г., Рыжков А.Ф., Морозов Я.О.

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, 620002, Мира, 19
v.g.tuponogov@urfu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИРЕАКЦИОННОЙ ГОРЯЧЕЙ СЕРООЧИСТКИ СИНТЕЗ ГАЗА

Топливный синтез газ, применяемый в газотурбинных установках, топливных элементах и других энергетических технологиях, подвергается сероочистке. В работе рассматривается процесс очистки твердотопливного синтез-газа от сероводорода сорбентами на основе оксида цинка в интервале температур 300 -1000 °С. Целевой реакцией процесса является сульфидизация цинка сероводородом:



В зависимости от температуры процесса одновременно с целевой реакцией могут протекать нежелательные побочные реакции оксида цинка с содержащимися в синтез газе водородом и оксидом углерода, а также обратные реакции. В результате побочных реакций образуется свободный цинк, что приводит к истиранию и потере части сорбента.

Процесс моделируется параллельными реакциями для частицы сорбента, состоящей из твердых зерен реагента и связующего подобно [1]. Кинетическая модель состоит из девяти возможных гетерогенных реакций, включающих три твердых (ZnO, ZnS, Zn) и пять (H₂S, H₂O, H₂, CO₂, CO) газообразных компонентов. Скорость реакции рассчитывается по соотношению

$$R_a = k_a \cdot C_{b1}^{nb1} \cdot C_{b2}^{nb2} \cdot S_b \cdot N_{gs}$$

где C_{b1}, C_{b2} - концентрации первого и второго реактивного газового компонента; S_b - площадь поверхности раздела фаз сорбента и газа; N_{gs} - число зерен; nb - порядок реакции. Константы скоростей отдельных реакций k_a были определены ранее [2].

Взаимное влияние одновременных реакций друг на друга учитывается фактором селективности реакции, определяемым по весовой доле скорости данной реакции. Моделирование выполнено в изотермических и нестационарных режимах. На рис.1 приведены зависимости скоростей реакций оксида цинка с сероводородом, водородом и оксидом углерода, из которого следует, что при температурах больше 480 °С, будут

доминировать обе побочные восстановительные реакции с водородом и оксидом углерода.

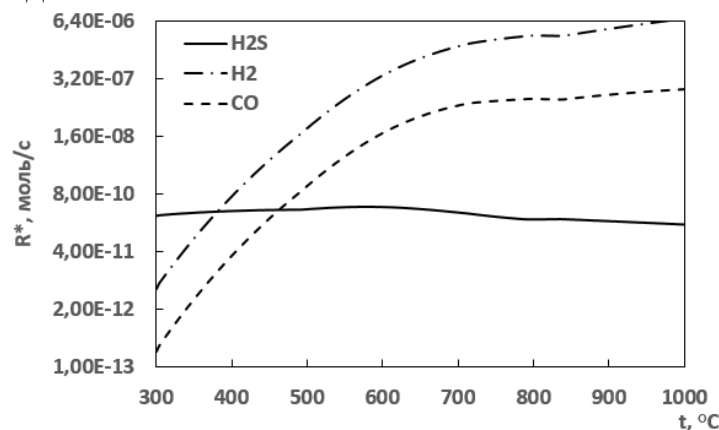


Рис.1. Зависимости скоростей реакций ZnO с компонентами синтез газа от температуры концентрации компонентов: H₂S – 0,8; H₂ – 0.27%; CO - 0.36%.

Моделирование выполнено в изотермических и нестационарных режимах. Критические температуры процесса сероочистки определены для нескольких промышленных составов угольного синтез газа.

Список литературы

1. Szekely J., Evans J.W. A Structural Model for Gas-Solid Reactions with a Moving Boundary // Chemical Engineering Science. 1970. V. 25. P. 1091-1107.
2. Kagramanov Y.A., Ryzhkov A.F., Tuponogov V.G., Nikitin A.D. Determination kinetic constants for reactions of zinc oxide with syngas components // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V.1359 (1), 012091.

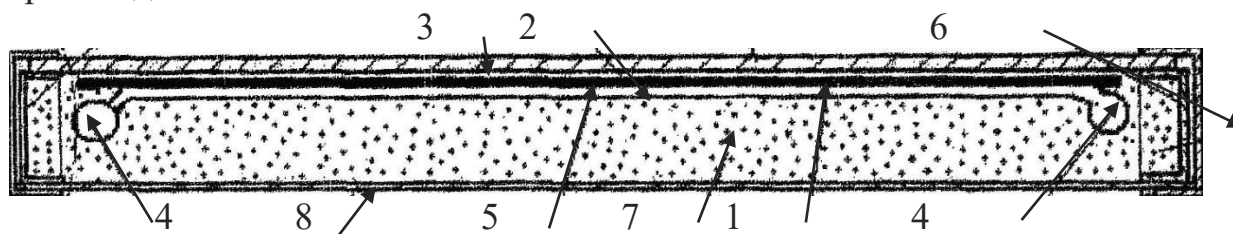
Казанджан Б.И.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

КОМБИНИРОВАННЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ КОЛЛЕКТОР ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ТЕПЛА

Комбинированные солнечные коллекторы для одновременной выработки тепла и электроэнергии в настоящее время выпускаются и коммерчески реализуются во многих странах мира, например, в Германии, Израиле, Китае, Индии. Основная идея комбинированного коллектора состоит в следующем. Паспортная величина характеристик фотоэлектрических модулей определяется в специальных лабораториях при стандартных условиях: освещенность 1000 Вт/м² температура 25°C. В традиционных фотоэлектрических генераторах температура фотоэлементов в рабочем состоянии достигает примерно 70°C. Выработка электроэнергии фотоэлементами при нагреве на 1°C сверх номинальной температуры падает примерно на 0,5%. В конечном счете выработка электроэнергии

фотоэлементами при рабочих температурах уменьшается за счет нагрева примерно на 25%. Охлаждение фотоэлектрической панели с помощью жидкого или воздушного теплоносителя приводит к появлению двух полезных продуктов - дополнительной электроэнергии и тепла отводимого от фотоэлементов с значительным выигрышем общей полезной энергии. Помимо прямого выигрыша в энергии объединение в одном корпусе теплового солнечного коллектора и фотоэлектрической панели приводит к значительной экономии места, где комбинированный коллектор располагается. В России комбинированные солнечные коллекторы не выпускаются и не используются. На рис.1 показан комбинированный солнечный коллектор с жидкостным охлаждением (патент №2485417, автор Казанджан Б.И.), Конструкция комбинированного коллектора адаптирована к реальным условиям России и возможности приобретения необходимого комплектующего оборудования, а его производство может быть осуществлено на производственной базе МЭИ.



1 абсорбер, 2 фотоэлементы, 3 наружное стекло, 4 сборные трубы, 5 трубки с теплоносителем

6 П-образные профили, 7 тепловая изоляция, 8 задняя стенка

Рис 1 Комбинированный солнечный коллектор

Другим вариантом реализации Комбинированного солнечного коллектора является охлаждение фотоэлементов воздухом, в результате чего, в качестве полезных продуктов получается дополнительная электроэнергия и теплый воздух, который может быть использован, например, в системах отопления (патент №2388974 автор Казанджан Б.И.).

Клименко А.В., Клименко В.В., Терешин А.Г., Федотова Е.В.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
e.v.kasilova@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ «ВОЛН ТЕПЛА» НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ РОССИИ

Возрастание числа жарких дней и тенденция к увеличению их температуры – неизбежное следствие современного изменения климата. Из опыта эксплуатации энергетических систем известно, что повышение температуры окружающего воздуха способно создать дополнительные сложности при их эксплуатации [1]. Из недавних примеров можно привести ограничение мощности атомных станций во Франции во время эпизодов жаркой погоды летом 2018 г. и 2019 г. На сегодняшний день установлено, что подобные эффекты могут представлять серьезную угрозу надежности электроснабжения [2-3]. Для России влияние частоты и интенсивности эпизодов жаркой погоды на работу энергосистем до сих пор детально не изучалось.

Цель настоящей работы состоит в эмпирическом анализе взаимосвязи наблюдаемого на территории России изменения климата в теплый период года (с апреля по сентябрь) [4] с характером электрической нагрузки и условиями работы электрогенерирующего оборудования по территории России.

На основе данных наблюдений были проведены расчеты динамики потребности в кондиционировании и среднегодовой продолжительности «волн тепла» по территории России (рис. 1).

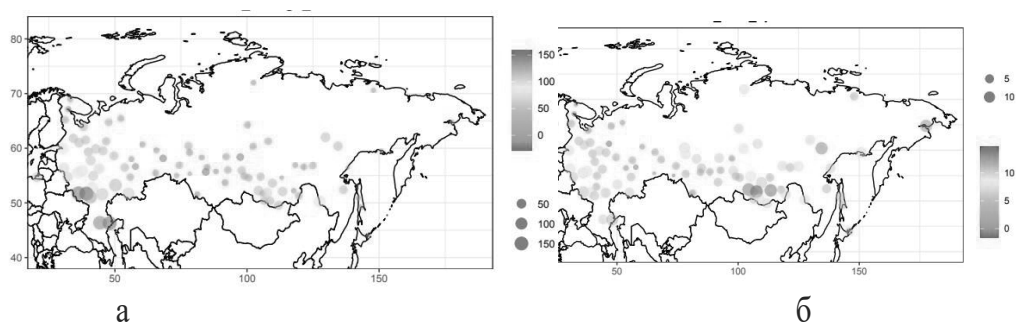


Рис. 1. Динамика изменения климатических показателей теплого периода года (2009-2018 по сравнению с 1951-1960): *а* — изменение потребности в кондиционировании (CDD); *б* — изменение среднегодовой продолжительности волн тепла.

Полученные оценки климатических характеристик были использованы для исследования синхронности изменения показателей работы региональных энергосистем по отношению к изменению

температуры окружающего воздуха во время «волн тепла» и сильной жары, а также для количественной оценки изменения условий работы тепловых и атомных станций в теплый период года. Результаты этих расчетов будут использованы для прогнозных оценок влияния изменения климата на надежность работы энергосистем России.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 16-19-10568) в части расчета экстремальных климатических характеристик и РФФИ (проект № 18-08-00026) в части оценки уязвимости энергосистем со стороны климатических изменений на территории России.

Список литературы

1. Hanski J., Rosqvist T., Crawford-Brown D. Assessing climate change adaptation strategies—the case of drought and heat wave in the French nuclear sector // *Regional Environmental Change*. 2018. V.18. №6. С.1801-1813.
2. Burillo D., Chester M.V., Ruddell B., Johnson N. Electricity demand planning forecasts should consider climate non-stationarity to maintain reserve margins during heat waves // *Applied Energy*. 2017. V.206. P.267-277.
3. Ke X., Wu D., Rice J., Kintner-Meyer M., Lu N. Quantifying impacts of heat waves on power grid operation // *Applied Energy*. 2016. V.183. P.504-512.
4. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТТ)» Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942

*Клименко А.В.¹, Агабабов В.С.¹, Петин С.Н.¹, Корягин А.В.¹,
Коршикова А.А.²*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Общество с ограниченной ответственностью «Инконтрол»
Москва, 115280, Ленинская слобода, 23, строение 2
agababovvs@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕВОДА ОБЪЕКТА МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ИЗ КОГЕНЕРАЦИОННОГО В ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

Статья посвящена определению возможности повышения энергетической эффективности работы существующего объекта малой энергетики - расположенного в центральной части России энергоцентра, обеспечивающего электроэнергией и теплом социальный объект. Проведены натурные испытания и анализ режимов работы энергетического комплекса. Получены исходные данные по удельным характеристикам расходов топлива, определена целесообразность

перевода объекта малой энергетики из режима когенерации с выработкой электроэнергии и тепла с использованием газопоршневых генерирующих установок (ГПГУ), в режим тригенерации с выработкой электроэнергии, тепла и холода. Холод для организации централизованной поставки потребителю вырабатывается с применением устанавливаемых в энергоцентре и работающих в режиме холодильной машины термотрансформаторов абсорбционного типа, использующих в качестве первичного энергоносителя тепло уходящих газов и охлаждения рубашки ГПГУ.

Определены положительные и отрицательные факторы, влияющие на эффективность работы установки при переходе от когенерации к тригенерации. Проведены сравнительные расчеты эффективности работы энергоцентра в автономном режиме и в режиме работы объекта распределенной энергетики.

Статья получила поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (Грант РФФИ 18-08-00026).

Список литературы

1 Исследование влияния долговременных климатических изменений на работу теплоэнергетических установок в России: отчет о НИР / Клименко А.В. - Москва: НИУ «МЭИ», Грант РФФИ 18-08-00026. 2019.

2 Разработка и исследование схем высокоэффективных парогазовых ТЭС с системой одновременного производства тепла и холода с использованием низкопотенциальной теплоты: отчет о НИР / Клименко А.В. – Москва: ОАО «ВТИ», 2013. – 273 с.

Козлова Ю.А.¹, Ильин Е.Т.²

¹ АО «Техническая инспекция ЕЭС»,

Москва, 109074, Славянская площадь, д. 2/5, стр. 5

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

julia_a_kozlova@mail.ru

О ВЛИЯНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭЦ В РЫНОЧНЫХ УСЛОВИЯХ НА ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОФИКАЦИИ

В современных условиях рынка электроэнергии в России строительство новых станций без специальных мероприятий по возврату капиталовложений не обеспечивает возврата инвестиций. В этих условиях в качестве критерия выбора рационального состава оборудования для построенных и вновь вводимых ТЭЦ предлагается использовать значение максимум рентабельности использования оборудования.

В работе рассмотрены особенности функционирования ТЭЦ в условиях рынка электроэнергии «на сутки вперед» (РСВ). Проанализирован

характер изменения цены на РСВ в суточном, недельном и годовом разрезах. Проведены расчетные исследования по определению целесообразного уровня загрузки оборудования ТЭЦ с присоединенной тепловой нагрузкой 1000 Гкал/ч на базе энергоблоков ПТУ-110 и ПГУ-230. Выработка электроэнергии определялась с учетом конкурентоспособности в условиях РСВ и реальных графиков изменения тепловой нагрузки. Результаты расчетов представлены в табл.1.

Анализ полученных результатов показывает, что основное влияние на выбор оптимального значения коэффициента теплофикации действующих ТЭЦ оказывает величина эксплуатационных затрат, цена топлива и тариф на электрическую мощность при отборе на КОМ. С увеличением числа агрегатов темп прироста выручки снижается, чего нельзя сказать про характер изменения условно-постоянных затрат, темп роста которых носит практически линейный характер. В этом случае при существующем уровне цены на топливо в центральной части России, величина оптимального коэффициента теплофикации для паротурбинного оборудования снижается до 0,4-0,45 и до 0,3-0,35 для парогазового оборудования.

Табл.1 – Техничко-экономические показатели работы ТЭЦ в условиях рынка

Показатель	ПТУ-110						ПГУ-230						
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7
Количество агрегатов, шт.													
Коэффициент теплофикации	0,18	0,35	0,53	0,70	0,88	1,05	0,14	0,28	0,42	0,56	0,70	0,84	0,98
Отпуск ТЭ, млн.Гкал	3,407												
Отпуск ЭЭ, млрд. кВтч	0,85	1,36	1,88	2,17	2,22	2,27	1,80	3,65	4,63	5,64	6,04	6,21	6,30
в т.ч. по ТФ-циклу	0,83	1,34	1,73	1,89	1,90	1,91	1,75	2,73	3,39	4,18	4,51	4,47	4,44
по КН-циклу	0,02	0,02	0,14	0,27	0,31	0,35	0,05	0,92	1,24	1,46	1,54	1,73	1,86
Выручка, млрд.руб.	3,95	4,72	5,50	5,99	6,18	6,35	5,31	7,98	9,50	10,96	11,69	12,11	12,42
Затраты на топливо, млрд.руб.	2,73	3,06	3,45	3,71	3,81	3,88	3,41	4,90	5,66	6,42	6,72	6,89	6,98
Экспл. затраты, млрд.руб.	0,15	0,30	0,45	0,59	0,73	0,88	0,55	1,10	1,63	2,16	2,69	3,21	3,73
Рентабельность производства, %	37,4	40,6	41,0	39,2	35,8	33,6	33,9	33,1	30,2	27,7	24,2	20,0	16,0

Kolmickovs A.J., Vostrikovs S.N.

Department of Thermal Power Systems, Institute of
Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering,
Transport and Aeronautics, RTU, 6B Kipsala Street,
Riga, Latvia, LV-1048

antons.kolmickovs@gmail.com,
sergejs.vostrikovs@rtu.lv

THE ECONOMICAL ASPECTS OF ELECTRIC FIELD-DRIVEN FLAME DYNAMICS TECHNOLOGY

This economical evaluation of the EFFD technology is based on the experimental work carried out at the Institute of Physics of University of Latvia [1] with the aim of economic justification for testing and using technology on an industrial (macro) scale. Considering the previous experimental work in this field carried out on flames no higher than 4 kW [2-3], there are only a few approbations of the technology at power above this limit [4].

Taking into account the experimental results obtained at IPUF burning gas solid fuel (biomass) [1, 4, 5] on 1,5 kW and 4 kW, lab-scale devices, as well as the results obtained during testing of the EFFSD technology on a commercially available 20 kW pelletized fuel burner (pilot-scale), an economic analysis of the energy balance and the period of self-sufficiency of technology were analyzed.

Table 1. EFFD technology energetic efficiency using 20 kW pellet burner.

Electrode U_+ , kV	Ion current I , A · 10 ⁻³	Electric power $P_{el} = \frac{U_+ \cdot I}{60\%}$, W	Electricity input $W_{el} = P_{el} \cdot t$, kWh	Thermal output $\Delta P_{thermal}$, kJ	Relative input $\frac{W_{el}}{\Delta P_{thermal} \cdot h}$, %
0,6	2,14 ± 0,18	2,57 ± 0,22	0,003	0,04	7%
0,9	3,32 ± 0,31	5,81 ± 0,56	0,006	0,26	2%
1,2	4,57 ± 0,25	10,97 ± 0,60	0,012	0,38	3%
1,5	5,71 ± 0,34	17,13 ± 1,02	0,018	0,31	6%
1,8	7,25 ± 0,45	26,10 ± 1,62	0,028	0,26	11%

Considering the parameters of the power supply used in experimental studies ($\eta_{el} \approx 60\%$, U_+), as well as the obtained average values of the average current (I), a calculation was made of the relative energy used for the total thermal energy gain of the experimental setup. According to the average statistical error of the experiment – 5%, related to strong fluctuations in the measurements of the current strength due to oscillations of the swirling flame, and statistical variations of the thermal effect of the EDDF technology, the electric energy consumption varied on average from 2% to 11% of the increase

in the thermal power of the experimental setup (1. tab.).

Table 2. EFFD economic profitability and self-sufficiency.

Power, P_{thermal} , kW	Fuel consumption, V_f , kg·h ⁻¹	Fuel prices EUR·kg ⁻¹	Fuel economy $V_f \cdot \text{EUR} \cdot \frac{dV_f}{dP}$, EUR·h ⁻¹	Self-sufficiency period	
				MIN, years	MAX, years
20 ¹	4,13	0,167; 0,174; 0,207; 0,171; 0,190 average: 0,182	0,0376	2,7	4,2
100 ²	20,65		0,1880	2,5	3,7
200 ²	41,3		0,3759	1,3	1,8
300 ²	60,95		0,5638	0,8	1,2

EFFD capital costs calculated for a 20 kW burner vary between $\approx 884 - 1380$ EUR, although the cost of installing technology on heat production setups with higher power would possibly reach $4\,147 - 6\,033$ EUR, due to the requirement of more powerful DC power supplies, when additional power costs 2–7 EUR per Watt.

Suggesting linear scaling of the EFFD technology, the economy of fuel (Fig.1) allows to derive the self-sustainability of the technology within a year using a burner with thermal power about 300 kW. Still, for lower power setups the self-sustainability of utilization of the EFFD is achieved in 2 – 4 years (2. tab.).

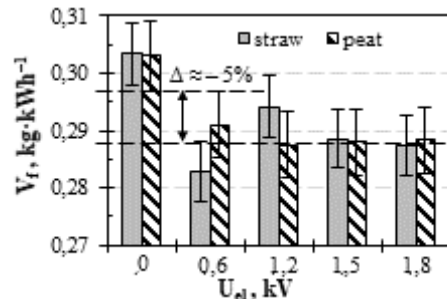


Fig. 1. EFFD effect on fuel economy.

References

1. **Barmina I., Kolmickovs A., Valdmanis R., Zake M., Vostrikovs S., Kalis H., Strautins U.** Electric Field Effect on the Thermal Decomposition and Co-combustion of Straw with Solid Fuel Pellets // *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 1522. doi: 10.3390/en12081522
2. **Weinberg F., Carleton F., Dunn-Rankin D.** Electric field-controlled mesoscale burners // *Combustion and Flame*. 2008. Vol. 152. Nr. 1-2. P. 186-193. doi: 10.1016/j.combustflame.2007.07.007
3. **Electrodynamic Combustion Control Technology. A ClearSign White Paper.** / J. Colannino; ClearSign Combustion Corporation, 2012. 11 p.
4. **Barmina I., Purmalis M., Valdmanis R., Zake M.** Electrodynamic Control of the Combustion Characteristics and Heat Energy Production // *Combustion Science and Technology*. 2015. Vol. 188. Nr. 2. P. 190–206. doi: 10.1080/00102202.2015.1088010
5. **Barmina I., Kolmickovs A., Valdmanis R., Zake M.** Co-Firing of Straw with Electrodynamic Process Control for Clean and Effective Energy Production. // *European Biomass Conference and Exhibition*

Колчев К.К.², Шилов А.А.¹, Черняев А.Н.¹, Галиев И.И.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Акционерное общество «РАСУ»,
Москва, 109507, ул. Ферганская, 25, корп. 1
shilovandreyandrevich@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОГРАНИЧЕНИЯ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СИГНАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ПОКАЗАНИЙ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГИДРОАМОРТИЗАТОРОВ

В процессе эксплуатации АЭС были выявлены многочисленные сбои датчиков линейного перемещения системы контроля гидроамортизаторов (СКГА), которые по большей части характеризуются выбросами сигналов [1]. В результате этого алгоритм работы СКГА оперирует с недостоверными измерениями и функции системы не выполняются.

С целью повышения достоверности показаний предлагается алгоритм, основанный на методе допускового контроля скорости. Суть данного метода заключается в ограничении скорости изменения значения измеряемого параметра [3]. Скорость изменения сигнала рассчитывается, как отношение приращения сигнала к интервалу времени.

$$\left| \frac{dL_i}{dT} \right| \approx \frac{L_i - L_{i-1}}{\Delta T} \leq V_{isp} \quad (0)$$

V_{isp} – оценка максимально возможного значения скорости изменения измеряемого параметра $\left| \frac{dL_i}{dT} \right|$; ΔT – интервал квантования по времени; L_i – значение измеряемого параметра в момент времени i .

Оценка V_{isp} зависит от динамики переходных процессов и выбирается путем анализа статистических данных о работе системы и специфики технологического процесса.

Так как входной сигнал с датчиков СКГА зашумлён, вычисляется средняя скорость изменения сигнала на интервале в n измерений. Значение n было выбрано перебором нескольких возможных значений с наиболее представительной оценкой средней скорости изменения сигнала.

$$\bar{V}_i = \frac{V_i + V_{i-1} + \dots + V_{i-n+1}}{n} \quad (2)$$

Достоверность измерения оценивается по результатам проверки условия (1).

Блок-схема алгоритма проверки достоверности представлена на рисунке 1.

Разработанный алгоритм, позволяет выявить недостоверные измерения, имеющие скорость изменения сигнала, превышающую заданную оценку V_{isp} . Недостоверные измерения маркируются в алгоритме работы СКГА флагом недостоверности и не учитываются в работе системы. Это позволяет избежать принятия ложных решений при эксплуатации энергоблока, связанных с невыполнением СКГА своих функций, без внесения изменений в конфигурацию технических средств или архитектуру системы.

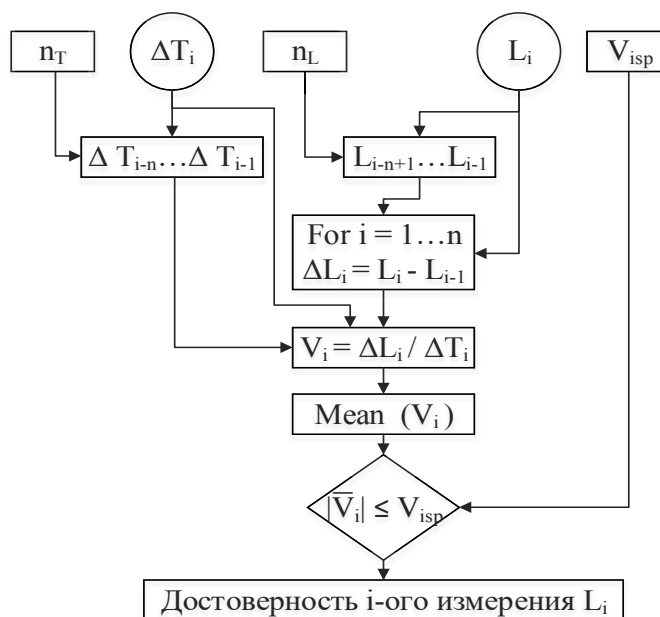


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма проверки достоверности

измерения. Это позволяет избежать принятия ложных решений при эксплуатации энергоблока, связанных с невыполнением СКГА своих функций, без внесения изменений в конфигурацию технических средств или архитектуру системы.

Список литературы

1. Браганец С.А., Савчиц А.В., Севастьянов Б.Г. Повышение надежности измерительной информации // Промышленные АСУ и контроллеры, № 2, 2011.
2. Дудников Е.Г., Казаков А.В., Софиева Ю.Н., Софиев А.Э., Цирлин А.М. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов. М.: Химия, 1987.

Кондратьева О.Е., Локтионов О.А., Ванин А.С., Боровкова А.М.
 ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
 Москва, 111250, Красноказарменная, 14
KondratyevaOYe@mpei.ru

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Одним из важнейших принципов государственной политики в области обеспечения энергетической безопасности в соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2030 года является обеспечение надежного энергоснабжения потребителей. Проблема обеспечения надежности энергетических систем является многоплановой в связи с тем, что для её решения необходима как разработка комплексного подхода к оценке надежности функционирования Единой

энергосистемы (ЕЭС), так и наличие показателей надежности и методик их определения для различных видов надежности и уровней энергетических систем (от ЕЭС до энергетических узлов).

В настоящее время в России отсутствует единый подход к оценке надежности, что затрудняет принятие управленческих решений по развитию ЕЭС России. Поэтому особую актуальность имеет анализ терминологии, используемой в нормативных документах, с целью её гармонизации и унификации, а также оценка возможности применения существующих методов для разработки методологии оценки надежности функционирования энергосистем различного уровня.

На сегодняшний день в России существуют различные определения и классификации надежности, что усложняет выработку единой концепции и универсальных требований к обеспечению бесперебойного и надежного функционирования энергетических систем в целях удовлетворения спроса на электрическую энергию потребителей. Действующая нормативно-правовая база в данной области содержит только термины «системная надежность» и «балансовая надежность», которые могут быть использованы при определении параметров, критериев и требований к надежности.

В работе представлена полная классификация надежности функционирования электроэнергетических систем, в соответствии с которой определены три основных вида системной надежности: балансовая, режимная и структурная. Анализ целесообразности оценки различных видов надежности для выработки решений по управлению системной надежностью как ЕЭС России в целом, так и отдельных её элементов, показал, что для данной цели могут использоваться балансовая и режимная надежности. При этом наиболее перспективным и позволяющим проводить оценку надежности всей ЕЭС России является анализ балансовой надежности.

Анализ нормативных требований в области обеспечения надежности энергетических систем выявил отсутствие в Российской Федерации количественного критерия, характеризующего системную надежность. В нормативных документах содержатся только отдельные требования к балансовой надежности, режимной надежности и надежности электроснабжения потребителей.

В работе обоснована целесообразность разработки комплексного подхода к оценке надежности энергетических систем на основании анализа балансовой и режимной надежности. При этом показано, что наиболее информативной является оценка балансовой надежности, а методология оценки режимной надежности требует более детальной проработки в таких вопросах, как:

- гармонизация терминологии и внесения термина «режимная надежность» в нормативно-правовые акты;

- определение требований к исходным данным с учетом уровня оцениваемой энергосистемы;
- разработки программного обеспечения, позволяющего снизить временные и трудовые затраты на проведение такой оценки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-19-00721.

Кондратьева О.Е.¹, Боровкова А.М.¹, Баева П.Н.¹, Черкасский Е.В.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² ПАО «ЮНИПРО», Москва, 123112, Пресненская набережная,
10, блок В

BorovkovaAM@mpei.ru

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЭС КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ

Обеспечение надёжности промышленных ТЭС на стадиях проектирования, модернизации и эксплуатации является одной из наиболее актуальных задач, которые необходимо решить при проектировании и эксплуатации тепловых электростанций. Под надёжностью ТЭС понимают свойство сохранять во времени способность вырабатывать электрическую и тепловую энергию определенных параметров по требуемому графику нагрузки при заданной системе технического обслуживания и ремонтов оборудования.

Существуют различные методы и подходы, позволяющие оценить надёжность тепловых электростанций (ТЭС). Самым распространённым является аналитический способ расчёта, когда ТЭС представляется как последовательные, параллельные и древовидные структурные модели и дальнейшее их математическое решение, возможно лишь путём значительных упрощений и применимых допущений. Однако, такое представление не даёт наглядных и достоверных результатов, не позволяет получить количественную оценку надёжности, а также определить оптимальные пути повышения её надёжности.

Более точно и комплексно задачу оценки надёжности структурно-сложных схем, какой является ТЭС, можно решить с использованием математического моделирования и логико-вероятностных методов (ЛВМ). Структура ТЭС в таком случае описывается средствами математической логики, а количественная оценка надёжности осуществляется с помощью теории вероятности.

Использование ЛВМ для оценки надёжности представлено на примере одного энергоблока ТЭС. Для расчёта исследуемого энергоблока необходимо составить схему функциональной целостности (СФЦ)-

графическую схему, описывающую состав и условие функционирования элементов энергоблока, влияющих на выполнение целевой функциональности. Такое графическое представление системы с математической точки зрения дает возможность определить работоспособное состояние системы (прямой подход) и состояние отказа (обратный подход). СФЦ, разработанная профессором Можяевым А.С., реализована в программном комплексе структурно-логического моделирования надёжности и безопасности сложных систем. Таким программным комплексом, в котором этот расчет может быть реализован, является отечественный ПК «АРБИТР».

Используя в качестве исходных данных такие экспериментально полученные показатели, как время наработки на отказ и время восстановления каждого элемента, данный программный комплекс позволяет не только определить количественные показатели надёжности энергоблока ТЭС: коэффициент готовности и вероятность безотказной работы, но также дает возможность оценить значимости и вклады каждого элемента в структурную надёжность. Выявление наиболее важных элементов системы, вносящих наибольший вклад в обеспечение её надёжности, позволяет предусмотреть резервирование этих элементов на этапе проектирования системы, уточнить требования к их функциональной надёжности или скорректировать стратегию ремонтов (технических воздействий) данных узлов на уже эксплуатируемой станции.

Логико-вероятностные методы являются наиболее эффективными для анализа структурно-сложных систем, позволяющими не только оценить надёжность с учетом нормативно-технических требований и более полно оценить структурную надёжность, но и учитывать полученные результаты для предусмотрения резервирования наиболее значимого оборудования на стадии проектирования, закупки запасных частей элементов, а также прогнозирование и планирование регламентных работ и др.

Список литературы

1. Рябинин И. А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. - СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007. - 276 с.
2. Громов В. Н., Можяев А. С. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. - СПб.: Изд-во Военного инженерно-технического университета, 2000. - 145 с.

*Кормилицын В. И.¹, Лобко В.П., Бахтин А.В., Пресс Ю. М.,
Маршалл А. С.*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
vplobko@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ СОЗДАНИЯ И КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ, ПЕРЕНАСЫЩЕННЫХ ВОДОРОДОМ, МАЛОСЕРНИСТЫХ ЭНЕРГЕТИЧНЫХ ТОПЛИВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАВИТАЦИОННЫХ, МЕХАНО-ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И СВЧ-ВОЗДЕЙСТВИЙ

Экспериментальный стенд состоит из блока синтеза новых, перенасыщенных водородом жидких и газообразных топлив, блока синтеза новых, перенасыщенных водяным паром газообразных топлив, блока обессеривания топлив и блока огневых испытаний, состоящего из низко и высоко температурных горелок-реакторов.

Стенд обеспечивает:

- получение перенасыщенной водяным паром синтезированной парогазовой смеси на основе водорода и сжигание её в специальной высокотемпературной (2500⁰С и выше) горелке-реакторе;

- получение перенасыщенного водородом синтезированного жидкого топлива, сжигание его в специальной высокотемпературной (2500⁰С и выше) горелке-реакторе;

- реализацию паровой каталитической конверсии газообразных и жидких углеводородных топлив в специальной низкотемпературной (450 - 800⁰С) горелке-реакторе;

- получение стабильных водо-топливных эмульсий с содержанием воды – до 97 %. В качестве топлив используются мазут, дизельное топливо, бензин и др.;

- ультразвуковые и СВЧ-воздействия на жидкие и газообразные топлива в процессе их синтеза и при обессеривании;

- отработку современных перспективных методов обессеривания (кавитационно-окислительное обессеривание, плазменное и электролизное обессеривание, реагентное физико-химическое обессеривание и др.). Методы обессеривания реализуются в блочно-ступенчатой схеме обессеривания топлив.

Получение перенасыщенных водородом парогазовых смесей и топлив основывается на процессах паровой каталитической конверсии. В качестве исходного сырья используются природный газ, состоящий, на 95-99% из метана, бензин, дизельное топливо, мазут, масла и водяной пар. Процесс паровой конверсии требует подвода тепла, который

обеспечивается за счет сжигания некоторого количества углеводородного топлива в горелках-реакторах.

На стенде осуществляют отработку современных перспективных методов обессеривания, таких как кавитационно-окислительное обессеривание, плазменное и электролизное обессеривание, реагентное физико-химическое обессеривание и др.

Метод окислительного обессеривания основан на окислении сернистых соединений (находящихся в топливе) в сульфоны и оксиды серы. В качестве окислителя используется кислород воздуха и озон. Воздух и озон подается в топливо посредством кавитационного реактора, в котором дробятся на шарики диаметром 3-5 мкм. Этим достигается очень большая поверхность контакта топлива с воздухом и озоном.

В результате окислительного обессеривания осуществили снижение содержания серы в мазуте и дизельном топливе на 30-50%.

Метод плазменного обессеривания основан на воздействии высокоэнергетичной плазмы на топливо.

Проведенные исследования показали перспективность применения метода плазменного обессеривания мазута и дизельного топлива в электродуговой плазме с напряжением до 30 кВ.

В плазме (электродуговом разряде) под воздействием высоких температур, происходит разрушение сернистых соединений с последующим их переходом в парогазовое состояние.

В результате опытов осуществили снижение содержания серы в мазуте на 80%.

Метод электролизного обессеривания жидких углеводородов осуществляется в электролизере или системе последовательно соединенных электролизеров. Обработку проводят током плотностью 5-10 мА/дм² и более. Проведенное обессеривание мазута показало снижение содержания серы в нем на 70%.

Метод реагентного обессеривания применяется для обессеривания бензина и дизельного топлива.

В качестве реагента используется смесь алюмосиликатных минералов, основу которых составляет $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3[\text{MgO}]4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3[\text{Fe}_2\text{O}_3]4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ и др. Метод позволяет снизить содержание серы до 95% и более.

Кормилицын В.И.¹, Бороздин А.В.², Бавлаков Т.В.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² ООО «АФТ-Энерго»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 17, стр 1Б

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЁТНЫЕ И ОПЫТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ВОДНОЙ ЭМУЛЬСИИ ВЫСОКОВЯЗКОГО СЕРНИСТОГО МАЗУТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА ТП- 35

Сжигание высоковязкого сернистого мазута – одна из серьёзных проблем энергетики как в России, так и за рубежом. Приводятся результаты исследований в условиях промышленной эксплуатации энергетического парового котла ТП-35 при сжигании низкокачественного обводнённого мазута.

Опытно-экспериментальные исследования проводились с целью определения количественных зависимостей технико-экономических и экологических характеристик от содержания воды, находящейся в состоянии мелкодисперсной эмульсии в составе топочного энергетического мазута. Опытно-экспериментальные результаты сопоставляются с предварительно выполненными нормативным методом поверочными расчётами эффективности работы энергетического котла с использованием в качестве топлива, предварительно подготовленного методом гидродинамической кавитационной диспергации мазутного топлива с повышенным содержанием воды в состоянии мелкодисперсной эмульсии [1,2].

Вновь разработанная испытательная установка обеспечивала получение водо-мазутной высокодисперсной эмульсии, с поддержанием давления эмульсии в рабочем диапазоне котла. Для определения расхода сжигаемого топлива использовались высокоточные кориолисовы расходомеры (пр. Heinrichs Messtechnik GmbH), а для измерения содержания воды поточный диэлькометрический влагомер (пр. FIZEPR. КБ ФизЭлектронПрибор). Экспериментальные измерения проведены в условиях реального производственного процесса на работающей ТЭЦ, с постоянным массовым содержанием воды в исходном мазуте 6,6%. Температура мазута при испытаниях устанавливается в диапазоне от 102 до 127°C.

Экспериментально показано, что наличие в мазуте воды в состоянии мелкодисперсной эмульсии (при среднем диаметре глобул воды 3-4 мкм) не только не снижает эффективность использования жидкого энергетического топлива, но и позволяет снизить на 2-4% величину

удельного расхода топлива на выработку тепла. Исследованный экспериментально диапазон обводнённости мазута – от 7 до 18%, подтвердил ранее установленный эффект интенсификации сжигания мазута*, подготовленного к сжиганию в виде водомазутной эмульсии, а также связанные возможности устойчивого снижения расхода воздуха на горение, снижения потерь тепла с уходящими дымовыми газами.

По результатам исследований авторы предлагают переоценить подход к общепринятому критерию эффективности работы котла «КПД по обратному балансу» и использовать величину удельного расхода сухого топлива в качестве, основного критерия эффективности технологии топливоподготовки, при эксплуатации котельной установки в условиях промышленной эксплуатации.

*- отчёт по теме №2203130 выполненный кафедрой тепловых электрических станций (ТЭС) МЭИ на тему: «Технико-экономическое обоснование применения водомазутного топлива ВМТ-ГДКО, подготовленного методом гидродинамической кавитационной обработки в стационарных котельных установках на территории РФ» Москва 2015г.

Список литературы

1. Кормилицын В.И. Экологические аспекты сжигания топлива в паровых котлах / М.: МЭИ, 1998 334 с.
2. Волновая технология приготовления альтернативных видов топлив и эффективность их сжигания / Ганиев Р.Ф., Кормилицын В.И., Украинский Л.Е.. М.: «Регулярная и хаотическая динамика», 2008 116 стр.

Косой А.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
kosoy@pm.me

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90095»

Сложную задачу повышения степени интеллектуальности АСУ ТП на базе современных ПТК для существенного прироста КПД производства энергии уже много лет решают, используя иерархический подход. Разработка методических положений интеллектуальной системы управления технологическими процессами тепловой электрической станции является одной из подзадач в этом иерархическом подходе, направленной на поиск и теоретическую апробацию новых методов построения и настройки интеллектуальных регуляторов. Выбор

оптимальной структуры и дальнейшая настройка параметров интеллектуальных регуляторов являются нетривиальными задачами, ставящими повышенные требования к квалификации и опыту проектировщика, но и обеспечивающими в дальнейшем значительный прирост в качестве и надёжности процессов регулирования и управления технологическим объектом. В отличие от классических регуляторов, интеллектуальный регулятор должен быть структурно подготовлен к процессу обучению и накоплению опыта. Обучение и корректировка знаний сопровождает такой регулятор на всём его жизненном цикле: обучение на тренажёрных моделях на этапе проектирования, обучение под присмотром человека-эксперта на этапе наладке и самостоятельная корректировка знаний во время эксплуатации. Самостоятельная корректировка ограничена заранее заданными коридорами ожидаемых естественных изменений параметров объекта управления. В докладе представлены примеры сравнения работы автоматических систем регулирования моделей отдельных узлов электрической станции с примерами работ различных интеллектуальных регуляторов.

Интеллектуальные регуляторы превосходят классические регуляторы по прошествию времени (циклов симуляции), так как их интеллектуальность и заключена в способности улучшаться со временем, то есть обучаться.

Список литературы

1. **Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю.** Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Изд-во «Физматлит», 2001. 224 с.
2. **Захаров В.Н., Ульянов С.В.** Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления: Эволюция и принципы построения // Известия РАН: Техническая кибернетика. – 1993. – №4. – С.189-205.
3. **Биленко В. А, Грехов Л. Л., Свидерский А. Г.** Автоматизация отечественных энергоблоков: тенденции развития, проблемы, перспективы // Теплоэнергетика. 2012. № 10. С. 3 – 12.

*Крохин Г.Д.², Аракелян Э.К.¹, Мезин С.В.¹, Пестунов А.И.²,
Кибирева А.Э.²*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Новосибирского Государственного университета
Экономики и Управления
Новосибирск, 630099, ул. Каменская, 56
ArakelianEK@mpei.ru

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБОУСТАНОВКИ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЁТКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Доклад посвящен анализу результатов применения методов теории нечетких множеств и нечетких логик в моделях диагностики и оценки технического состояния оборудования ТЭС с применением методов искусственного интеллекта.

Поставлены и решены проблемные принципы мягкого регулирования и методы искусственного интеллекта, позволяющие моделировать непрерывный процесс изменения ресурса функционирующей турбоустановки на основе получаемых знаний реального технического состояния его критических элементов, идентификации его в режиме online, как непрерывный процесс, протекающий параллельно эксплуатации.

Представлена концепция инновации «мягкой» эксплуатации энергоустановок ТЭС с использованием нечёткой информации, как задачи распознавания образов, выделенных в процессе экспериментов в условиях неопределённости с использованием интеллектуальных технологий в математических моделях идентификации дефектных состояний. Мягкие способы управления предполагают ускоренные приближённые расчёты, ориентированные на синтез законов управления, поддерживаются в заданном интервале нагрузки. Непрерывная идентификация, проводимая в темпе процесса, будет обеспечивать адаптацию модели и параметров турбоустановки.

Оптимизация состояний при выборе наилучшего из наихудшего режимов, принятие управляющих решений и прогнозирование повышения эффективности использования энергоустановок, включая техническое обоснование – составляют основу новой концепции (инновации), целью которой является увеличение времени эксплуатации при минимизации расходов на техническое обслуживание и ремонт.

Приводятся алгоритм моделирования применительно к теплоэнергетическому агрегату при нечеткой входной информации и

проведенной статистической оценки адекватности нечетких моделей. Дана оценка точности полученной математической модели на базе оценки степени разброса полученной линии регрессии относительно ее математической модели, при этом введены критерии адекватности 2-х типов («R» и «D»), способствующие интегрально оценить близость математических моделей исследуемому объекту с помощью выбранной меры.

Исследование выполнено с поддержкой РФФ, грант № 19-19-00601.

Кудинов А.А., Зиганишина С.К., Хусаинов К.Р.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Самара, 443100, Молодогвардейская, 244, Главный корпус, кафедра ТЭС
a.a.kudinov@yandex.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДВУКРАТНОГО ПРОМЕЖУТОЧОГО ПЕРЕГРЕВА ВОДЯНОГО ПАРА НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПГУ-800 КИРИШСКОЙ ГРЭС

В настоящее время наиболее перспективными с точки зрения тепловой экономичности являются бинарные парогазовые установки (ПГУ), включающие газотурбинную установку (ГТУ), котел-утилизатор (КУ) и паровую турбину и работающие по комбинированному циклу Брайтона-Ренкина. К перечню приоритетных задач развития комбинированных установок относится повышение тепловой экономичности паровых турбин ПГУ, коэффициент полезного действия которых не превышает 36% из-за сниженных начальных параметров водяного пара и отсутствия системы регенеративного подогрева турбинного конденсата и питательной воды. Как правило, промежуточный перегрев водяного пара применяют на мощных парогазовых установках с трехконтурными котлами-утилизаторами. К данным установкам относится введенная в эксплуатацию на Киришской ГРЭС утилизационная ПГУ мощностью 800 МВт (ПГУ-800).

В состав ПГУ-480 входят две газотурбинные установки Siemens SGT5-4000F номинальной мощностью 288 МВт, два котла-утилизатора П-132 трех давлений и конденсационная паровая турбина К-245-13,3. Расчетная электрическая мощность ПГУ-800 при работе с однократным промежуточным перегревом водяного пара составляет 841,15 МВт, а ее КПД – 60,11%.

Для повышения эффективности работы парогазовой установки с трехконтурным котлом-утилизатором предлагается осуществлять двукратный промежуточный перегрев водяного пара в контуре высокого давления (ПП-1) и в хвостовой части (ПП-2) котла-утилизатора (рис. 1). В

Кудинов Ю.И.¹, Дуванов Е.С.¹, Кудинов И.Ю.¹, Пащенко А.Ф.²,
Пащенко Ф.Ф.^{2,3}, Андриюшин А.В.⁴, Аракелян Э.К.⁴, Мезин С.В.⁴,
Пикина Г.А.^{2,4}

¹ Липецкий государственный технический университет,
398055, Липецк, ул. Московская, 30

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
117997, Москва, Ул. Профсоюзная, 65

³ Московский физико-технический институт (НИУ),
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

⁴ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
edik_arakelyan@inbox.ru

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО КВАДРАТИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ

В последнее время в теплоэнергетике специалисты по управлению стали обращать довольно пристальное внимание на появление таких регуляторов, как линейно – квадратичные регуляторы (*LQR*, *Linear Quadratic Regulator*), нечеткие логические регуляторы (*FLC*, *Fuzzy Logic Controller*), а также на комбинацию нечетких логических и линейно – квадратичных регуляторов, именуемых нечеткими квадратичными регуляторами (*FQR*, *Fuzzy Quadratic Regulator*). С помощью рассматриваемых комбинированных регуляторов удастся реализовать все положительные свойства, характерные для их составляющих.

В настоящей работе сформулирована задача *LQR* управления, приводится описание лабораторного теплового объекта управления, на котором был проведен активный эксперимент и для которого была определена передаточная функция и решена задача *LQR* управления. Сконструированы *LQR*, *FLC* и *FQR* регуляторы и проанализированы показатели качества переходных процессов в системах управления с ними.

Показано, что при управлении нечетким квадратичным регулятором *FQR* достигаются довольно высокие показатели качества: большое быстродействие, малое перерегулирование и время переходного процесса, которые далеко не всегда удается получить при раздельном использовании *LQR*, *FLC* регуляторов. Реализация систем управления тепловым объектом с *LQR*, *FLC* и *FQR* регуляторами осуществлялась с привлечением программных средств MATLAB и SIMULINK.

Список литературы

1. Веремей Е.И. Линейные системы с обратной связью: Учебное пособие. – Изд. Лань, 2013. – 448 с.

2. **Кудинов Ю.И., Келина А.Ю., Кудинов И.Ю., Пащенко А.Ф., Пащенко Ф.Ф.** Нечеткие модели и системы управления / Под ред. Пащенко Ф.Ф. – М.: Ленанд, 2017. – 328 с.
3. **Kumari N., Jha A.N.** Automatic Generation Control Using LQR based PI Controller for Multi Area Interconnected Power System // Advance in Electronic and Electric Engineering, 2014. – Vol. 4, No. 2. – P. 149-154.
4. **Симою М.П.** Определение коэффициентов передаточных функций по временным характеристикам линеаризованных систем // Автоматика и телемеханика, 1957. – т. XVIII, № 6. – С. 514 – 527.
5. **Тимохин А.Н., Румянцев Ю.Д.** Моделирование систем управления с применением Matlab: учеб. пособие. – М.: ИНФРА – М, 2016. – 256 с.

Кузицин В. Ф.¹, Исмаходжаев С. К.²

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, Москва, 111250, Красноказарменная ул., 14

²Институт проблем энергетики Академии наук Республики Узбекистан,
Узбекистан, Ташкент, 700143, Мирзо-Улугбекский р-н, Академгородок,
ул. Ходжаева, 29

ВСЕРЕЖИМНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ПРОМЫШЛЕННЫХ КОТЛОВ ПРИ БУФЕРНОМ ПОТРЕБЛЕНИИ ГАЗОВЫХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА

Рассматривается вопрос повышения эффективности работы промышленного парового котла при буферном потреблении доменного газа применительно к автоматической системе регулирования температуры перегретого пара в широком диапазоне изменения паропроизводительности котла. При переходе на режим с большой долей доменного газа (относительно природного газа) существенно повышается температура перегретого пара из-за больших расходов доменного газа и перемещения факела. Обычный диапазон изменения впрысков оказывается недостаточным, чтобы стабилизировать температуру пара за конвективным пароперегревателем второй ступени КПП₂. Кроме того, существенно повышается температура пара за пароперегревателем первой ступени КПП₁, так как этот участок не защищается впрысками. Для решения задачи в [1] предложено использовать комбинированную систему, в которой в дополнение к традиционному регулятору температуры пара за КПП₂ с воздействием на впрыск применяется регулятор температуры пара за КПП₁ с воздействием на положение факела путем поворота воздушных регистров горелочных устройств. При этом уменьшаются требования к впрыскам, а также защищается металл КПП₁

от перегрева. На основе имитационного моделирования показана эффективность предложенной комбинированной системы регулирования для котла ТП13Б при существенных изменениях расхода доменного газа.

Однако в [1] была рассмотрена работа системы только при одной нагрузке по расходу пара (220 т/ч, что составляет 100%). В настоящей работе для обеспечения всережимности работы котла (в диапазоне от 60 до 100%) предлагается осуществить автоматическую подстройку параметров регулирующих устройств с помощью дополнительного вычислительного устройства (ВУ) в функции от расхода пара (рис.1) по зависимостям, рассчитанным с учетом изменения динамики объекта. Здесь: $T_{пп1}, T_{впр}, T_{пп2}$ – сигналы по температуре за КПП₁, после пароохладителя и за КПП₂, соответственно, °С; $\mu_{пр}$ – регулирующее воздействие на угол поворота воздушных регистров горелочных устройств, %; $\mu_{впр}$ – воздействие на клапаны впрыска, %; $B_{дг}$ и $B_{пг}$ – расходы доменного и природного газов; $D_{пп}$ и $D_{пб}$ – расходы перегретого пара и пара из барабана котла; $W_{впр}$ – расход воды на впрыск; SP_1 и SP_2 – задание по температуре $T_{пп1}$ и $T_{пп2}$, соответственно. P_1 – регулятор температуры $T_{пп1}$ с воздействием на регистры горелок; P_2 – регулятор температуры $T_{пп2}$ с воздействием на впрыск; Д- дифференциатор.

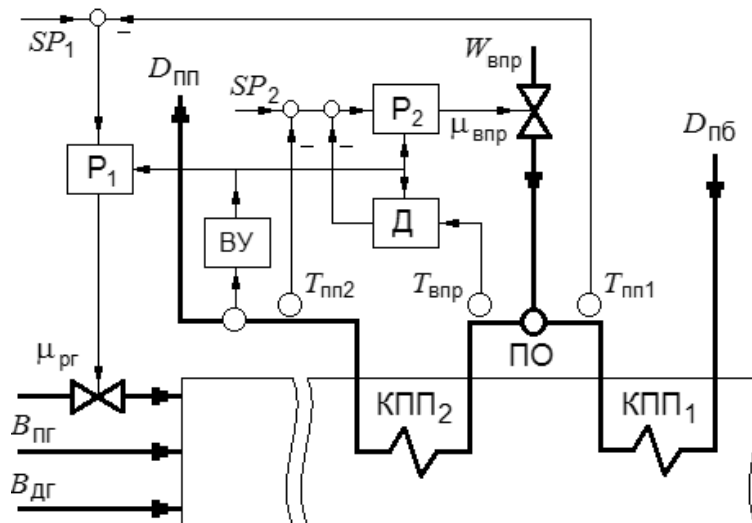


Рис.1 Функциональная схема всережимной АСР температуры пара

На основе расчетов в частотной области и имитационного моделирования во временной области с учетом нелинейных свойств исполнительных механизмов показана эффективность предложенной схемы регулирования температуры перегретого пара с автоматической подстройкой параметров в зависимости от расхода пара при буферным потреблении доменного газа при работе в широком диапазоне изменения паропроизводительности котла.

Список литературы

1. Кузицин В.Ф. , Исмаходжаев С.К. Регулирование температуры перегретого пара при буферном потреблении газовых отходов производства с воздействием на впрыск и положение факела //Теплоэнергетика, №1.2020. С.53-62.

*Кузицин В.Ф.*¹, *Мерзликина Е.И.*¹, *Хоанг Ван Ва*²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Vietnam Electricity Corporation (EVN)

Вьетнам, Ханой, ул. Кыа Бак (Район Ба Динь), д. 11

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАСТРОЙКИ АСР С ПИ- И ПИД-РЕГУЛЯТОРАМИ МЕТОДОМ МНК-ПРИБЛИЖЕНИЯ К СУБОПТИМАЛЬНОМУ РЕГУЛЯТОРУ И РАСЧЕТОМ ПО КОСВЕННЫМ ЧАСТОТНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ ОПТИМАЛЬНОСТИ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВОЗМУЩЕНИИ

Выполнен анализ эффективности двух вариантов расчета настройки автоматических систем регулирования (АСР) с ПИ и ПИД-регуляторами для объектов второго порядка с запаздыванием:

$$W_{об}(s) = K_{об} \cdot e^{-\tau s} / ((T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)) = K_{об} \cdot e^{-T_1 \beta s} / ((T_1 s + 1) \cdot (T_1 n s + 1)). \quad (1)$$

Анализ выполнен при действии возмущения на вход объекта с расчетом параметров регулятора по алгоритму МНК-приближения к субоптимальному регулятору [1] и по косвенным частотным показателям оптимальности [2,3], которые используются в алгоритме автоматической настройки регуляторов (АНР) промышленных контроллеров. Рассматривался ПИ и ПИД-регулятор с фильтром второго порядка для дифференциальной составляющей, что важно для промышленных АСР, его передаточная функция имеет вид

$$W_p(s) = K_p (1 + 1/T_i s + T_d s / (T_f s + 1)^2).$$

Для получения субоптимального регулятора использован фильтр второго порядка с постоянной времени $T_c = T_1 \cdot k_{Tc}$, и корректирующий коэффициент k_τ для аргумента переходной характеристики регулятора. При выборе k_{Tc} и k_τ учитывалось ограничение на частотный показатель колебательности ($M \approx 1,3$). Рассчитанные зависимости k_{Tc} и k_τ от параметров модели объекта $n = T_2/T_1$ и $\beta = \tau/T_1$ показаны на рис. 1., аналогичные зависимости получены для АСР с ПИ-регулятором.

При настройке по косвенным показателям использовались аппроксимирующие формулы, определяющие оптимальные значения косвенных показателей в зависимости от параметров модели объекта в достаточно широком диапазоне их изменения [3].

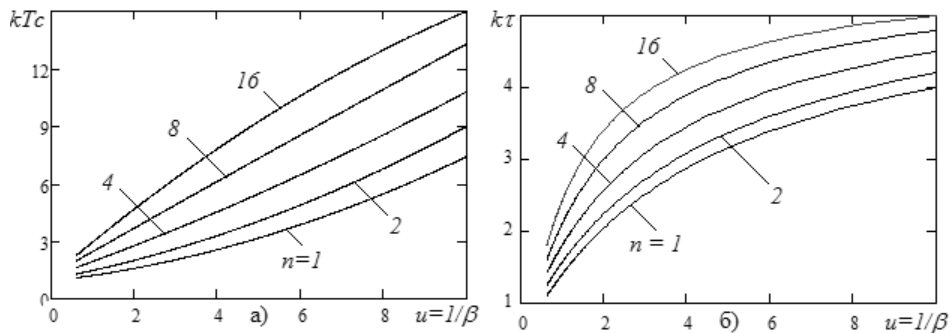


Рис. 1. Зависимости k_{Tc} и k_{τ} от параметров модели объекта для АСР с ПИД-регулятором

Показано, что при действии возмущения на входе объекта метод настройки АСР по косвенным частотным показателям обеспечивает более высокую точность регулирования. Также он удобнее для реализации в контроллерах, так как позволяет выполнять все расчеты автоматически за один рабочий цикл контроллера без пробных расчетов по выбору k_{Tc} и k_{τ} и диапазона частот приближения. Полученные результаты идентичны для АСР с ПИ и ПИД-регуляторами.

Список литературы

1. **Г.А. Пикина, Ю.С. Бурцева.** Беспойсковая настройка линейных регуляторов на минимум квадратичного критерия // Теплоэнергетика. 2014. №3. С. 23-28.
2. **В.Ф. Кузицин, В.С. Царев.** Алгоритмы ускоренной автоматической настройки регуляторов с оценкой модели объекта по его реакции на импульсное воздействие и в режиме автоколебаний // Теплоэнергетика. №4. 2014. С. 35-44.
3. **В.Ф. Кузицин, Е.И. Мерзликина, Хоанг Ван Ва.** Косвенные частотные показатели оптимальности для автоматической настройки регуляторов: учет зависимости от параметров модели объекта // Вестник МЭИ. №6. 2019. С. 106-113.

Кузнецов Г.В.¹, Толокольников А.А.¹, Чередник И.В.¹, Янковский С.А.¹
¹ Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина 30
jankovsky@tpu.ru

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ДРЕВЕСИНЫ НА СОСТАВ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ БУРОГО УГЛЯ МАРКИ ЗБ

Выбросы угольных ТЭС приводят к загрязнению атмосферы территорий, находящихся на незначительном расстоянии от источника загрязнения [1-2]. Альтернативное решение экологических проблем сжигания угля ученые всего научного энергетического сообщества ищут многие десятилетия. Одним из наиболее перспективных решений этой глобальной проблемы, является применение многокомпонентных топлив – смесей углей с биомассой, которая является углерод-нейтральным топливом. Установлено [3], что применение древесной биомассы в смесевых топливах, приводит к существенному улучшению экологических характеристик при незначительном снижении калорийности (например, до 9% для смесей на основе угля марки Т и сосновых опилок), а также к снижению времен задержки зажигания таких смесевых топлив. Но, несмотря на многочисленные попытки (в том числе и удачные) совместного сжигания различных видов биомассы с углем, до сих пор не установлены механизмы секвестирования диоксидов серы, азота и углерода, образующихся при совместном высокотемпературном разложении углей в смеси с диспергированной древесиной. Целью исследования является экспериментальное изучение процессов, приводящих к секвестированию оксидов серы, образующихся при высокотемпературном пиролизе углей, в результате их взаимодействия с парами воды, выделяющимися при термическом разложении древесины в условиях высоких температур. Пары серной кислоты в дальнейшем взаимодействуют с оксидами металлов неорганической части углей. Образующиеся при этом соли кальция и алюминия выпадают в зольный остаток, не уносимый с дымовыми газами от энергетических котлов в атмосферу.

В качестве исходной компоненты исследовавшихся смесевых твердых топлив был выбран бурый уголь марки ЗБ (месторождение «Балахтинское»), использующийся в котлоагрегатах большой и малой энергетики. Второй компонентой исследовавшихся смесевых топлив была измельченная древесина отходов переработки сосны (ООО Дзержинский ЛПК г. Томск).

На экспериментальной установке по исследованию процессов термического разложения топлив и смесей на их основе в различных газовых средах проведена серия экспериментов процессов термического разложения смесей измельченного угля марки ЗБ и диспергированной древесины в диапазоне температур от 400 °С до 1000 °С с анализом элементного состава исходных смесей, угольной и древесной компонент и их зольного остатка. Выполнен рентгенофазовый анализ состава зольного остатка исследовавшихся смесевых топлив, образующегося в результате высокотемпературного разложения смесей диспергированного бурого угля и измельченной древесины в диапазоне температур до полного завершения процессов пиролиза органической части обеих компонент при разных концентрациях последних с целью установления механизма влияния древесины на снижение содержания в газообразных продуктах пиролиза смесей диоксида серы. Установлено, что при совместном термическом разложении смеси частиц угля и древесины рост концентрации последней приводит к росту в твердых продуктах пиролиза доли солей кальция и алюминия. Значительный синергетический эффект по секвестированию диоксида серы достигается при формировании сульфатов кальция и алюминия в золе смесевых топлив вследствие совместного термического разложения частиц угля и древесины при долях древесной компоненты в смеси от 10 % до 50 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 18-29-24099\18.

Список литературы

1. D. A. Krylov and G. P. Sidorova, "Ways to reduce the ecological impact of coal thermal power plants of Russia on the environment," *Gorn. Inf.-Anal. Byull.*, No. 11, 277–285 (2015).
2. "Dynamics of electric energy consumption as an indicator of economic activity," *Byull. Sots.-Ekon. Krizisa v Rossii*, No. 10 (2016). <http://ac.gov.ru/files/publication/a/7945.pdf>.
3. **Kuznetsov, G.V., Yankovskii, S.A.** Conditions and Characteristics in Ignition of Composite Fuels Based on Coal with the Addition of Wood // *Thermal Engineering*. V. 66(2). P. 133-137.

Кузнецов К.И., Понуровская В.В., Гранченко П.П.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
berenika973@mail.ru

КОМПЛЕКС ВИРТУАЛЬНЫХ РАБОТ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ. РАЗДЕЛ «ПРОЦЕССЫ В ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗАХ И ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ»

В разработанном комплексе представлены две виртуальные лабораторные работы: «Измерение теплоёмкости воздуха» и «Процессы во влажном воздухе», выполненные в электронной таблице Excel 2010. Работы посвящены изучению процессов в идеальных газах, в частности во влажном воздухе, и являются виртуальными аналогами физических работ, на действующих стендах в лаборатории технической термодинамики кафедры Теоретических основ теплотехники МЭИ, соответствующих программе подготовки бакалавров по дисциплинам «Термодинамика» и «Техническая термодинамика». Представленный материал предназначен для включения в учебный процесс в случае ремонта действующих лабораторных стендов, а также для дистанционного обучения студентов.

Для построения программ наряду с электронной таблицей Excel 2010 использовались расчёты свойств в программном пакете Mathematica-8, обеспечивающие описание полиномиальными зависимостями табличных справочных данных, рекомендованных студентам в курсе обучения. Схемы и другие графические построения выполнены с использованием доступных графических редакторов (Paint, Photoshop). Программные продукты устанавливаются на компьютерах с конфигурацией, позволяющей применение программного пакета Office 2010 – 2016, установленных предварительно. Ячейки таблицы, не заполняемые студентами, защищены от изменений. Доступ внешних подключений к компьютерам защищён паролем.

Список литературы

1. **Андрианова, Б.В. Дзампов, В.Н. Зубарев, С.А. Ремизов, Н.Я. Филатов** Сборник задач по технической термодинамике / Т.Н. – 5-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006 – 356 с.:ил.
2. **А.А. Александров, К.А. Орлов, В.Ф. Очков** Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики. Справочник. – М.,: Издательство МЭИ, 2017. – 226 с.
3. **Дьяконов В. П.** Mathematica 5/6/7. Полное руководство. - М.: ДМК Пресс, 2010. - 624 с.: ил.
4. **И.И. Иванов** Microsoft Excel 2010 для квалифицированных пользователей. М.: Издательство: Академия АЙТИ, 2011. 244 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЕКВЕСТРИРОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ЗАЖИГАНИИ ЧАСТИЦ ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Будущее теплоэнергетики связано с широкомасштабным использованием новых экологически «чистых» топливных композиций на тепловых электрических станциях [1]. Такие композиты базируются на смесях различных ископаемых (уголь, нефть, газ) и возобновляемых (биомасса, биодизель, биогаз) топливах. К последним относятся водоугольные, органоводоугольные, биоугольные композиты. Но можно с уверенностью сказать, что самым перспективным из них на настоящее время являются древесно-угольные смеси (или древесно-угольное топливо - ДУТ) [2].

В данной работе представлены наиболее полные (по описанию комплекса теплофизических и термохимических процессов) физическая и математическая модели воспламенения частиц древесно-угольной смеси и показан потенциал методов математического моделирования при прогнозировании условий и характеристик горения таких смесей. При постановке задачи рассматривался (достаточно типичный для практики) вариант взаимного расположения частиц угля и древесины.

Результаты

С целью верификации математической модели процессов секвестрирования оксидов азота в индукционный период времени проведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений времен задержки воспламенения (t_{ign}) частиц исследованного древесно-угольного топлива. Для этой цели проведены эксперименты по определению времени задержки воспламенения.

На рисунке 1 приведены зависимости времен задержки воспламенения частиц древесно-угольной смеси в условиях

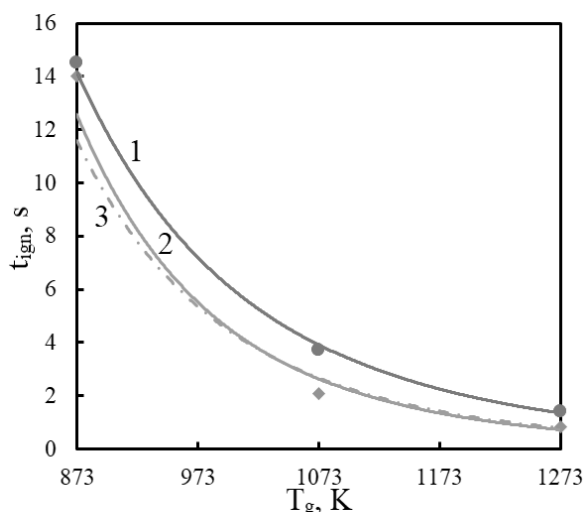


Рис. 1. Зависимости времен задержки зажигания от температуры внешней среды: 1 – частица угля; 2, 3 – частица древесины; 1, 2 – эксперимент; 3 – численное моделирование.

высокотемпературного нагрева. Сравнительный анализ экспериментальных и полученных по результатам численного моделирования значений t_{ign} показал их хорошее соответствие. Отличие теоретических и экспериментальных значений времен задержки зажигания не превышает 8,5%. Можно отметить существенно нелинейный характер зависимостей $t_{ign}(T_g)$. Это обусловлено значительным влиянием комплекса теплофизических и термохимических процессов, протекающих в условиях интенсивных фазовых (испарение свободной влаги древесины) и термохимических превращений (термическое разложение основных компонентов древесины (лигнин, целлюлоза, гемицеллюлоза) органической части угля; взаимодействие водяных паров и углерода кокса; окисление горючих компонентов газообразных продуктов пиролиза угля и древесины) в индукционный период времени.

Анализ зависимостей рисунка 1 показывает, что угольные частицы всегда воспламеняются позже древесных (древесина более реакционное топливо) при адекватных начальных размерах. При этом стоит отметить, что интервал времени между моментами зажигания частиц древесины и угля достаточно большой и составляет от 0.5 до 1.5 секунды в зависимости от размеров частиц и температуры внешней среды.

Список литературы

1. Clean Coal Engineering Technology/ Bruce G. Miller.; Oxford OX5 1GB, United Kingdom 50.
2. Munna Verma, Chanchal Loha, Amar Nath Sinha, Pradip Kumar Chatterjee. Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 71 (2017) 732-741

Курьянов В.Н.¹, Султанов М.М.¹, Курьянова Е.В.¹, Скопова Е.М.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Волжский, 404110, проспект Ленина, 69
vek077@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ ПО КРИТЕРИЮ ИНДЕКСА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Приведен анализ информации о совместном использовании показателей надежности и индекса технического состояния при оценке состояния основного электротехнического оборудования на примере схем выдачи мощности В энергосистему (СВМЭ) современными ТЭС.

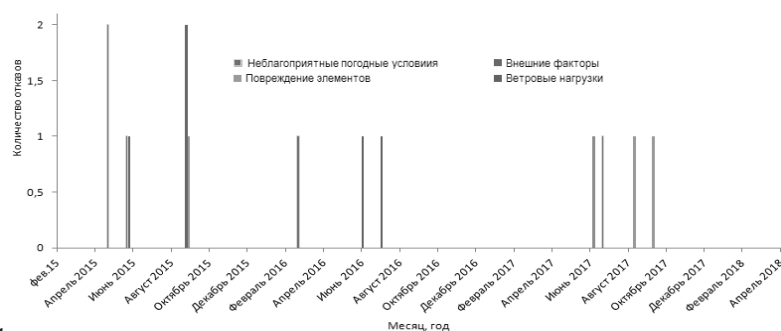


Рис. 1. Количество отказов оборудования СВМЭ за четыре года.

Авторами предложено ввести новый параметр - индекс технического состояния на отказ (ИТСО). Оценка технического состояния осуществляется путем сопоставления фактических значений параметров технического состояния функциональных узлов со значениями, установленными нормативной и технической документацией, а также предприятиями-изготовителями, и последующего определения индекса технического состояния, индекса технического состояния на отказ функциональных узлов и оборудования в целом для своевременного планирования ремонтных работ и предотвращения аварийных ситуаций.

Если индекс технического состояния достигает значения ИТСО, то повышается вероятность наступления аварийной ситуации на элементах ТЭС. Поэтому, при равенстве значений расчетно-аналитическая программа, согласно [1], выдает рекомендации о необходимости проведения технического обслуживания и/или ремонта линии. В табл. 1 представлены сравнительные расчетные данные энергетического оборудования за период времени 2016 г. - 2019 г.

Таблица 1. Сравнительные расчетные данные ВЛ за период времени 2016 г. - 2019 г.

№ оборудования	Среднее значение ППО $\times 10^{-5}$	Среднее значение ИТС	Значения ИТСО
1	32	76,91	81,46
2	538	82,61	82,4
3	134	81,04	77,51

Из таблицы следует, что ИТСО для исследуемых узлов отличается от регламентируемого нормативно-технической базой, равного 60, и находится в диапазоне от 77,51 до 82,4 при параметре потока отказов в диапазоне от 32 до 538 $\times 10^{-5}$. Для указанных значений, согласно предложенной методике оценки технического состояния, необходимо включать оборудование в ремонтную программу.

Рассмотренные алгоритмы позволяют сформировать усовершенствованный подход к планированию ремонтной программы с учетом особенностей эксплуатации выбранного энергетического оборудования. При введении в алгоритм расчета индекса технического состояния на отказ конкретной единицы оборудования, возможно оптимизировать планирование ремонтной программы. Анализируя результаты расчетов, возможно подобрать наиболее благоприятный период для производства работ, и, как следствие, предотвратить технологические нарушения.

Список литературы

1. Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

Левенок Д.И.¹, Ильин Е.Т.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
zakharowa-diana@mail.ru

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ СЕТЕВОЙ ВОДЫ

Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) являются участниками рынка электроэнергии и мощности, а так же продают тепловую энергию, согласно установленным тарифам. Определяющим условием эффективности работы ТЭЦ является работа по тепловому графику. Учитывая колебания спроса на тепловую и электрическую энергию, в течение суток, а также по сезонам года, существенную эффективность представляют технологии, увеличивающие продолжительность работы ТЭЦ по тепловому графику и обеспечивающие максимальную доходность от продажи электроэнергии. С этой точки зрения, применение тепловых аккумуляторов сетевой воды позволяет частично решить эту проблему.

Анализ спроса и предложения энергии показывает, что в дневные часы, спрос на электроэнергию максимален, максимальна и цена сбыта (рис. 1). Ночью спрос на электроэнергию мал, соответственно и цена минимальна в течение суток (рис. 1). Исходя из этого условия, выбран режим работы теплового аккумулятора:

зарядка аккумулятора производится в дневные часы, при одновременном росте выработки электроэнергии на тепловом потреблении, а разрядка ночью, при этом станция разгружается до технологического минимума. Станция

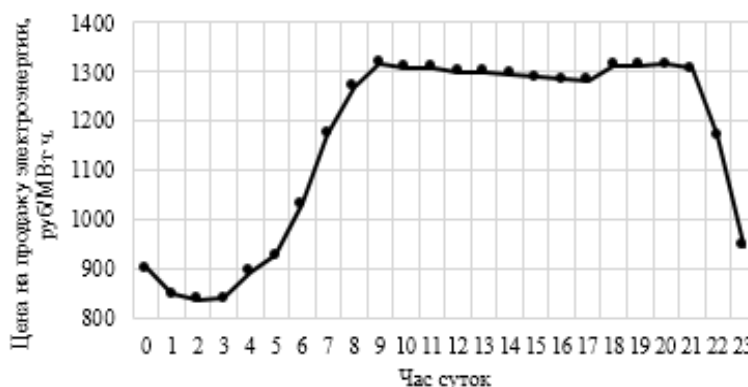


Рис. 1. Изменение цен на электроэнергию на РСВ в течение суток

продает большее количество электроэнергии, выработанной по тепловому графику в дневные часы по высокой цене и меньшее по низкой цене, в часы провала нагрузки. Это приводит к росту маржинального дохода станции и соответственно обуславливает экономическую эффективность предлагаемой технологии.

В этом случае важным фактором является ёмкость системы аккумулирования. С увеличением объёма запасаемого теплоносителя увеличивается количество аккумулируемой теплоты, растёт регулировочный диапазон оборудования, но также увеличиваются капиталовложения в реализацию технологии и затраты на её эксплуатацию.

В ходе расчётных исследований определена оптимальная ёмкость системы аккумулирования для турбоагрегата Т-110-130, с учётом регулировочного диапазона основного оборудования, температурного графика тепловой сети и климатических условий города Москвы. Проведена оценка экономической эффективности аккумуляторов сетевой воды.

Список литературы

1. **Готлиб А.И.** О возможном расширении регулировочного диапазона электрической мощности теплофикационной турбины типа Т с использованием баков-аккумуляторов сетевой воды: Реферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.14. — Алма-Ата, 1991. — 20 с.

*Логачев К.И.*¹, *Зиганин А.М.*^{1,2}, *Гольцов А.Б.*¹, *Аверкова О.А.*¹
¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова «БГТУ им. В.Г. Шухова»,
Белгород, 308012, Костюкова, 46
² Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ),
420043, Казань, Зеленая, 1
logachev.ki@bstu.ru

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ МЕСТНОЙ ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Для улавливания и локализации пылегазовых выбросов загрязняющих веществ в различных сферах жизнедеятельности человека наибольшее распространение получили системы местной вытяжной вентиляции [1,2]. Основной проблемой эксплуатации таких систем является снижение затрат электроэнергии, необходимой для их функционирования. Мощность электродвигателя тягодутьевых средств пропорциональна расходу воздуха, удаляемым вентилятором и сопротивлению вентиляционной сети. Поэтому необходима разработка методов снижения указанного расхода и потерь давления, но при сохранении высокой эффективности улавливания загрязняющих веществ. В данном докладе обобщаются разрабатываемые нами методы энергосбережения систем местной вытяжной вентиляции за счет использования свойств отрывных, закрученных и рециркуляционных пылевоздушных потоков.

Исследование отрывных течений на входе в местные отсосы [3-5], иных элементов систем вытяжной вентиляции позволило определить границы вихревых зон, профилирование по которым существенно снижает потери энергии на преодоление местных сопротивлений. Выявленные закономерности поведения пылевых частиц вблизи отсосов-раструбов позволяют определить необходимый для локализации пылевыделений минимальный расход удаляемого воздуха.

Свойства закрученных течений применены для повышения дальности захвата загрязняющих веществ открытыми местными отсосами и снижения пылеуноса в аспирационную сеть в местных отсосах закрытого типа - укрытиях. В первом случае исследовано влияние соосно расположенной с отсосом кольцевой приточной закрученной струи на дальность его действия при различных соотношениях радиусов и расходов всасываемого и приточного воздуха. Вращения дискового цилиндрического канала с торцевым отсосом также способствует повышению дальности захвата. Использование вращающегося цилиндрического канала с отсосом на его боковой поверхности, напротив снижает дальность захвата пыли, что может быть применено в аспирационных укрытиях с функцией пылеосадительной камеры.

Необходимый расход, удаляемого вентилятором воздуха в системах аспирации при перегрузках сыпучих материалов, складывается из расходов воздуха, увлекаемого (эжектируемого) сыпучим материалом и поступающего через неплотности. Организация естественных рециркуляционных течений в загрузочных желобах сыпучего материала при помощи байпасных (обводных) каналов позволило снизить расход эжектируемого воздуха. Численно при помощи решения полученного дифференциального уравнения эжектируемого воздуха и экспериментально на разработанной лабораторной установке показана целесообразность использования системы «перфорированный загрузочный жёлоб – соосно расположенная байпасная камера». При помощи численного моделирования определены пути снижения энергоёмкости за счет использования принудительной рециркуляции, организованной за счет подачи струи в загрузочный желоб. Использование тонких профилей на входе в неплотности аспирационных укрытий позволило снизить расход, поступающего в него воздуха, за счет отрыва потока и повышения их местного сопротивления. Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ №18-79-10025 и РФФИ № 16-08-00074а.

Список литературы

1. **Логачев И.Н.** Энергосбережение в аспирации: теоретические предпосылки и рекомендации / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова. М.- Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2013. 504 с.
2. **Logachev I.N.** Local Exhaust Ventilation: Aerodynamic Processes and Calculations of Dust Emissions / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova. Boca Raton: CRC Press, 2015. 564 p.
3. **Logachev K.I.** A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods / K.I. Logachev, A.M. Ziganshin, O.A. Averkova, A.K. Logachev // Energy Build. 2018. Vol. 173. P. 58–70.
4. **Logachev K.I.** On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet / K.I. Logachev, A.M. Ziganshin, O.A. Averkova // Build. Environ. 2019. Vol. 151. P. 338–347.
5. **Logachev K.I.** A study of separated flows at inlets of flanged slotted hoods / K.I. Logachev, A.M. Ziganshin, O.A. Averkova // J. Build. Eng. 2020. Vol. 29. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101159>

Любов В.К.¹, Попова Е.И.,¹ Попов А.Н.¹
¹Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова,
163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 17
vk.lubov@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ГРАНУЛ И ЩЕПЫ ТОПОЛЯ

Наиболее распространенным видом быстрорастущих древесных пород, имеющих большое хозяйственное и промышленное значение, является тополь. Поэтому определение эффективности его энергетического использования является важной задачей. Исследовательские работы проводились в здании Учебно-научного центра энергетических инноваций Высшей школы энергетики, нефти и газа САФУ имени М.В. Ломоносова, подключенном к системе централизованного теплоснабжения. Резервным источником теплоснабжения здания является водогрейный котел «Firematic 60» австрийской фирмы Herz Energietechnik GmbH, который также используется при реализации лабораторного практикума и проведении исследовательских работ. Котел рассчитан для работы на древесных гранулах и щепе [1]. По данным фирмы изготовителя номинальная мощность котла (60 кВт) обеспечивается при сжигании биотоплива с относительной влажностью $W_t' \leq 25$ %. Конструкция и принцип работы котла представлены в [1]. Комплексное исследование эффективности работы котла проводилось в три этапа. В ходе первого выполнялись балансовые опыты при подаче в топку древесных гранул диаметром 6 мм, изготовленных в ООО «Регион-Лес». На втором этапе – котел работал на древесных гранулах диаметром 8 мм, производства ЗАО «Лесозавод 25». В ходе третьего этапа энергообследования в топке котла сжигали щепу тополя. Анализ работы водогрейного котла выполнялся в соответствии с разработанным программно-методическим комплексом [2].

Анализ условий тепловой работы котла показал, что потери тепла с уходящими газами составляют 6,70–7,30 %, при этом с ростом нагрузки и повышением температуры воды на входе в котел они увеличиваются. Ступенчатая схема сжигания топлива и эффективное перемешивание вторичного воздуха с горючими компонентами топлива, а также поддержание коэффициента избытка воздуха в топке в диапазоне 1,29–1,44 позволили обеспечить низкие значения потерь тепла от химической неполноты сгорания топлива (не более 0,05 %).

Потери тепла с механической неполнотой сгорания при работе котла на древесных гранулах диаметром 6 и 8 мм имели очень низкий уровень (0,25 и 0,27 % соответственно), что объясняется однородностью

гранулометрического состава сжигаемого топлива, его низкой зольностью, и достаточно высокой теплотой сгорания (Q_i^r составила 17,21 и 17,26 МДж/кг соответственно). Данные факторы обеспечили высокую полноту выгорания горючих компонент в очаговых остатках.

Щепа тополя, в отличие от древесных гранул, имеет более высокую зольность ($A^r=1,75$ %) и менее однородный гранулометрический состав, что привело к увеличению потерь тепла с механической неполнотой сгорания (до 0,74 %), при этом содержание горючих веществ в уносе твердых частиц из топки составило 41,70 %. Исследование гранулометрического состава уноса и пофракционного содержания горючих веществ показало, что определяющее влияние на потерю тепла с механической неполнотой сгорания оказывает недожог горючих компонент в частицах размером $125 \leq \delta < 1000$ мкм. При проведении балансовых опытов КПД брутто водогрейного котла определялся по уравнению обратного баланса и составлял 91,58–92,66 %, при этом наибольшие значения были достигнуты при сжигании древесных гранул. Эмиссии загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух, имели следующие значения: $NO_x=47-79$; $CO = 5-55$; твердые частицы 7,03–12,91 мг/МДж.

Комплексное энергетическое обследование показало, что водогрейный котел «Firematic 60» обеспечивает высокие технико-экономические показатели и минимальные выбросы вредных веществ в окружающую среду при сжигании древесных гранул и щепы тополя.

Список литературы

1. Определение потерь тепла в окружающую среду на основе комплексного исследования эффективности работы котлов/ В.К. Любов, П.В. Малыгин, А.Н. Попов, Е.И. Попова. Теплоэнергетика, 2015. № 8. С. 36– 40.
2. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив/ В.К. Любов, С.В. Любова. Архангельск.: САФУ, 2017. 533 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК В СОСТАВЕ ПГУ

Данная статья посвящена исследованию экономической эффективности применения теплонасосных установок в составе парогазовых энергообъектов. В настоящее время существует ряд публикаций, посвященных тематике энергосбережения на объектах теплоэнергетики с применением технологий утилизации низкопотенциальной теплоты от различных источников. Однако, несмотря на наличие проработанных технических решений, остается открытым вопрос об экономической целесообразности применения теплонасосных установок на тепловых электрических станциях, в частности, на парогазовых установках (ПГУ). Зачастую односторонний подход к решению данной задачи приводит к ложным заключениям о неэффективности энергосберегающих мероприятий, в частности применения тепловых насосов, в большой энергетике либо, наоборот, к слишком позитивной картине, формирующей необоснованно завышенные ожидания от технологии.

Сложность расчета экономической эффективности применения теплонасосных установок заключается в двух основных аспектах. Первый связан с функционированием энергетических объектов в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ), второй – с проблемой качественной оценки капитальных вложений в теплонасосную установку, а также прямых и косвенных издержек при создании экономической модели.

Применение энергосберегающих технологий на объектах генерации в условиях работы на ОРЭМ имеет ряд особенностей. Теплонасосные установки в составе ПГУ могут использоваться для отпуска потребителю дополнительной тепловой энергии. Коэффициент преобразования показывает, сколько электрической энергии затрачивается для выработки тепловой энергии на тепловом насосе. Величина коэффициента

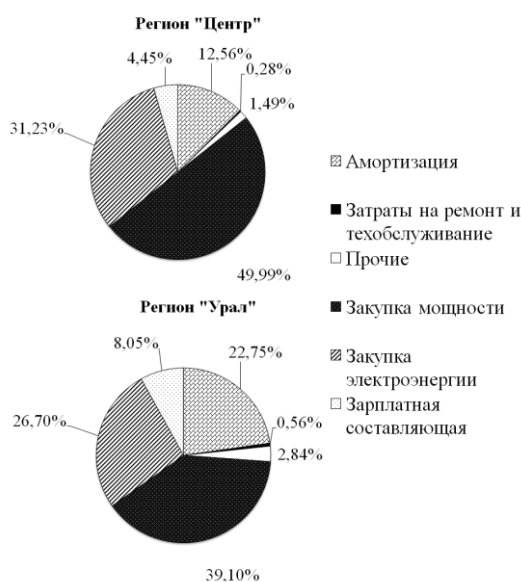


Рис. 1. Сравнение себестоимости производства тепловой энергии по регионам

преобразования ограничена двумя характерными температурами – подвода низкопотенциальной теплоты к тепловому насосу и отвода от него нагретой среды в конденсаторе. Чем больше разница между этими температурами, тем ниже коэффициент преобразования и выше затраты электрической энергии на привод компрессора теплового насоса. Наибольшим коэффициентом преобразования обладают парокомпрессионные тепловые насосы. Однако, в случае их применения в составе ПГУ, происходит увеличение электрических собственных нужд всей станции. Если на ПГУ возникает превышение электрических нужд сверх норматива, закупается электроэнергия на теплонасосную установку на ОРЭМ, увеличивая производственные издержки станции.

В исследовании была рассмотрена модель парокомпрессионной теплонасосной установки в составе энергоблока ПГУ-110 [1]. Создание комплексной экономической модели осуществлено в программном продукте Project Expert. На рис. 1 приведен пример структуры себестоимости тепловой энергии, получаемой от парокомпрессионной теплонасосной установки в составе ПГУ для двух регионов: «Центр» и «Урал». Как видно, основной вклад в себестоимость производства тепловой энергии вносят составляющие по закупке электроэнергии и мощности для теплового насоса. Были получены экономические модели и результаты расчетов тепловых насосов в составе ПГУ-110. Например, для региона «Центр» себестоимость производства тепловой энергии, полученной с применением технологии утилизации низкопотенциальной теплоты составила 1 344 руб./Гкал, чистый дисконтированный доход – 27 384 187 руб., внутренняя норма доходности – 10,20 и индекс прибыльности 1,03.

Список литературы

1. **Олейникова Е. Н.** Исследование и оптимизация теплонасосных установок в структуре схем ПГУ-ТЭЦ : дис. – Москва, 2015.-164 с, 2015.

Марьин Г.Е.¹, Менделеев Д.И.¹, Ахметшин А.Р.²

¹ АО «Татэнерго» филиал «Казанская ТЭЦ-2»,
Казань, 420036, ул. Тэцевская, 11

² Казанский государственный энергетический университет
Казань, 420066, ул. Красносельская, 51
Dylankn@ya.ru

ПОДВОД РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОТОЧНУЮ ЧАСТЬ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Проблема морального и физического старения парка энергетического оборудования очень актуальна в данный момент. Реконструкция и ввод нового оборудования ТЭС должно быть с использованием новых технологических решений и новых технологий. Перспективным направлением является использование газотурбинных технологий. Для энергетики это внедрение газотурбинных установок (ГТУ) взамен отработавших паротурбинных установок (ПТУ).

Создание новых ГТУ можно разделить на три направления:

- 1) Строительство ГТУ иностранными компаниями.
- 2) Покупка лицензии на производство ГТУ.
- 3) Конверсия авиационных двигателей для использования их в стационарных ГТУ.

Авиационные двигатели проектировались так, чтобы наилучшие показатели были на определенной высоте и скорости полета. На земле эти двигатели работают часто с неоптимальными параметрами, кроме того при температуре окружающего воздуха больше 15 °С на всех газотурбинных двигателях наблюдается снижение вырабатываемой мощности.

Традиционные способы повышения мощности, как повышение температуры в камере сгорания или совершенствование проточной части для конверсионных двигателей не могут быть применены, из-за резкого усложнения схемы установки и как следствие ее удорожания.

Одним из способов повышения энергетических и экономических характеристик конверсионных двигателей является подвод дополнительного рабочего тела в проточную часть.

В данной работе проведено исследование впрыска различных веществ в проточную часть двухконтурного газотурбинного двигателя (ГТД). Исходной турбиной для проведения исследования был взят авиационный двигатель семейства НК-8, с целью его наземного применения, модернизированный дополнительной силовой турбиной.

Ввод дополнительного рабочего тела в проточную часть позволяет увеличить термодинамическую эффективность и удельную мощность

ГТУ. При взаимодействии подводимой рабочей смеси с рабочим телом (продуктами сгорания) ГТУ происходят изменения термодинамических свойств, таких как температура T , теплоемкость C_p , показатель процессов расширения k , работоспособность R , а также изменяется массовый расход рабочего тела.

Расчет эффективности подвода дополнительного рабочего тела проводился на математической модели. Созданной с помощью автоматизированной системы газодинамического расчета энергетических турбомашин (АС ГРЭТ).

Масленников Г.Е.¹, Рыжков А.Ф.¹

¹ ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
Екатеринбург, 620002, ул. Мира, 19
g26m12@gmail.com

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТВЕРДОТВОРИВОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ С ГАЗОГИДРАТНОЙ СИСТЕМОЙ CCUS

Для повышения эффективности работы IGCC с Pre-combustion CCS необходим переход к менее затратным технологиям разделения газовой смеси и утилизации CO₂. В этом направлении перспективной является новая технология газогидратного разделения, теория и практика которого интенсивно разрабатывается в мировом сообществе [1].

Суть способа заключается в переводе газообразного CO₂ после реактора водяного сдвига в газогидратную форму, представляющую собой твердую фазу в виде кристаллов. Так как давление образования гидрата CO₂ сопоставимо с давлением в узле ВЦГ и на порядок ниже, чем давление образования гидратов H₂ и N₂, содержащихся в синтез-газе, способ обеспечивает высокую селективность выделения CO₂ без дополнительной компрессии газовой смеси [2, 3]. Помимо этого, возможна поставка потребителю сверхкритического CO₂, полученного в результате повышения давления водной суспензии CO₂ шламовым насосом до 10-30 МПа, разложения гидрата и отделения воды от CO₂.

При разработке схемы ЭУ (энергоустановки) её параметры подбираются с учетом требований узла гидратного выделения CO₂. Одним из основных условий является давление гидратообразования, которое для смеси CO₂ и H₂ с лежит в диапазоне от 2-3 МПа до 6-7 МПа в зависимости от применяемых добавок.

Целью настоящей работы является проведение предварительной оценки термодинамических и технико-экономических показателей ЭУ с использованием имеющихся в литературе данных по гидратному выделению CO_2 . На рис. 1 представлена идеализированная схема предлагаемой ЭУ, где ЭУ – энергоустановка, производящая теплоэлектроэнергию; БВ – блок выделения CO_2 из потока продуктов неполного сгорания угля (синтез-газа) перед сжиганием в энергоустановке или продуктов полного сгорания (дымовые газы за энергоустановкой) с давлением $P_{\text{РАЗД}}$, зависящим от места БВ в технологической схеме энергоустановки; БС – блок согласования параметров состояния CO_2 с потребителем, в нем производится подгонка параметров CO_2 ко входным параметрам блока потребления (по давлению, температуре, фазовому составу и пр); БП – блок потребления, в котором CO_2 аккумулируется в геологических формациях, либо переходит в полезный продукт в процессе производства; α_1 – коэффициент возврата CO_2 в производство; α_2 – коэффициент возврата CO_2 в энергоустановку; α_3 – допустимый коэффициент выбросов CO_2 в атмосферу для данного способа утилизации или производства.

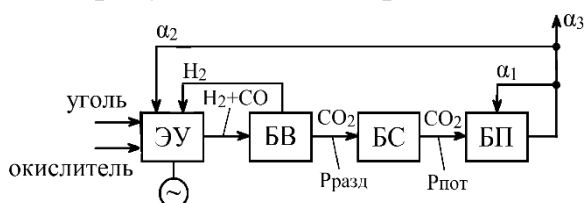


Рис. 1. Схема потоков техногенного углерода в ЭУ-CCUS.

Применения нового газогидратного метода выделения CO_2 из синтез-газа с учетом требований со стороны потребителей в части CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) позволит обеспечить высокую эффективность электрогенерации на уровне $\eta_{\text{НЭ}} > 50\%$ и экологичность процесса (степень улавливания CO_2 – 90-99%) при близком к традиционному для газотурбинных технологий уровне давлений и температур, что будет создавать серьезные конкурентные преимущества проекта перед наиболее известными новейшими циклами типа Graz и Allam и сформирует базис для решения глобальной долгосрочной задачи развития генерации на базе органического ископаемого топлива.

Список литературы

1. Hydrate-based carbon dioxide capture from simulated integrated gasification combined cycle gas / X. Chungang [et al.] // Journal of Natural Gas Chemistry. 2012. № 21. P. 501—507.
2. Dashti H., Yew L. Z., Lou X. Recent advances in gas hydrate-based CO_2 capture / Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015. № 23. P. 195—207.
3. A review of the 8 hydrate based gas separation (HBGS) process for carbon dioxide pre-combustion capture / P. Babu [et al.] // Energy. 2015. № 85. P. 261—279.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К АУДИТУ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АСУ ТП

Аудит информационной безопасности – это анализ соответствия требованиям безопасности, оценка степени соответствия субъекта (в данном случае поставщика облачных услуг) требованиям безопасности.

Многие отрасли промышленности используют ERP и SCADA системы, например, металлургия и энергетика, хранение данных в этих системах строго регламентировано и должно соответствовать требованиям конфиденциальности и защиты данных. В тоже время, разработчики систем предлагают всё больше облачных решений для бизнеса, которые удешевляют процесс развёртывания системы и упрощают процесс хранения информации. Чтобы обслуживать компании такого типа, поставщики облачных услуг должны быть в состоянии подтвердить свое соответствие последним стандартам и нормативам. Без правильного набора инструментов облачные характеристики, такие как эластичность, динамичность и многопользовательский режим, делают проверку соответствия этим стандартам сложной и дорогостоящей.

Аудит соответствия требованиям безопасности обычно включает ручную проверку регулярно генерируемых отчетов и журналов аудита, а также динамические тесты, проводимые во время выполнения. Однако применение таких методов в облаке будет трудоемким и дорогостоящим из-за характеристик облака. Например, чтобы доказать изолированность сети, необходимо проверить все уровни, такие как управление облаком, а также виртуальная сеть, оверлейная сеть, реальная сеть и физическая сеть. Результаты каждого процесса проверки на уровнях коррелируются, чтобы избежать каких-либо пробелов. Современные практики, такие как проверка проектной документации, внедрение сетевого трафика и тестирование на проникновение, не работают в среде, где арендаторы совместно используют ресурсы, а параметры сети изменяются быстро и динамично. Поэтому операторам и поставщикам облачных услуг необходим новый набор автоматизированных инструментов и методов, которые могут управлять безопасностью и в соответствии с требованиями, защищать активы потребителей и предоставлять услуги, связанные с безопасностью, непрерывным и экономически эффективным образом.

Облачные технологии становятся неотъемлемой частью в современных вычислениях, и компании во многих отраслях промышленности переходят к использованию облачных решений. Поэтому способы обеспечения безопасности в облаке набирают обороты. К сожалению, некоторые проблемы, связанные с конкретными

особенностями облака, ограничивают потенциальную выгоду от применения современных методов и инструментов аудита.

Переход к модели непрерывной автоматической проверки соответствия, которая обеспечивает полную прозрачность соответствия, является способом снижения и ограничения рисков, связанных с безопасностью облачных решений.

Список литературы

1. Современные подходы к обеспечению информационной безопасности АСУ ТП / Д.В. Чернов, А.А. Сычугов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 10
2. Information Systems Auditing: Tools and Techniques / ISACA 2017

Мильман О.О.^{1,2}, Яньков Г.Г.³, Крылов В.С.², Птахин А.В.²

¹ Калужский государственный университет им. К.Э.Циолковского, 248023, Калуга, Степана Разина, 26

² ЗАО Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон», 248010, Калуга, Комсомольская роща, 43

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Красноказарменная, 14
turbocon@kaluga.ru

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ КОНДЕНСАТОР ПАРА ИЗ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

Наличие неконденсирующихся газов (НКГ) – главная причина резкого снижения коэффициента теплопередач от парогазовой смеси (ПГС) к поверхности конденсации, около которого формируется диффузионный слой с высокой концентрацией НКГ. Реальный способ уменьшить размеры этого слоя – динамическое воздействие скоростного потока ПГС. Таким образом, возникла идея конденсатора с поддержкой постоянной скорости пара $W_{\text{п}}$ по мере его конденсации [1]. Форма парового канала при условии $W_{\text{п}} = \text{const}$ приведена на рисунке 1 а), а конструктивная реализация на рисунке 1 б).

Для разработки методики расчёта и конструирования таких аппаратов создан макет и проведены испытания горизонтального трубного пучка при

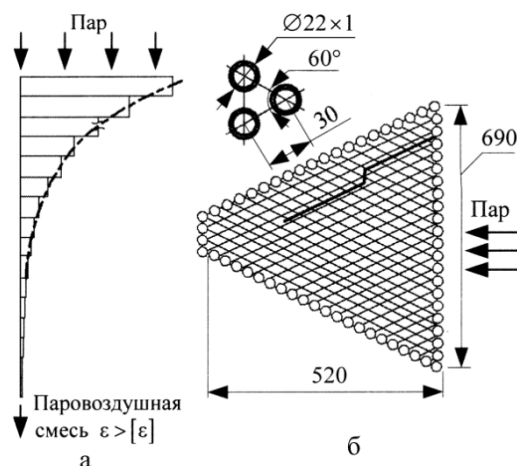


Рис. 1. Форма канала для конденсата пара из ПГС.

различных скоростях ПГС и концентрации НКГ. Результаты эксперимента обработаны в виде зависимости относительного изменения коэффициента теплоотдачи (ПГС к чистому пару) от модифицированного

числа Фруда $Fr^* = \frac{p_{\text{п}} \rho w^2}{p_{\text{к}} d}$ и концентрации неконденсирующихся газов.

$$\frac{\alpha_{\text{ПГС}}}{\alpha_{\text{Nu}}} = f(Fr^*, \nu)$$

На основании эти данных разработана методика позонного расчёта конденсатора пара из ПГС и создан промышленный стенд на Калужском турбинном заводе (рис. 2) для модуля высокоэффективного конденсатора, получен коэффициент теплоотдачи $K=2,8 \div 3$ кВт/(м²К) при концентрации НКГ на входе до 12% по объёму.

Разработана конструкция промышленного конденсатора пара с поверхностью теплообмена, сформированной их секций с высокоэффективными модулями.

Расчётная тепловая нагрузка такого конденсатора при конденсации чистого пара на 35% выше его аналога КП-540 [2] с веерной разбивкой трубного пучка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-19-01604).

Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР, № 2119628F28В. Модуль конденсатора пара. Мильман О.О., 1995 г.
2. Федоров В.А., Мильман О.О. Конденсаторы паротурбинных установок. МГТУ, М.:2013 г.

Миронова Д.Ю., Большакова Н.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АМИНОСОДЕРЖАЩИХ РЕАГЕНТОВ НА ПОКАЗАНИЯ АНАЛИЗАТОРОВ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ

В настоящее время на ТЭС получили распространение водно-химические режимы с дозированием в конденсатно-питательный тракт комплексных реагентов, включающих в состав пленкообразующие и нейтрализующие амины [1]. Дозирование в конденсатно-питательный тракт котла полиаминов обеспечивает защитное действие поверхности



Рис. 2. Модуль высокоэффективной конденсации ПГС на стенде завода.

металла. Создается слой поверхностных соединений, которые защищают металл от воздействия на него агрессивных газов [2]. Основные компоненты, входящие в состав аминоксодержащих реагентов: моноэтаноламин, морфолин, циклогексиламин, олеилпропандиамин.

Таким образом, следует определить, оказывает ли влияние содержание различных аминоксодержащих реагентов в пробе воды и пара конденсатно-питательного тракта энергоблока ТЭС на показания анализаторов химического контроля.

Экспериментальное определение влияния аминоксодержащих реагентов на датчики кондуктометра и рН-метра было рассмотрено по значениям электропроводности и рН. Опыт проводился на установке, состоящей из двух кондуктометров и двух рН-метров - один из которых являлся исследуемым, а другой эталонным. Электроды эталонного анализатора регулярно очищались от используемого реагента, а электроды исследуемого анализатора оставались в растворе аминоксодержащего реагента на протяжении всего эксперимента.

Для проведения эксперимента были выбраны реагенты: моноэтаноламин, диметилэтанолламин, циклогексиламин. Результаты исследования влияния реагента моноэтаноламина на показания анализаторов представлены на рис. 1.



Рис.1 Изменение рН и УЭП за период измерения (дозирование Моноэтаноламина): 1- исследуемый рН-метр; 2-эталонный рН-метр ;3-исследуемый кондуктометр;4-эталонный кондуктометр

По графику видно, что дозирование аминоксодержащего реагента (моноэтаноламина) влияет на показания приборов. В связи с этим, можно сделать вывод, что при проведении измерений показателей качества воды

на тепловых электрических станциях с дозированием аминоксодержащих реагентов для поддержания полиаминного водно-химического режима следует очищать поверхности датчиков используемых анализаторов химического контроля от реагента.

Список литературы:

1.Петрова Т.И., Дяченко Ф.В., Орлов К.А. Отечественные и международные документы по использованию реагентов , содержащих пленкообразующие амины ,для организации водно-химического режима на ТЭС//Теплоэнергетика 2018 №4 с.60-64

2.Богачев А.Ф. Хеламинный водно-химический режим-котлов-утилизаторов парогазовых установок// Электрические станции. – 2006. - №7. – с. 33-36

Михайлова П.Г.¹, Егоров А.Ф.¹, Савицкая Т.В.¹

¹ ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»,
Москва, 125047, Миусская пл., 9
mikhaylova_pavla@muctr.ru

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ РЕГЕНЕРАЦИИ УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ В SCADA-СИСТЕМЕ TRACE MODE 6

Обеспечение безопасного функционирования производства, достижение высоких эксплуатационных характеристик оборудования, минимизация производственных потерь возможны только при условии существенного повышения качества управления промышленными объектами, в том числе путем применения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Для эффективной разработки программного обеспечения верхнего уровня АСУ ТП используются SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition) – системы сбора данных и оперативного диспетчерского управления.

В данной работе приведены результаты разработки проекта АСУ ТП регенерации уксусной кислоты (УК) производства терефталевой кислоты (ТФК). Для этого на основе регламента производства ТФК были разработаны: мнемосхемы стадии регенерации уксусной кислоты; математические модели технологического процесса; системы автоматического регулирования; графический интерфейс АСУ ТП (рис. 1). Все вышеперечисленное реализовано в SCADA-системе TRACE MODE 6.

Основным технологическим оборудованием процесса является колонна регенерации УК. Произведен ее анализ как объекта управления, в результате которого определены регулируемые технологические параметры: температура на n-ой тарелке, °С; температура в кубе, °С; содержание воды в кубе, % масс.; расход шлема, т/ч; перепад давления, мм. рт. ст.;

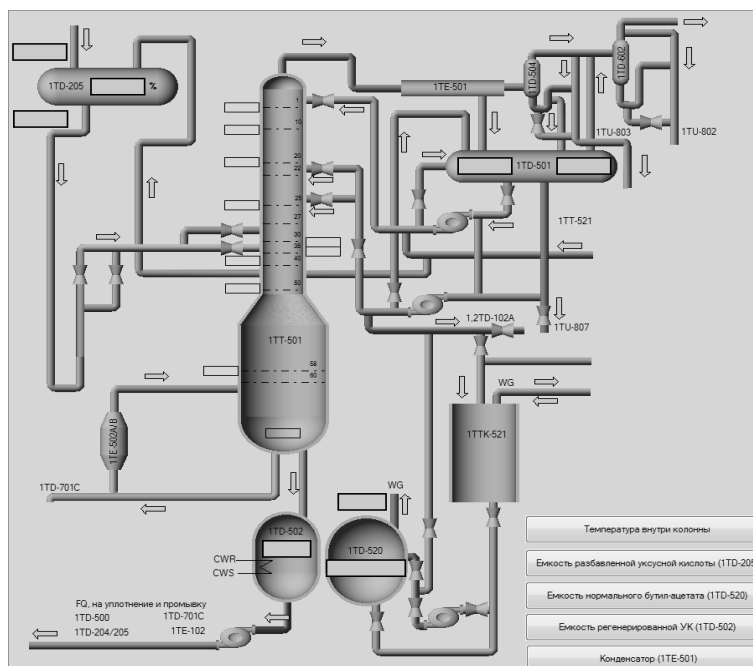


Рис. 1. Интерфейс проекта АСУ ТП регенерации уксусной кислоты.

мм. рт. ст.; уровень в кубе, мм. рт. ст.; количество воды в шлеме, т/ч. В качестве управляющих воздействий принимаются: расход флегмы, т/ч; расход нормального бутилацетата (НБА) на 1 т, т/ч; расход НБА на 22 (27) тарелке, т/ч; расход питания, т/ч; концентрация воды в питании (доли); расход пара, т/ч; расход кубовых жидкостей, т/ч.

В системах автоматического регулирования в качестве моделей, по которым определяются значения управляемых переменных при отклонении входного воздействия от его стационарного значения, используются передаточные функций инерционного или интегрирующего звена с запаздыванием. Расчет управляющих воздействий в САУ осуществляется ПИД-регуляторами. Разработанные математические модели САУ используются для реализации в TRACE MODE 6 управляющих программ на языке Techno FBD (Function Block Diagram – функциональных блок-диаграмм). Всего разработано 15 программ для регулирования различных технологических параметров, произведена настройка 37 ПИД-регуляторов.

С главного экрана интерфейса АСУ ТП (рис. 1) реализован переход на экраны, на которых отображаются графики переходных процессов и поля ввода/вывода значений технологических параметров для колонны регенерации, емкостей НБА, разбавленной и регенерированной УК. С использованием разработанного проекта АСУ ТП проведено имитационное моделирование процесса регенерации УК и определены оптимальные параметры настройки регуляторов по показателям качества переходных процессов. Значения статистических и динамических ошибок регулирования составили порядка 1%.

Морыганова Ю.А., Орлов К.А., Мотузко Т.Е.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ВЛИЯНИЕ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙТРАЛИЗУЮЩИХ АМИНОВ НА ОБМЕННУЮ ЕМКОСТЬ КАТИОНИТА КУ-2-8

В настоящее время для котлов низкого и среднего давления стали широко применяться ВХР с использованием комплексных реагентов, в состав которых входят только амины, способные поддерживать необходимое значение рН, и используемые в других отраслях как ингибиторы коррозии. Это циклогексиламин, моноэтаноамин, морфолин и диметиламиноэтанол. Эти соединения принято относить к нейтрализующим аминам. Во многих опубликованных научных статьях, в основном представлены результаты по оценке влияния комплексных реагентов на ионообменную смолу, в состав которых входят не только нейтрализующие амины, но и поверхностно-активные вещества, например диаминопропиленолеил. Для нейтрализующих композиций исследования проводились в основном на индивидуальных соединениях, а не на смесях. Поэтому представляет интерес исследования композиций на основе только нейтрализующих аминов, обладающих различной структурой на динамическую обменную емкости сильнокислотного катионита КУ-2-8.

В ходе эксперимента были получены выходные кривые, анализ которых позволил сделать выводы о влиянии строения органической молекулы амина на снижение обменной емкости катионита. Так же доказано, что концентрация нейтрализующих аминов в фильтруемом растворе влияет на изменение динамической обменной емкости катионита.

Проскок по нейтрализующим аминам наступает раньше для всех смесей относительно проскока по кальцию, причем процесс насыщения ионита происходит по-разному для каждой из исследуемой смесей. На основании полученных результатов выдвинуто предположение о том, что различный характер насыщения сильнокислотного катионита связан с тем, что вначале смола насыщается один компонентом, а затем другим, поскольку каждая композиция состояла из двух или трех нейтрализующих аминов.

Список литературы

1. ГОСТ 20255.2-89 Иониты. Методы определения динамической обменной емкости.
2. Методы определения показателей качества. Воды производственные тепловых электростанций. Методы определения щелочности. Методы определения жесткости. Методы определения

фосфатов. Методы определения окисляемости воды: /Утв. Главтехупр. Минэнерго СССР 15.12.88; Разраб. ВТИ; Срок действ, установлен с 01.10.89-М.: Рот. ВТИ, 1989.-58 с.

3. Фотометрическое определение третичных жирных аминов и аминок спиртов. Методические указания по определению вредных веществ в воздухе, выпуск XIX // М-во здравоохранения СССР. – М.: МЗ СССР, 1984.

*Муравьев А.В., Надеев А.А., Дахин С.В., Дубанин В.Ю., Наумов А.М.,
Воробьева Ю.А.*

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026, Воронеж, Московский проспект, 14
nix2001@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ В КАНАЛАХ С КОЛЬЦЕВЫМИ ДИАФРАГМАМИ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Введение. В настоящее время очень остро стоит проблема борьбы с отложениями в теплоэнергетическом оборудовании. В качестве теплоносителя используют воду, в которой содержатся соли временной жесткости, что способствует их выпадению в виде отложений на поверхностях теплообмена при повышении температуры свыше 40 °С. Источником формируемых отложений являются взвешенные частицы, на которые в потоке жидкости действуют различные силы, гравитация, диффузионный электрофорез, турбулентная нестабильность. Одной из основных задач по борьбе с отложениями является выбор оптимального метода по предотвращению образования отложений.

Исследование процессов формирования отложений. В данной работе мы исследовали два экспериментальных теплообменных кожухотрубных аппарата. В каждом теплообменном аппарате находилось по семь экспериментальных трубок, выступающих в роли поверхностей теплообмена. Трубки имели различные геометрические характеристики, такие как, глубина, ширина и шаг кольцевых турбулизаторов. Эксперимент проводился в течении 2000 часов, что позволило рассчитать и выявить изменения тепломассопередачи и ее интенсивности, измерить гидравлическое сопротивление в зависимости от режима течения теплоносителя и геометрии турбулизаторов. В связи с тем, что режим течения теплоносителя влияет на солеобразование, то в эксперименте один аппарат эксплуатировался в ламинарном, а другой в турбулентном режиме работы. Греющей средой (межтрубное пространство) являлся насыщенный пар с давлением $P = 6$ атм. и температурой $t = 158$ °С, а нагреваемой средой являлась вода (трубное пространство) с температурой

на входе $t = 20$ °С. Характеристика воды: жесткость общая - 2,5 мл/экв/дм³. жесткость Са - 2,4 мл/экв/дм³.

Математическое моделирование солеобразования. В ходе проведения эксперимента было выявлено, что интенсивность образования отложений в значительной степени зависит от качества воды. Достоверно, что основное влияние на процесс зарождения отложений влияет показатель рН воды и ее солесодержание. Экспериментальные данные доказали, что чем выше кислотность водных растворов, т.е. показатель рН, тем меньше растворимость газа. При этом необходимо соблюдение условия: при расчете зарождения отложений и их роста все частицы имеют размеры от 0,01 до 50 мкм. Алгоритм решения модели можно осуществить только численным методом, так как отсутствует линейность процесса. Для этого необходимо провести дискретизацию построенных уравнений с учетом временной переменной. При выборе интервала дискретизации шага для модели необходимо учесть ограничение, приведенное ранее: в интервале шага кристалл и его размер должны меняться не более шага диаметра самого кристалла. Помимо этого, при реализации модели, должны учитываться все зависимые величины, интервал шага должен быть минимальным (в обратном случае фиктивно можно получить отрицательную концентрацию или количество частиц). Эти превращения, тем не менее, можно найти лишь напрямую в момент расчёта. Таким образом, формулировка математической модели будет включать в себя начальные и граничные условия. В данной модели в стационарной пространственно-распределенной реагирующей системы условия применимы в рамках Эйлеровых координатах, что позволит при расчете учитывать распределения температуры. По результатам математический преобразований получена система уравнений, которая учитывает все процессы, происходящие при формировании отложений, такие как рост, слияние, осаждения и унос отложений в реагирующей среде.

Список литературы

1. Муравьев А.В. Влияние геометрических турбулизаторов на образование отложений в ТОА (теплообменных аппаратов) / Муравьев А.В., Дроздов И.Г., Мозговой Н.В. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Т. 3. №. 6. С. 33-38.
2. Муравьев А.В. Математическое моделирование образования отложений на теплообменной поверхности трубки в условиях турбулизации / Муравьев А.В., Батаронов И.Л. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т.11 №4. С. 111-114.

*Nigmatzyanov I. I.*¹, *Nigmatzyanov R. I.*¹, *Latypov D. R.*¹, *Sabanin V. R.*²,
*Nesterenko V.A.*², *Repin A. I.*³

¹ SOTEX Group of companies, LLC,
 Russia, 603002 Nizhny Novgorod, Internatsionalnaya, 95

² National Research University "MPEI",
 Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

³ Energoavtomatika LLC,
 Russia, 109316 Moscow, proezd Ostapovsky, 3, building, 2

INTELLIGENT MULTI-CHANNEL CONTROL CASCADE SYSTEM OF BUILDINGS THERMAL MODES USING AUTOMATIC REX 3F HYDRAULIC ELEVATORS

Currently, a significant problem of the Russian Federation is the rational energy resources use problem in heat supply systems. This problem manifests itself both in traditional district heating systems for large cities and in decentralized Autonomous heating systems for new settlements. Rational energy resources use has not only economic, but also social and environmental expediency. According to literature data in the Russian Federation, more than half of the heat produced for heating in the municipal sector is lost. It should be said right away that heat loss begins immediately when it is produced in practically uncontrolled hot water boilers. However, most of the losses are caused by consumers in the utility sector. There are many reasons, but the main reason is from uncontrolled heat use.

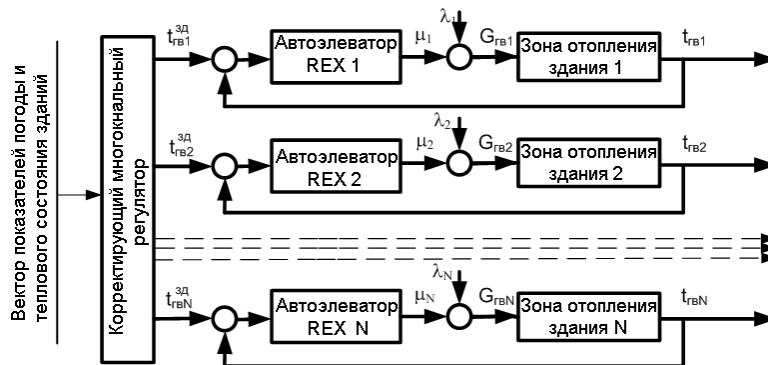


Рис. 1

In this paper, in order to reduce heat costs for heating and ensure comfortable conditions in all rooms that meet sanitary standards [1], an intelligent multi-channel control cascade system of one or more buildings' thermal

modes using automatic REX hydraulic elevators is proposed [2]. Figure 1 shows a block diagram of the proposed cascade two-circuit control system, and figure 2 shows the architecture of their technical implementation in heat networks with individual heating plant (IHP) (Fig. 2A) or central heat supply stations (CHSS) (Fig. 2B). Figure 2: TC – heat network, REX - automatic heat regulating hydraulic elevator REX. For IHP and CHSS information communication with buildings, it is proposed to use wireless technology for transmitting information with RM radio modems.

The proposed system intelligence consists in developing an optimal vector for correcting tasks for REX hydraulic elevators regulators that implement

distributed qualitative and quantitative automatic heat supply regulation to one or more buildings. To implement the optimal task distribution algorithm, REX hydraulic elevator controllers are proposed to use a dynamic recurrent artificial neural network (ANN) with the inputs number equal to the indicators number used in management and the outputs number equal to the number of REX heat regulating hydraulic elevators [3].

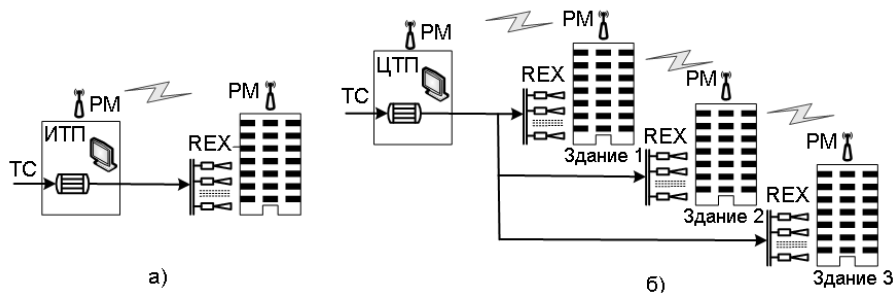


Рис. 2

ANN is configured to perform the multi-channel corrective regulator functions, which periodically corrects tasks for the REX hydraulic elevators regulators. Corrective values are calculated in ANN based on the current weather indicators analysis, as well as temperatures at control points of heated buildings, hot and return water, and other IHP or CHSS performance indicators. Current weather indicators (temperature, wind, direction and speed, rain, snow, and sunny/cloudy conditions) are read from the local hydrometeorological station data or on the Internet from the hydrometeorological center's hourly weather forecast site, Moscow for example [4]. ANN calculation algorithms are implemented in the multichannel controllers operating systems installed in IHP or CHSS.

List of references

1. GOST R 56501-2015 Maintenance services for indoor heating systems, heating and apartment buildings hot water supply. General requirements Moscow STANDARTINFORM 2016
2. Website: <http://www.irbicom.ru/>,
3. Sabanin V. R., Dementyev D. A., Kazmiruk I. Yu., Repin A. I. Matrix method for calculating dynamic recurrent artificial neural networks // Young scientist Magazine. 2018. No. 13. Pp. 1-9.
4. Website: <https://ru-meteo.ru/moscow/hour/>

Никитина Г.И.^{1,2}, *Козлов А.Н.*¹, *Пензик М.В.*¹, *Свищев Д.А.*¹

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Иркутск, Лермонтова, 130

² УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Екатеринбург, Мира, 19
uge87@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДВС НА НИЗКОКАЛОРИЙНОМ ГЕНЕРАТОРНОМ ГАЗЕ

Одна из задач развития энергетики – это энергообеспечение удаленного от централизованной энергосистемы потребителя, с повышением эффективности выработки энергии и снижением ее себестоимости. Как правило в районе с децентрализованными источниками имеются запасы местного топлива, либо отходов, например, биомассы. Газопоршневые электростанции, использующие в качестве топлива генераторный газ, вырабатываемый из биомассы в газогенераторах, могут стать эффективной заменой дорогих в эксплуатации дизельных генераторов, часто используемых в составе автономных мини-ТЭС, особенно при децентрализованном энергоснабжении [1].

Однако существует проблема снижения эффективности работы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на нерасчетных топливах. Так же возникают сложности с запуском двигателя на низкокалорийном генераторном газе, в таком случае используются запальные дозы дизельного топлива или высококалорийного газа. Не смотря на гибкость ДВС в работе с переменной нагрузкой возможные колебания в составе генераторного газа, его загрязнение пылевыми частицами и повышенная влажность газа могут негативно сказываться на надежности и безотказности работы двигателя.

По этим причинам и выполняется теоретическое и практическое исследование режимов и особенностей работы ДВС на генераторном газе. В рамках теплового расчета ДВС оценивались условия работы для уровня 10-100 кВт по электрической мощности (таблица).

Расчет сделан на сухой газ (без учета H_2O в нем), перед подачей в двигатель внутреннего сгорания производится очистка и сушка генераторного газа, и его температура значительно снижается до 40 °С. Полученная от охлаждения энергия может быть передана через теплообменник в газогенератор для сушки топлива или подогрева подаваемого воздуха. Теплота сгорания генераторного газа, полученного на выходе из газогенератора составляет 1480 ккал/м³. Состав газа в объемных %: 11,4 – CO_2 , 45,8 – CO , 3 – H_2 , 39,8 – N_2 .

Таблица. Параметры расчета ДВС на генераторном газе

Мощность, кВт	11	38	115
Число цилиндров	4	6	6
Удельный эффективный расход топлива, м ³ /кВт _э	2,24	2,42	2,67
Эффективный КПД ДВС, %	25,7	26,0	26,3

С использованием генератора «Спец» HG-7500 (ДВС с одним цилиндром, 6 кВт) были проведены пробные пуски на модельном газе (смесь бытового (пропан-бутан) газа с азотом). Планируется провести серию экспериментов при изменении доли газов, при этом теплота сгорания смеси будет варьироваться от 800 до 10000 ккал/кг. Температура и состав выхлопных газов будут измеряться для установления эмиссионных характеристик и оценки количества отведенной теплоты выхлопных газов на обогрев реактора конверсии.

Список литературы

1. Arun P. Optimum Design of Biomass Gasifier Integrated Hybrid Energy Systems // International Journal of Renewable Energy Research. 2015. Vol. 5. № 3.

This work is financially supported by an internationally collaborative project (BRICS2019-040) under BRICS STI Framework Program with government funding organizations of Brazil CNPq (402849/2019-1), Russia RFBR (19-58-80016), India DST (CRG/2018/004610, DST / TDT / TDP-011 / 2017), China MOST (2018YFE0183600), and South Africa NRF (BRIC190321424123). Studies performed using equipment of the multi-access scientific center "High Temperature Circuit".

Няшина Г.С., Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С.

Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
Томск, 634050, Ленина, 30
vershininaks@gmail.com

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТОПЛИВ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ОТХОДОВ

Отходы и низкосортные топлива обладают большим энергетическим потенциалом, который достаточно сложно использовать в полной мере вследствие разноплановых проблем сбора, сортировки, поставки, подготовки, сжигания, выбросов и др. [1, 2]. Несмотря на это, эффективное управление отходами является одним из ключевых

элементов устойчивого развития многих городов и целых регионов мира. В данной работе были экспериментально изучены показатели воспламенения и горения капель суспензий, приготовленных на основе отходов разных отраслей промышленности. Экспериментальный подход [3] основан на сжигании одиночных капель (частиц) в лабораторной муфельной печи с последующим определением параметров зажигания и горения, а также измерением концентрации антропогенных выбросов в продуктах сгорания навески топлива.

В работе были приготовлены смеси на основе сухого фильтр-кека (отхода обогащения) длиннопламенного угля, отработанного турбинного масла и воды. В зависимости от условий нагрева и состава смеси зарегистрированы разные закономерности: равномерный прогрев капли, ее частичная фрагментация (без зажигания или с зажиганием), а также микро-взрывное выгорание (т.е. газофазное и гетерогенное горение топлива с отделением фрагментов). При микро-взрыве времена газофазного и гетерогенного зажигания значительно снижаются (в 2–5 раз) по сравнению с режимом равномерного гетерогенного горения. Замена угля на отход флотации в составе суспензии приводила к увеличению времени задержки газофазного зажигания на 30–60%, увеличению времени задержки гетерогенного зажигания на 10–30% при температурах нагрева 700–900 °С. Длительность гетерогенного горения при этом возрастала на 10–47%. Температура зажигания увеличивалась примерно на 100 °С. Установлено, что диспергирование капель суспензионных топлив в процессе сжигания обеспечивает снижение концентраций оксидов серы и азота от 10 до 40% в сравнении с условиями, при которых микро-взрывное измельчение не реализуется (при нагреве топлива в виде слоя). Для интенсивного диспергирования капли топлива необходимо содержание в составе капли топлива жидкого горючего (например, масло) и негорючего (вода) компонентов. Чем больше отличие температур кипения и теплоты парообразования этих двух компонентов, тем быстрее происходит перегрев межкомпонентной границы до температуры кипения. Локальное вскипание воды приводило к зарождению пузырьков в составе капель, росту их размеров и разрушению вследствие превышения некоторых предельных внутренних давлений. Чем ниже концентрация воды в составе капель суспензий, тем быстрее выполнялись такие условия, так как теплоемкость топлива становилась меньше и большая часть подведенной энергии расходовалась на фазовые превращения. При фрагментации капли количество формирующихся мелких фрагментов топлива возрастало. Они имели высокую температуру и скорость движения.

Установленные в экспериментах характеристики являются основой для определения эффективных методов интенсификации зажигания и выгорания низкосортных смесевых топлив, и, как следствие, увеличения

эффективности технологического процесса. Кроме этого, результаты работы представляют интерес для разработки конкретных модификаций на этапах подготовки компонентов топлива, выбора условий для хранения и приготовления смесей, выбора оборудования и методов для подачи топлива в камеры сгорания, эффективной очистки дымовых газов и т.д.

Список литературы

1. **Bhui B.**, Vairakannu P. Prospects and issues of integration of co-combustion of solid fuels (coal and biomass) in chemical looping technology // J Environ Manage. 2019. V. 231. P. 1241–1256.
2. **Dhar H.**, Kumar S., Kumar R. A review on organic waste to energy systems in India // Bioresour Technol. 2017. V. 245. P. 1229–1237.
3. **Nyashina G.S.**, Vershinina K.Y., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Effective incineration of fuel-waste slurries from several related industries // Environ Res. 2019. V. 176 Article number 108559.

Няшина Г.С., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
Томск, 634050, Ленина, 30
gsn1@tpu.ru

КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ

Ежегодный спрос на электроэнергию растет в основном за счет увеличения численности населения, а также из-за постоянной электрификации жилых, промышленных, бытовых и отопительных секторов. Вследствие масштабной общественной потребности в сокращении выбросов вредных газов и защите окружающей среды топлива с примесью растительных компонентов (биомассы) становятся все более актуальными [1]. Одним из перспективных направлений считается использование топливных композиций на основе воды, отходов углеперерабатывающих предприятий и растительных компонентов [2]. Следует отметить, что оценить эффективность сжигания топлива, в частности суспензионного, по измеренным экологическим или энергетическим показателям не всегда возможно. Зачастую требуется учитывать и другие характеристики процесса, например, экономические или социальные аспекты, а также совокупную оценку ряда факторов. В таких случаях используют, как правило, методики принятия многокритериальных решений (MCDM) [3]. В данной работе вычисление относительных

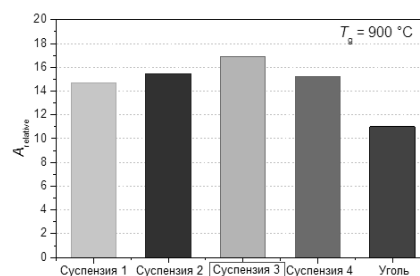


Рис. 1. Значения показателя, иллюстрирующего итоговую эффективность топлив.

показателей эффективности сжигания топлив выполнено в соответствии с методикой WSM (метод взвешенной суммы [3]) по формуле:

$$A_{relative} = \sum \gamma_j \cdot X_{relativej} \quad (1)$$

где γ_i – весовой коэффициент, $X_{relative}$ – рассчитанный относительный показатель, учитывающий экологические, экономические и энергетические характеристики использования суспензионных топлив [3].

Рассмотрены характеристики и условия сжигания следующих перспективных суспензий (указаны массовые доли): (1) суспензия: 93% фильтр-кек марки «К» (влажный), 7% рапсовое масло; (2) суспензия: 85% фильтр-кек марки «К» (влажный), 15% рапсовое масло; (3) суспензия: 90% фильтр-кек марки «Т» (влажный), 10% рапсовое масло; (4) суспензия: 80% фильтр-кек марки «Т» (влажный), 20% рапсовое масло. Под влажным фильтр-кеком предполагается, что фильтр-кек представляет смесь угольных частиц и воды. Таким образом, после вычисления всех относительных показателей по формуле (1) рассчитывалось значение параметра, иллюстрирующего итоговую эффективность каждого исследованного топлива (при условии равенства 1 всех весовых коэффициентов). Результаты вычислений представлены на Рис. 1.

При обобщении критериев установлено, что все суспензии характеризуются более высокой эффективностью в сравнении с углем. Это обусловлено их экологическими преимуществами, так как у суспензий экологические параметры в 1.8–8.9 раз выше, чем у угля. Помимо этого технико-экономические показатели процессов приготовления, хранения и сжигания оказались лучше для суспензий в сравнении с традиционным топливом, так как в случае использования в качестве основы для топлива отходов углеобогащения исключается необходимость в приобретении и использовании оборудования для размола и транспортировки топлива по конвейеру. Установлено, что экологические показатели суспензий лучше, что позволяет исключить затраты на экологические мероприятия или уплату штрафов. Среди всех топлив максимальной эффективностью обладает суспензия 3. Она имеет относительно высокую теплоту сгорания, что позволяет снизить расход топлива и времена зажигания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-53-80019.

Список литературы

1. Boumanchar I., Chhiti Y., M'hamdi Alaoui F.E., Elkhouchi M., Sahibed-dine A., Bentiss F., et al. Investigation of (co)-combustion kinetics of biomass, coal and municipal solid wastes // Waste Manag. 2019. V. 97 P. 10–8.
2. Kurgankina MA, Nyashina GS, Strizhak PA. Advantages of switching coal-burning power plants to coal-water slurries containing petrochemicals // Appl Therm Eng. 2019. P. 998–1008.

3.Kumar A., Sah B., Singh A.R., Deng Y., He X., Kumar P., et al. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development // Renew Sustain Energy Rev. 2017. V. 69 P. 596–609.

Овсянник А.В., Ключинский В.П.

Гомельский государственный технический университет
им. П. О. Сухого,
Республика Беларусь, г. Гомель, 246746, пр-т Октября, 48
kaf_te@gstu.by

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОКИПЯЩЕГО РАБОЧЕГО ТЕЛА В ТУРБОДЕТАНДЕРНОЙ УСТАНОВКЕ

В последнее время интенсивное развитие получило направление энергетики, связанное с утилизацией остаточного тепла (тепловых отходов) и использования альтернативных источников энергии. Для утилизации тепловых вторичных энергетических ресурсов, которые в больших количествах присутствуют на промышленных предприятиях, все чаще находят свое применение турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах.

Одним из способов повышения эффективности турбодетандерных циклов является повышение начальных параметров низкокипящего рабочего тела.

Рассмотрено влияние начальных параметров низкокипящего рабочего тела на термодинамическую эффективность для двух характерных турбодетандерных циклов: с теплообменным аппаратом на выходе из турбодетандера (рис. 1. а), предназначенным для подогрева конденсата низкокипящего рабочего тела, образованного в конденсаторе турбодетандерной установки и без теплообменного аппарата (рис. 1. б). Отдельно для каждого из исследуемых циклов получены зависимости эксергетического КПД от температуры низкокипящего рабочего тела перед турбодетандером при неизменном давлении и зависимости эксергетического КПД от давления низкокипящего рабочего тела перед турбодетандером при неизменной температуре. Построены зависимости потерь эксергии по элементам исследуемых циклов от параметров низкокипящего рабочего тела и произведен их анализ. В качестве низкокипящего рабочего тела в данной работе рассматривался озонобезопасный фреон R236EA, имеющий «сухую» характеристику линии насыщения, нулевой потенциал разрушения озонового слоя и потенциал глобального потепления равный 1370 за период 100 лет.

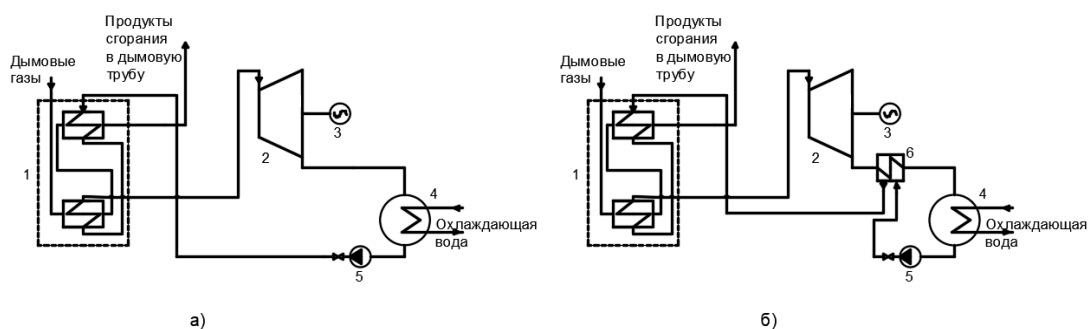


Рис. 1 Исследуемые схемы турбодетандерного цикла: 1 – котел утилизатор; 2 – турбодетандер; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – насос; 6 – теплообменный аппарат.

Для исследуемых схем построены зависимости эксергетического КПД от давления при различных температурах низкокипящего рабочего тела перед турбодетандером. Анализ полученных результатов показал, что при любой температуре низкокипящего рабочего тела можно определить давление, при котором эксергетический КПД исследуемой схемы будет максимальным. Таким образом, для исследуемого рабочего тела были получены графические зависимости, характеризующиеся, с термодинамической точки зрения, оптимальными параметрами низкокипящего рабочего тела. Сравнение данных зависимостей выявило, что при прочих равных условиях на всем промежутке исследуемых температур (от 100 °С до 300 °С) большим эксергетическим КПД обладает цикл с теплообменным аппаратом на выходе из турбодетандера. Данные графические зависимости позволяют быстро и с достаточной степенью точности определять оптимальные параметры рабочего тела в турбодетандерном цикле, а также выявить максимальный эксергетический КПД, который может быть получен при заданных начальных параметрах рабочего тела.

Овсянник А.В., Ковальчук П.А., Аршуков А.И., Ключинский В.П.
 Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь, г. Гомель, 246746, пр-т Октября 48

ТРИГЕНЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ В ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА С ДВУКРАТНЫМ ПЕРЕГРЕВОМ

В настоящее время все больше и больше внимания уделяется поиску как можно более эффективных и безопасных рабочих тел для энергетических установок прямого и обратного циклов, одними из таких рабочих тел являются природные хладагенты и, в частности, диоксид углерода. На

основании энергетических, технических и экологических показателей использования CO_2 в энергетических установках для получения электрической и тепловой энергии, а также холода предлагается использование диоксида углерода для получения этих видов энергии в турбодетандерном цикле.

Схема тригенерационной установки на диоксиде углерода на вторичных энергоресурсах с производством жидкой и газообразной углекислоты и ее цикл представлены на рисунке 1.

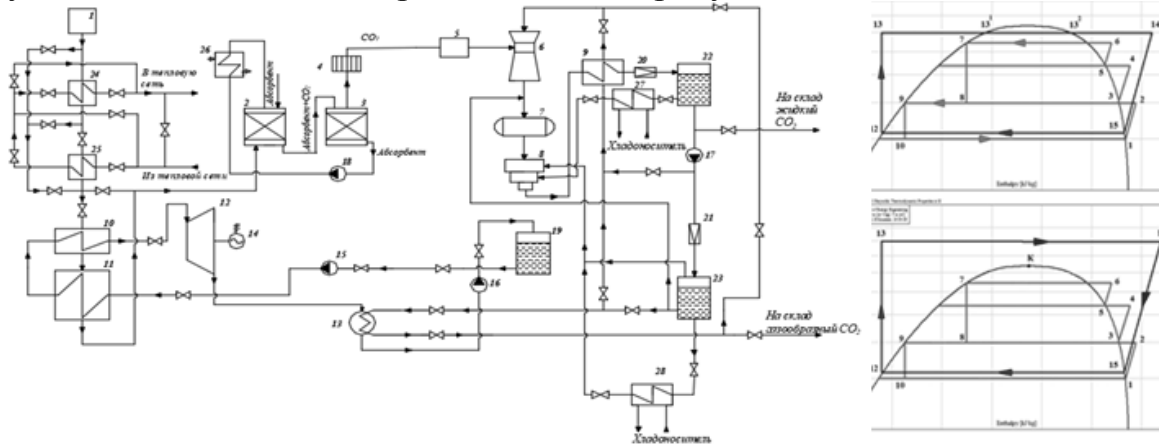


Рис. 1. Схема тригенерационной турбодетандерной установки на вторичных энергоресурсах с производством жидкой и газообразной углекислоты: 1 – источник продуктов сгорания (ВЭР); 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – конденсатор; 10 – перегреватель; 11 – испаритель; 12 – паровая турбина; 13 – конденсатор; 14 – электрогенератор; 15, 16, 17, 18 – насос; 19 – сборник; 20, 21 – регулирующий вентиль; 22 – сепаратор 1; 23 – сепаратор 2; 24, 25, 26 – теплообменник; 27, 28 – испаритель.

Схема тригенерационной установки ПГУ и котла-утилизатора на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты и ее цикл представлены на рисунке 2.

Предложенные технологические схемы тригенерационных установок с циклом на основе диоксида углерода и производством жидкой и газообразной углекислоты являются одним из решений перспективного направления комбинированного производства энергии и экономии энергоресурсов.

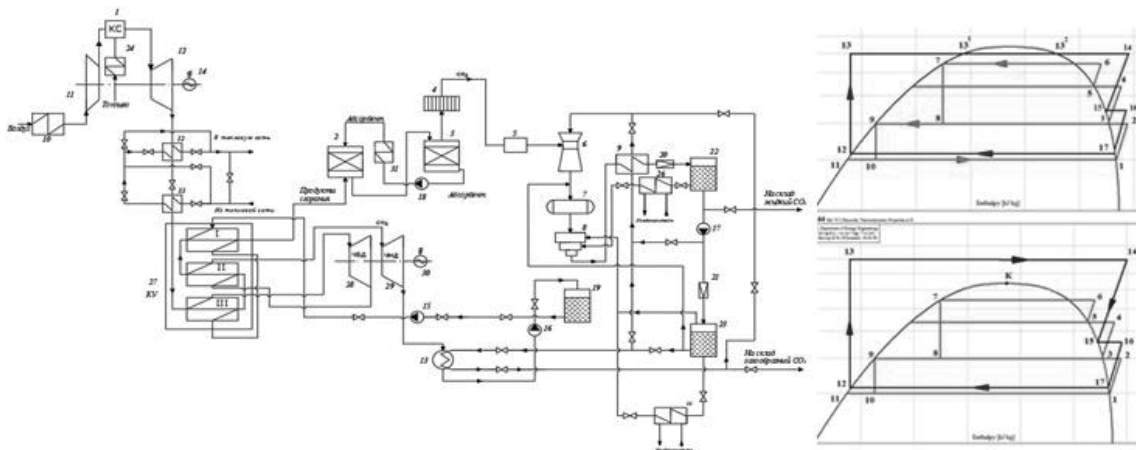


Рис. 1. Схема тригенерационной парогазовой турбодетандерной установки с котлом утилизатором: 1 – камера сгорания; 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – конденсатор; 10 – воздухоподогреватель; 11 – турбокомпрессор; 12 – газовая турбина; 13 – конденсатор-испаритель; 14, 30 – электрогенератор; 15, 16, 17, 18 – насос; 19 – сборник; 20, 21 – регулирующий вентиль; 22 – сепаратор 1; 23 – сепаратор 2; 24, 31, 32, 33 – теплообменник; 25, 26 – испаритель; 27 – котёл утилизатор; 28, 29 – ЧВД и ЧНД турбины соответственно.

Орлов М.Е., Долгов М.А., Митяхин Д.А.
 Ульяновский государственный технический университет,
 г. Ульяновск, 432027, ул. Северный Венец, 32
mi5h@mail.ru

ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ТЭЦ

Изменение структуры покрытия тепловых нагрузок на ТЭЦ в сторону увеличения использования избытков пара с давлением 0,6-1,3 МПа для покрытия отопительной нагрузки приводит к рационализации режимов работы энергетических паровых котлов, вытеснению неэкономичных и ненадежно работающих пиковых водогрейных котлов, увеличению выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Для анализа возможности использования технологического пара в целях обеспечения отопительной нагрузки разработан графо-аналитический метод [1], сущность которого заключается в совместном построении и анализе графиков отопительной и технологической тепловых нагрузок ТЭЦ (рис. 1).

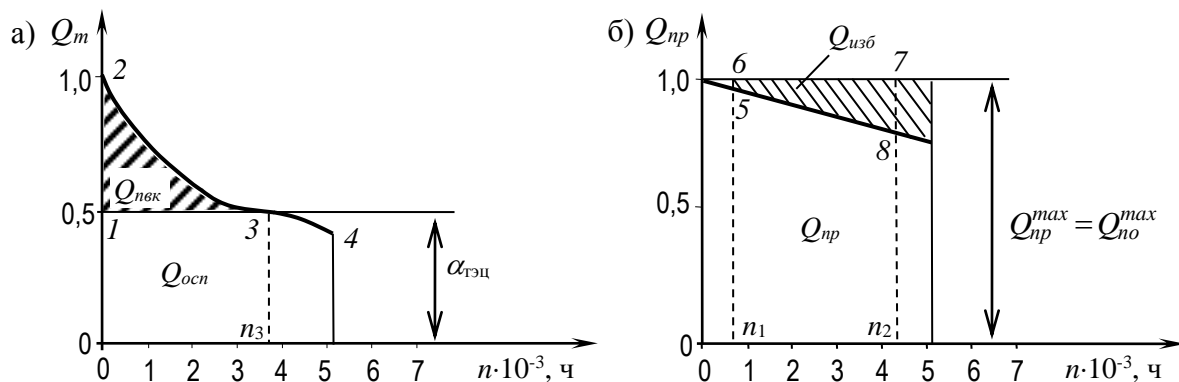


Рис. 1. Графики коммунально-бытовой (а) и технологической нагрузок (б) по продолжительности

На рис. 1 б количество избыточной теплоты $Q_{изб}$ производственных отборов, которое может полезно использоваться для обеспечения пиковой коммунально-бытовой нагрузки, выражено площадью фигуры 5-6-7-8

$$Q_{изб} = Q_{но}^{max} (n_2 - n_1) - \int_{n_1}^{n_2} Q_{пр} dn, \quad (1)$$

где $Q_{пр}$ – производственная нагрузка ТЭЦ, $Q_{но}^{max}$ – установленная мощность производственных отборов турбин, n – число часов отопительного периода, ч; n_1 , n_2 – момент начала и окончания использования избыточной нагрузки производственных отборов турбин ТЭЦ, ч.

На рис. 1 а нагрузка пиковых водогрейных котлов $Q_{пвк}$ находится по формуле

$$Q_{пвк} = \int_0^{n_3} Q_m dn - \alpha_m n_3, \quad (2)$$

где Q_m – коммунально-бытовая нагрузка ТЭЦ; α_m – коэффициент теплофикации; n_3 – продолжительность периода пиковой нагрузки, ч.

С целью уменьшения трудоемкости расчетов разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать, строить и анализировать графики тепловых нагрузок ТЭЦ [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-00016.

Список литературы

1. **Orlov M.E.** Graphic-analytical method of analysis the efficiency of using an excess steam from the industrial outlets of turbines to ensure the peak thermal capacity of CHP // Construction and Energy Efficiency in 21st Century/ Proceedings of the III Russian-German scientific conference, March 19-20, 2018, Ulyanovsk, Russia. – Ulyanovsk: UISTU, 2018. – P. 185-196.
2. Свидетельство № 2019660786 от 13.08.2019 г. об официальной регистрации программы для ЭВМ. Построение графиков часового и годового расходов теплоты на ТЭЦ / М. Е. Орлов, В. И. Шаратов, Долгов М.А., Митяхин Д.А.

Осипов С.К., Злышко О.В., Вегера А.Н., Бычков Н.М., Харламова Д.М.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
osipovsk@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА НАГРЕВА ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ УСТАНОВОК В СОСТАВЕ ТЭЦ

В настоящее время стоит проблема неэффективного использования избыточного давления природного газа в энергетическом секторе. На большинстве пунктах понижения давления природного газа газотранспортной сети России безвозвратно теряется его потенциальная энергия за счет дросселирования газа до необходимого потребителю уровня давления. В данный момент на территории страны находится более пятисот газораспределительных станций (ГРС) и намного большее количество газорегуляторных пунктов (ГРП), на которых безвозвратно дросселируется газ [1, 2]. Существующая система транспортировки природного газа от места его добычи до потребителя позволяет организовать дополнительную выработку даровой электроэнергии на станциях технологического понижения давления с помощью утилизационных турбодетандерных установок. Идея состоит в замещении процесса дросселирования газа в редукционных клапанах, процессом его расширения в проточной части турбодетандера. В данной работе приведены результаты исследований влияния структуры и параметров работы турбодетандерных установок, располагающихся на ГРП ТЭЦ, на их технико-экономические показатели (таблица).

Таблица – Результаты исследований турбодетандерных установок.

Способ подогрева	Подогрев циркулирующей водой	Подогрев сетевой водой	Подогрев уходящими газами ГТУ
Диапазоны мощностей ДГА, кВт	от 22,60 до 9 220,58	от 22,60 до 9 220,58	от 36,74 до 15 027,88
Затраты на СН, кВт	–	–	от 203,2 до 211,62
КПД, %	от 33,13 до 35,98	от 32,59 до 35,37	от 34,3 до 73,6

В качестве объекта исследования выбрана ГРП ТЭЦ-16 ПАО «Мосэнерго». Для данной станции были получены результаты исследований трех различных турбодетандерных установок, отличающихся способом подогрева природного газа. Были рассмотрены традиционный способ подогрева с помощью прямой сетевой воды, способ подогрев газа с помощью прямой циркуляционной водой, направляемой в

конденсатор паротурбинной установки, и подогрев газа в составе газотурбинной установки.

Результаты сравнительных исследований показали, что для увеличения эффективности выработки электроэнергии на базе магистрального природного газа на ГРП ТЭЦ целесообразно использовать турбодетандерные энергоблоки, работающие на высокопотенциальном природном газе в составе отдельной ГТУ, обеспечивающие утилизацию тепла продуктов сгорания, покидающих газовую турбину, и использование потенциальной энергии природного газа. Установка на ГРП ТЭЦ турбодетандерных энергоблоков в составе ГТУ позволит выработать турбодетандером от 0,036 до 15,02 МВт электроэнергии с КПД 34,3-73,63 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 19-38-70038\18.

Список литературы

1. **Рогова А.А.** Разработка и исследование схем тригенерационных установок на базе детандер-генераторного агрегата и тепловых насосов: дис. канд. техн. наук: 05.14.01. / Рогова Анна Андреевна – М., 2014. – 163 с.
2. **Белоусов А.Е.** Обоснование способа редуцирования природного газа в системе газораспределения при помощи детандеров объемного типа: дис. канд. техн. наук: 25.00.19 / Белоусов Артем Евгеньевич – М., 2019. – 127 с.

Охлопков А.В., Орлов К.А., Шуварин Д.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН СТАРЕНИЯ И СНИЖЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА ОГНЕСТОЙКИХ МАСЕЛ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН БЛОКОВ ПГУ

В статье представлены результаты комплексных исследований опыта эксплуатации огнестойких масел в системах регулирования паровых турбин блоков ПГУ, расположенных в центральной и южной частях РФ. Целью исследования было недопущение сокращения нормативных сроков службы масел, определение причин снижения ресурса огнестойких жидкостей и выдача рекомендаций по корректировке нормативных документов в указанной области.

Рассмотрены эксплуатационные вопросы обеспечения нормативных требований, предъявляемых к указанным жидкостям, проанализированы объёмы и методики химических анализов на предмет достаточности,

сделаны предложения по корректировке эксплуатационных инструкций по оборудованию и объёмов проводимых исследований, определены причины старения и сделаны выводы по возможности и способам продления ресурса указанных выше жидкостей.

На основе опыта использования импортных и отечественных масел сделаны выводы о влиянии произведённого продукта, эксплуатации на итоговое качество масла, а также важности информированности ответственных служб эксплуатирующей организации с целью контроля соответствия производственного процесса требованиям НТД.

Ухудшение качества масла происходит вследствие естественного термоокислительного старения масла, интенсивность которого зависит от условий эксплуатации и изначального качества масла. Процесс ускоряется при наличии воды и повышении температуры, а также времени воздействия высоких температур, присутствия влаги и металлических катализаторов (железо, медь). Необходимо особое внимание обращать на обеспечение нормативных требований, предъявляемых к эксплуатационным огнестойким жидкостям. Возможно выделить четыре наиболее значимых фактора, влияющих на продление эксплуатационного ресурса:

- условия хранения свежего и эксплуатационного масла, переданного на хранение;
- поддержание режима эксплуатации огнестойких жидкостей;
- необходим регулярный мониторинг качества эксплуатационного масла (определение влагосодержания и кислотного числа);
- рекомендуется использовать маслоочистительные установки, которые должны обеспечивать удаление влаги, адсорбцию и комплексную очистку эксплуатационного масла от загрязнений.

Охотин В.С., Джураева Е.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

Dzhuraeva@rambler.ru

МЕТОД РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ ПО ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ О СКОРОСТИ ЗВУКА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Методика расчета термодинамических свойств жидкости, предложенная в данной статье основана на предположении о том, что изохоры в области жидкости в p, T - диаграмме прямые линии. В этом случае для определения термодинамических свойств достаточно знать на

произвольной (базовой) изолинии (кроме изохоры) плотность и производную плотности по давлению. Для апробирования методики был выбран толуол, а в качестве базовой изолинии изобара $p_0 = 0,1$ МПа. Использовались уравнения на изобаре $p_0 = 0,1$ МПа для плотности $\rho_0(T)$ и изотермического модуля давления $k_0(T)$ ($k_0 \equiv \rho(\partial p/\partial \rho)_T$) [1, 2]. Изотермический модуль давления k_0 рассчитывался по строгим термодинамическим соотношениям с использованием данных о плотности $\rho_0(T)$, скорости звука w_0 и изобарной теплоемкости c_{p0} при атмосферном давлении $p_0 = 0,1$ МПа

$$k_0 = \rho_0 \left[\frac{1}{w_0^2} + \frac{T}{\rho_0^2 c_{p0}} \left(\frac{\partial \rho_0}{\partial T} \right)_p \right]^{-1}. \quad (1)$$

Наклон изохор на базовой линии (при $p_0 = 0,1$ МПа) в p, T - диаграмме в силу принятых предположений зависит только от плотности (или удельного объема) жидкости: $(\partial p/\partial T)_\rho = \text{const}(\rho)$. Использование данных о скорости звука, как это следует из формулы (1), позволяет достаточно точно определить производную $(\partial \rho/\partial p)_T$ и тем самым увеличить точность расчета плотности и других термодинамических свойств. По описанной методике разработана программа в математическом пакете MathCad, а в табл. 1 и на рис. 1 показаны относительные отклонения плотности жидкого толуола ($\delta r1$) от наиболее точных значений [1,2]. Если принимать плотность и другие свойства при повышенных давлениях такими же, что и при $p = 0,1$ МПа, то относительные отклонения ($\delta r2$) будут существенно больше.

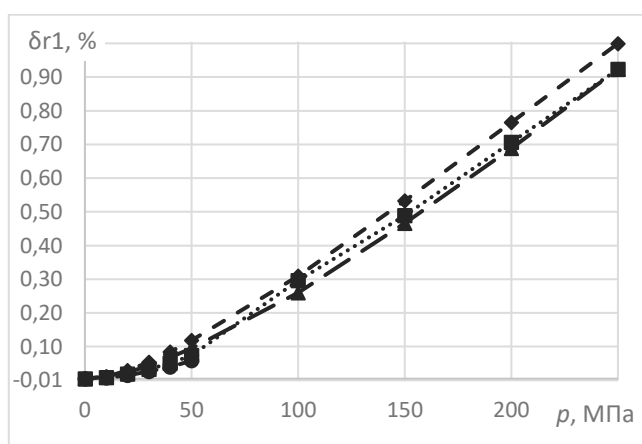


Рис. 1. Относительные отклонения расчетных данных по плотности от наиболее точных:

● – $T=200$ К; ■ – $T=250$ К; ▲ – $T=300$ К; ◆ – $T=350$ К.

Таблица 1.

p , МПа	$T=200$ К		$T=250$ К		$T=300$ К		$T=350$ К	
	δr_1 , %	δr_2 , %	δr_1 , %	δr_2 , %	δr_1 , %	δr_2 , %	δr_1 , %	δr_2 , %
0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,45	0,00	0,62	0,01	0,88	0,01	1,26
20	0,01	0,88	0,01	1,21	0,02	1,68	0,02	2,37
30	0,02	1,30	0,03	1,77	0,04	2,41	0,05	3,35
40	0,03	1,69	0,05	2,29	0,06	3,10	0,08	4,24
50	0,05	2,07	0,07	2,78	0,09	3,73	0,11	5,04
100	–	–	0,29	4,98	0,26	6,36	0,30	8,25
150	–	–	0,48	6,73	0,46	8,42	0,53	10,64
200	–	–	0,70	8,22	0,68	10,13	0,76	12,56
250	–	–	0,92	9,52	0,92	11,58	0,99	14,15

Как видно из рис.1 и табл. 1 предложенная методика расчета плотности дает отклонение в несколько десятков раз меньше, чем принятый сейчас подход, когда отсутствуют данные о свойствах при давлениях выше атмосферного.

1. Охотин В.С., Разумейченко Л.А., Касьянов Ю.И. Уравнение состояния и термодинамические свойства жидкого толуола, полученные по акустическим данным// Теплофизические свойства веществ и материалов/ ГСССД, 1992, вып. 30. С.20 – 33.

2. Охотин В.С. Экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование технически важных жидкостей с целью создания уравнений и таблиц теплофизических свойств высокой точности. Автореф. дис. д-ра техн. наук. – М., 1987. – 39 с..

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-08-01343).

Охотин В.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, 11250, Красноказарменная , 14

OkhotinVV@mpei.ru

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ, ПОДДЕРЖАНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА ОРГАНИЗАЦИЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Рассмотрены структура системы подготовки, поддержания и повышения квалификации (СПП и ПК) оперативного персонала организаций энергетики и основные результаты работ по ее развитию, выполненных при участии автора в НИУ «МЭИ» и организациях энергетики, в части:

1. Нормативно-правового обеспечения СПП и ПК – разработка Норм годности программных средств подготовки персонала энергетики, Единых аттестационных требований и Порядка аттестации лиц, осуществляющих профессиональную деятельность, связанную с оперативно-диспетчерским управлением в электроэнергетике.

2. Организационного обеспечения СПП и ПК – проектирование и создание учебно-тренировочных пунктов электростанций, разработка и реализация Системного проекта создания центров и пунктов тренажерной подготовки персонала в диспетчерских центрах ОАО «СО ЕЭС».

3. Технического, математического и программного обеспечения СПП и ПК – разработка тренажеров для подготовки персонала АЭС с реакторами ВВЭР, комплекса компьютерных средств подготовки персонала цехов тепловой автоматики и измерений электростанций.

4. Методического обеспечения СПП и ПК – подготовка методических и инструктивных документов по применению разработанных тренажеров и компьютерных средств при проведении подготовки персонала в учебно-тренировочных пунктах электростанций, а также соревнований профессионального мастерства.

Охотин В.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, 11250, Красноказарменная, 14

OkhotinVV@mpei.ru

К ВОПРОСУ О НОРМИРОВАНИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПУСКА ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Рассмотрен подход к проведению периодического (каждые 3 суток) опробования основных защит и блокировок находящихся в холодном резерве энергоблоков ТЭС, позволивший при выполнении соответствующих требований правил технической эксплуатации не включать время опробования в нормативную продолжительность пуска этого оборудования.

При этом:

- существенно сокращается объем работ (и время их проведения), выполняемых непосредственно перед пуском оборудования;
- опробование проводится в удобное для персонала время;
- не ограничивается время, затрачиваемое на проведение опробования;
- многократное проведение работ поддерживает квалификацию персонала.

Указанный подход включен в состав Технических требований к генерирующему оборудованию участников оптового рынка.

Предложено использовать этот подход при определении нормативной продолжительности пуска неблочного оборудования ТЭС.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФОВ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Для успешного выполнения и сдачи лабораторных работ студентам, обучающимся по направлениям связанным с теплоэнергетикой, электроэнергетикой и электроникой необходимо знать схемы цепей, которые будут реализованы на экспериментальных стендах находящихся в учебных лабораториях. Не все стенды могут быть оборудованы защитой от неправильной сборки цепей и в результате приходят в непригодность. Чтобы избежать таких случаев необходимо перед выполнением работы за стендом проверить у студента знание нужной схемы. Ручная проверка схем каждого обучающегося занимает много времени, также возможны пропуски некоторых ошибок при достаточно больших схемах. Знание схем необходимо также и персоналу, эксплуатирующему и ремонтирующее реальные энергетические установки. В связи с этим необходимо разработать программу-тренажер, которая будет проверять студентов и сотрудников знания схемы перед выполнением работы. Для решения проблем идентификации тепловых и электрических сетей приводится алгоритм вывода зависимостей некоторых числовых характеристик графов от их порядка. Рассмотрены графы периодической структуры: полные графы, магистральные графы и их реберные образы. Обобщение решений на произвольные порядки графов производится методом индукции с получением и решением рекуррентных уравнений для коэффициентов искомым формул. Используются операторы специальных пакетов GraphTheory и genfunc системы компьютерной математики Maple. В результате было получено общее решение для числа вершинной независимости магистрального двухпараметрического дерева: $\varepsilon_0(F_{n,m}) = (4nm - 3(-1)^m - (-1)^n - (-1)^{n+m} - 8m + 4n + 5) / 8$. Полученные в данной работе формулы относятся к графам специального вида. Расширение списка таких графов позволит решать более сложные задачи сравнения графов для выявления расхождений в исследуемых сетях и тестовых.

Список литературы

1. Whitney H. Congruent graphs and the connectivity of graphs // Am. J. Math. 1932. Т. 54. С. 160-168. DOI:10.2307/2371086.
2. Dirk L. Vertigan, Geoffrey P. Whittle A 2-Isomorphism Theorem for Hypergraphs // J. Comb. Theory, Ser. B. — 1997. — Т. 71, вып. 2. — С. 215-230. — DOI:10.1006/jctb.1997.1789.
3. Пономаренко И. Н. Проблема изоморфизма графов: алгоритмические аспекты (записки к лекциям). СПб. Математический институт им. В.А. Стеклова. 2010. 57 с.

4. Курейчик В. М., Глушань В. М., Щербаков Л. И. Комбинаторные аппаратные модели и алгоритмы в САПР. М.: Радио и связь, 1990. 216 с.
5. Земляченко В. Н., Корнеенко Н. М., Тышкевич Р. И. Проблема изоморфизма графов //Записки научных семинаров ЛОМИ. 1982. Т. 118. С. 83-158.
6. Малинин Л. И., Малинина Н. Л. Изоморфизм графов в теоремах и алгоритмах - М.: URSS. – 2009.
7. Погребной В. К. Решение задачи определения изоморфизма графов, представленных атрибутными матрицами //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2012. Т. 321. №. 5.
8. Кирсанов М.Н. Графы в Maple. Задачи, алгоритмы, программы. Moscow: FIZMATLIT, 2007. 168 p .
9. Cheng-HoHsu, Kin-TakLam. Topological code of graphs. Journal of the Franklin Institute, January 1992, Pp. 99-109.
10. Huafeng Ding, Zheng Huang. Isomorphism identification of graphs:Especially for the graphs of kinematic chains. Mechanism and Machine Theory, January 2009, Pp. 122-139.
11. Kratsch S., Schweitzer P. Graph isomorphism for graph classes characterized by two forbidden induced subgraphs //Discrete Applied Mathematics. 2017. Vol. 216. Pp. 240-253. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2014.10.026>
12. Das B., Enduri M. K., Reddy I. V. Polynomial-time algorithm for isomorphism of graphs with clique-width at most three. Theoretical Computer Science. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2017.09.013>
13. Calude C. S., Dinneen M. J., Hua R. QUBO formulations for the graph isomorphism problem and related problems. Theoretical Computer Science. 2017. Vol. 701. Pp. 54-69. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2017.04.016>

Павлов А.В. Гранченко П.П. Кузнецов К.И.

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ НА ОСНОВЕ ТЕРМИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Представляемая к докладу работа продолжает ряд исследований теплофизических свойств веществ фторуглеродного состава. Работа представляет продолжение ряда исследований термодинамических свойств декафторбутана [1, 2], в качестве нового эффективного рабочего тела энергетических установок [3], использующих органический циклах Ренкина. Многие из веществ фторорганического состава были достаточно хорошо исследованы в области низких температур с целью их возможного применения в холодильной и теплонасосной технике. Тем не менее, экспериментальных данных о свойствах декафторбутана сравнительно мало. На кафедре теоретических основ теплотехники МЭИ в течение

последних 12 лет проводятся исследования декафторбутана, а также других веществ фторорганического ряда (C3F8, C4F8) [4,5].

В настоящей работе представлены расчёты показателя адиабаты по результатам экспериментальных исследований зависимости скорости ультразвука и плотности от давления и температуры. При использовании новых экспериментальных данных были рассчитаны:

1. безразмерный комплекс $kz = \frac{a^2}{RT}$, как функция давления и температуры
2. Коэффициент сжимаемости $z = pv/RT$, как функция тех же аргументов.

Для полученных расчетов были построены уравнения, описывающие соответствующие термодинамические поверхности. В результате деления одного уравнения на другое было получено уравнение, описывающее показатель адиабаты k в зависимости от давления и температуры.

Результаты проведённых исследований, представляют интерес, как самостоятельные данные о теплофизических свойствах веществ, а также прикладное значение при расчёте адиабатического сжатия. В частности при расчёте работы насосов в термодинамических циклах.

Список литературы

1. Комаров С.Г., Станкус С.В. Экспериментальное исследование скорости звука в газообразном хладагенте R-507a // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 1. С. 145–149.
2. McSkimin H.J. Effect of Diffraction on Velocity of Sound // J. Acoust. Soc. Am., 1961. Vol. 33. P. 539.
3. Бражников Н.И. Ультразвуковые методы. М. – Л.: Энергия, 1965.
4. Кузнецов К.И., Сухих А.А., Скородумов С.В. Экспериментальное измерение скорости ультразвука в октафторциклобутане (C3F8). Учебно-методическое пособие – М.: Издательство МЭИ, 2016.
5. Кузнецов К.И., Сухих А.А., Скородумов С.В., Гранченко П.П. Экспериментальное измерение скорости ультразвука в октафторциклобутане (C4F8). VII Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы», Оренбургский государственный университет, Оренбург.: 2014.

Парчевский В.М.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

МИНИМИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ПОСТРОЕНИИ ДВУМЕРНОЙ СЕПАРАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЭС С ВВЭР

Важнейшей характеристикой, используемой для управления горизонтальными парогенераторами (ПГ), на АЭС российского дизайна, является сепарационная характеристика (СХ) $\omega(h)$, показывающая зависимость массовой влажности насыщенного пара ω на выходе из парогенератора от уровня h воды в нем. Влажность пара зависит также от нагрузки ПГ, но на начальных этапах освоения атомной энергетики АЭС работали в щадящем (базовом) режиме на номинальной нагрузке. Но в связи с возрастанием доли АЭС в выработке электроэнергии возникла необходимость привлечения их к регулированию частоты и мощности в энергосистеме, т.е. работать в маневренном режиме. В новых условиях необходима более сложная, двумерная (ДСХ) вида $\omega(h, d)$, где d – относительная нагрузка ($0 \leq d \leq 1$).

Получить СХ с достаточной для практики точностью чисто расчетным путем в настоящее время невозможно. На практике ее получают в процессе пуско-наладочных испытаний путем длительных и трудоемких экспериментов. Получение ДСХ таким же способом практически неприемлемо из-за кратного увеличения времени и трудоемкости экспериментальных работ. Сокращение времени строительства и пуска в эксплуатацию АЭС является важнейшим конкурентным преимуществом, поэтому следует стремиться к сокращению времени пусконаладочных работ, и одним из способов решения проблемы является разработка и использование математических моделей вместо эксперимента там, где это возможно и оправдано.

В [1] предложен метод расчетно-экспериментального получения ДСХ ПГ, в котором для учета особенностей (конкретики) данного ПГ используются два результата эксперимента, полученные на одной (номинальной) нагрузке, один из которых – коэффициент неравномерности скорости выхода пара с зеркала испарения K_n , определяемый как отношение максимальной скорости W^{\max} вблизи горячего коллектора к средней по поверхности испарения $W^{\text{ср}}$. Используется позонный метод расчета влажности с разбиением

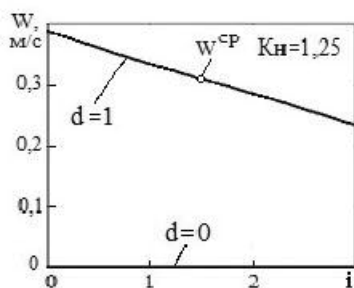


Рис. 1. Зависимости $W(i)$ при $d = 0; 1$ и $K_n = 1,25$

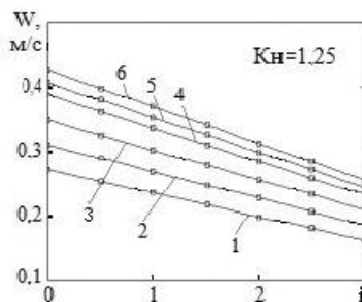


Рис. 2. Зависимости $W(i, d)$ при $0,7 \leq d \leq 1,1$ и $K_n = 1,25$

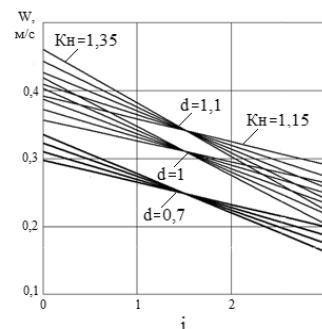


Рис. 3. Зависимости $W(i, d, K_n)$ при различных значениях d и K_n

поверхности испарения на ряд зон с порядковым номером i , возрастающим по мере движения воды первого контура от горячего коллектора к холодному (в данном примере $0 \leq i \leq 3$). На рисунках 1,2,3 представлены результаты последовательного учета зависимости скорости выхода пара от номера зоны i , нагрузки ПГ d и коэффициента неравномерности K_n при допущении о линейном характере влияния этих параметров.

Список литературы

1. Парчевский В.М., Гурьянова В.В. Расчет и моделирование двухмерной сепарационной характеристики парогенератора АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2017, № 1, с. 25-30.

Парчевский В.М.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫБРОСАМИ ОКСИДОВ АЗОТА В КОТЛАХ С ТОПКАМИ С ЖИДКИМ ШЛАКОУДАЛЕНИЕМ

Обеспечение нормативной концентрации оксидов азота в пылеугольных котлах, оснащенных топками с жидким шлакоудалением, является сложной задачей. Приходится использовать несколько известных способов подавления выбросов, например, последовательное применение ступенчатого сжигания (СС) топлива и селективное некаталитическое восстановление (СНКВ) [1]. Оптимальное управление подобным двухстадийным процессом должно обеспечить не превышение допустимой концентрации оксидов азота на выходе из котла при его работе на любой нагрузке с минимумом эксплуатационных (текущих) затрат на экологию, т.е. на СС и СНКВ.

Наиболее важный этап разработки математического обеспечения системы оптимального управления технологическим процессом заключается в разработке целевой функции (ЦФ), аргументами которой являются оптимизируемые режимные параметры процесса. В процессе работы в режиме реального времени система управления определяет и поддерживает значения аргументов ЦФ, при которых она принимает экстремальные значения (минимум, максимум) с учетом ограничений на аргументы. С точки зрения математики эта задача называется общей задачей нелинейного программирования. Как правило, ЦФ представляет собой экономическую категорию, которую нужно максимизировать (КПД, прибыль, выгода) или минимизировать (ущерб, потери, убыток). Для данного случая ЦФ удобно представить в следующем виде:

$$Z(D, C1) = Z1(D, C1) + Z2(D, \Delta C2), \quad (1)$$

где Z – суммарные эксплуатационные затраты на снижение выбросов, руб/ч; D – нагрузка котла, т/ч; $C1$ – концентрация оксидов азота за зоной СС, г/м³; $Z1, Z2$ – соответственно затраты на СС и СНКВ, руб/ч; $\Delta C2$ – снижение концентрации оксидов азота в зоне СНКВ, г/м³. Функции $Z1$ и $Z2$ являются эколого-экономическими характеристиками СС и СНКВ, показывающими, какой ценой достигается снижение выбросов при любой нагрузке D . При разработке математического обеспечения часть необходимой информации должна быть получена экспериментально. Сюда относится получение зависимостей $C0(D), C1^{max}(D), C1^{min}(D), C2(D)$ (см. рис.1), где $C0$ – концентрация оксидов азота без использования СС и СНКВ; $C1^{max}$ – то же при нормативном значении $C2$

и максимальном использовании СНКВ; $C1^{min}$ – то же при максимальном использовании СС; $C2$ – нормативное значение концентрации при данной нагрузке. Целевая функция $Z(D, C1)$ при работе системы является функцией одного аргумента $C1$, так как нагрузка D снимается с датчика расхода пара, а $\Delta C2 = C1 - C2$.

Работа системы сводится к определению оптимального значения $C1$ при каждой нагрузке, которое находится в зоне «перекрывтия» (заштрихованная область на рис. 1), в которой концентрация

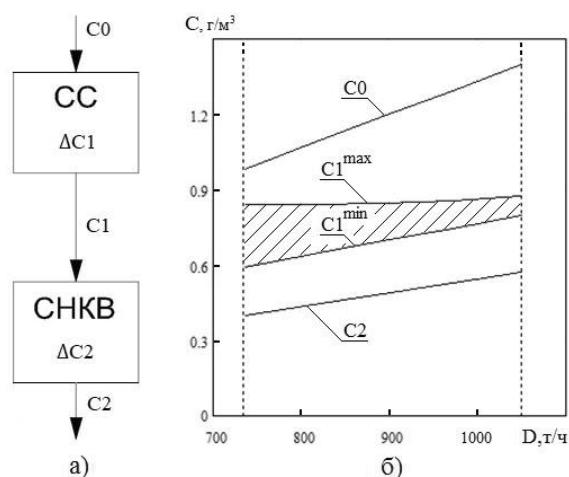


Рис. 1. а) – схема двухстадийного снижения концентрации оксидов азота; б) – зависимости концентрации оксидов азота от нагрузки в различных зонах тракта дымовых газов

может поддерживаться как средствами СС, так и СНКВ. Какое из них будет использоваться, зависит от «крутизны» ЭЭХ: выбор делается в пользу более пологой характеристики, которая обеспечивает меньшие удельные затраты. Найденное оптимальное значение $C1^{opt}(D)$ пересчитывается в оптимальные задания регуляторам ступенчатости сжигания (β^{opt}) и подачи карбамида (K^{opt}).

Список литературы

1. Зыков А.М., Аничков С.Н., Брагина О.Н. и др. Опыт внедрения установки СНКВ на энергоблоке 330 МВт Каширской ГРЭС // Электрические станции. 2012, № 6. С. 27-30..

Петрова Т.И.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

PetrovaTI@mpei.ru

ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВОДНО-ХИМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ТЭС С БАРАБАННЫМИ КОТЛАМИ И КОТЛАМИ-УТИЛИЗАТОРАМИ НА ТЭС С ПГУ

Одной из причин значительных экономических потерь в энергетике являются коррозионные повреждения оборудования на тепловых электростанциях, особенно при переходе к сверхвысоким параметрам. Наличие примесей в теплоносителе (вода, пар) в значительной степени влияют на образование защитного слоя на поверхности различных конструкционных материалов. Рассмотрены причины развития коррозионных процессов и образования отложений в барабанных котлах высокого и сверхвысокого давлений при традиционных водно-химических режимах, в частности, при обработке котловой воды фосфатами, и условия оптимизации этого водно-химического режима. Отмечено, что при эксплуатации котлов-утилизаторов на ТЭС с ПГУ одной из основных причин повреждения оборудования является эрозия-коррозия в контурах низкого давления. Описаны основные причины возникновения этого процесса и способы снижения интенсивности его протекания. Рассмотрено влияние различных ВХР на образование защитной плёнки на поверхности конструкционных материалов, контактирующих с водой и паром. Одним из способов защиты оборудования от коррозии, в частности, эрозии-коррозии, является использование реагентов, способных создавать на поверхности металлов защитную плёнку. К таким реагентам относятся плёнкообразующие амины, которые образуют барьер между поверхностью металла и теплоносителем. Одним из таких реагентов является октадециламин, который в течение длительного времени используется на тепловых и

атомных электростанциях для защиты оборудования от коррозии, удаления отложений и снижения скорости образования отложений. В течение последних 20-30 лет широкое распространение для коррекции водно-химического режима барабанных котлов и котлов-утилизаторов нашли комплексные реагенты, в состав которых входит плёнкообразующий амин. Описан принцип действия этих реагентов.

Петрунин В.В., Маров И.В., Кодочигов Н.Г., Кузнецов Л.Е.,
Акционерное Общество «Опытное Конструкторское Бюро
Машиностроения имени И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»)
Нижний Новгород, 603074, Бурнаковский проезд, 15

«ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И КРУПНОМАСШТАБНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ВОДОРОДА НА АТОМНЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕАКТОРАМИ»

В настоящее время в мире обострились ресурсные и экологические проблемы и вызовы в области энергообеспечения. Ключевое противоречие – постоянно растущее энергопотребление и необходимость сокращения выбросов CO₂.

В поиске разрешения этого противоречия особая роль отводится водороду как универсальному энергоносителю и накопителю энергии для транспорта, энергетики, промышленности, распределенной генерации и коммунального потребления, а также как сырьевому материалу для промышленности.

Растущее потребление энергии и декарбонизация стимулирует становление нового технологического уклада - водородной энергетики.

Под водородной энергетикой понимается направление развития энергетики на основе широкомасштабного использования водорода как энергоносителя, накопителя энергии и компонента промышленного производства.

Прогнозируется, что развитие водородной энергетики принесет выгоды мировой энергетической системе, окружающей среде и глобальной экономике. Водородная экономика обеспечит замещение около одной пятой энергии, потребляемой в 2050 году. Это позволит сократить выбросы CO₂ и обеспечит примерно 20%-ый вклад в реализацию согласованного в Париже в 2015 году сценария снижения глобального потепления.

Водород может быть использован как чистое топливо для транспорта и автономных энергоисточников на основе топливных элементов.

Рост мирового спроса на водород ожидается в связи с увеличением потребления его как химического реагента в нефтепереработке и

нефтехимии, химической, металлургической и других отраслях промышленности.

В странах с развитой экономикой более 80% водорода получают из природного газа и нефтепродуктов. Крупнотоннажное производство водорода осуществляется в основном путем паровой конверсии природного газа – метана (далее – ПКМ).

Для экономии природного газа и исключения выбросов продуктов сжигания в окружающую среду предлагается технология ПКМ с подводом тепла от ВТГР.

Предлагаемый способ производства обеспечивает экологическую чистоту производства и экономию природного газа в сравнении с традиционным процессом ПКМ.

В 2018 году водородная энергетика, признана приоритетным направлением научно-технического развития Госкорпорации «Росатом». Это направление включено в проект Комплексной программы «Атомная наука, техника и технологии» и имеет своей целью разработку и демонстрацию ключевых технологических решений в области атомно-водородной энергетике для создания крупномасштабного экологически чистого производства водорода с использованием тепла ВТГР, инфраструктуры потребления водорода и интеграции водородной энергетике с экономикой.

Реализация направления «Водородная энергетика» расширит сферы использования атомной энергетике для неэлектрического применения.

Плотников Л.В., Жилкин Б.П., Осипов Л.Е.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина,

Екатеринбург, 620002, Мира, 19

leonplot@mail.ru

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВЫПУСКНОЙ СИСТЕМЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ РАЗМЕРНОСТИ 8,2/7,1

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) являются самыми распространенными источниками энергии в мире. Известно, что газодинамическое совершенство конструкции выпускных систем ДВС во многом определяет качество процессов газообмена, а также их технико-экономические показатели [1]. По рассматриваемой тематике существует большое количество научных исследований. В частности, в работах [2-4] осуществлялась доводка конструкций впускной и выпускной систем ДВС с целью улучшения их эксплуатационных характеристик. Цель данного исследования заключается в проведении сравнительного анализа спектров скорости и давления потоков в выпускных системах поршневых

двигателей с турбокомпрессором (ТК) и без него, а также предложить способ повышения качества газообмена в ДВС.

Исследования проводились на экспериментальной установке – одноцилиндровая модель поршневого двигателя с диаметром цилиндра 82 мм и ходом поршня 71 мм. Она дополнительно оснащалась системой наддува на основе турбокомпрессора размерности ТКР-6. Коленчатый вал двигателя приводился во вращение с помощью асинхронного двигателя ($n = 600-3000 \text{ мин}^{-1}$), ротор ТК вращался за счет подачи сжатого воздуха на лопатки турбины. В ходе опытов определялись мгновенные значения локальных скорости w_x и давления p_x потоков воздуха в выпускной системе с ТК и без него. Скорость потока измерялась посредством термоанемометра постоянной температуры, статическое давление – быстродействующим датчиком давления. Более подробно экспериментальная установка и методика проведения опытов описаны в [5].

Проводился спектральный анализ зависимостей $w_x = f(\tau)$ и $p_x = f(\tau)$ в выпускных системах при разных начальных условиях. На основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

- установлено, что наличие турбокомпрессора в выпускной системе приводит к существенному изменению структуры потоков газа, например, существенно снижаются низкочастотные (до 2 раз) и высокочастотные (до 3 раз) амплитуды пульсаций скорости w_x потока при сохранении кратности значимых частот;

- выявлено, что установка ТК также вызывает подавление низкочастотных амплитуд пульсаций давления потока (до 2,5 раз) в выпускной системе по сравнению с ДВС без него (кратность частот также сохраняется);

- предложен способ стабилизации потока газа в выпускной системе ДВС с турбонаддувом на основе эффекта эжекции, который приводит к снижению низкочастотных и высокочастотных амплитуд пульсаций w_x и p_x вплоть до 33 %.

Полученные данные могут быть полезны в области двигателестроения при проектировании выпускных систем для перспективных ДВС с ТК.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-79-10003.

Список литературы

1. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988. 546 p.
2. Salehi R., Stefanopoulou A., Vernham B. Diesel air path control using pressure difference: Pumping loss and aging considerations // Proceedings institution mechanical engineers part D-journal of automobile engineering. 2019. Vol. 233. No 10. P. 2421-2431.

3. **Wang T.J.** Optimum design for intake and exhaust system of a heavy-duty diesel engine by using DFSS methodology // J. mechanical science and technology. 2018. Vol. 32. No 7. P. 3465-3472.
4. **Jang J., Woo Y., Jung Y., Cho C., Kim G., Pyo Y., Han M., Lee S.** Research for intake and exhaust system parameterization of 2-cylinder gasoline engine for RE-EV // Int. j. energy research. 2018. Vol. 42. No 9. P. 3007-3016.
5. **Plotnikov L.V., Zhilkin B.P.** Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 160. 114123.

Погосов Л.А., Буров В.Д.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
pogosovla@mpei.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ГТУ-ТЭЦ

Отопительные ГТУ-ТЭЦ позволяют при низких капитальных затратах обеспечить население электроэнергией и теплом. Однако, при проектировании и реализации подобных проектов возникают технические трудности, которые препятствуют масштабному внедрению и нормальной эксплуатации таких установок.

Одной из основных проблем является регулирование отпуска тепла на газотурбинных ТЭЦ. Основная проблема заключается в том, что при снижении температуры наружного воздуха температура уходящих газов (УГ) за ГТУ снижается, а теплота УГ изменяется незначительно. При этом температура прямой сетевой воды, подаваемой потребителю, возрастает более чем в два раза, одновременно требуемая тепловая нагрузка увеличивается примерно в 5-6 раз. Так же необходимо выдерживать требования к поддержанию температуры воды на входе в котёл-утилизатор (КУ) не ниже 55 °С, для предотвращения низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева.

Для решения этих проблем применяются различные решения. Авторами разработаны новые варианты тепловых схем отопительных ГТУ-ТЭЦ. В качестве основного оборудования выбраны три газотурбинные установки SGT-400 производства Siemens, три пиковых водогрейных котла (ПВК) марки КВГМ-20-150 и спроектированы водогрейные котлы-утилизаторы. Точкой конструкторского расчёта КУ был принят режим максимальной тепловой нагрузки.

Первый вариант схемы был разработан с применением контура с газо-водяным теплообменником (ГВТО) для поддержания минимально допустимой температуры воды на входе в КУ, представленный на рис.1. При температуре обратной сетевой воды ниже 55 °С насосом рециркуляции (НРЦ) вода на выходе из газового сетевого подогревателя (ГСП) направляется в ГВТО для дополнительного подогрева, после чего смешивается с обратной сетевой водой. При температуре обратной сетевой воды выше 55 °С вода после ГВТО смешивается с водой на выходе из ГСП, таким образом ГВТО работает в режиме дополнительной поверхности нагрева.

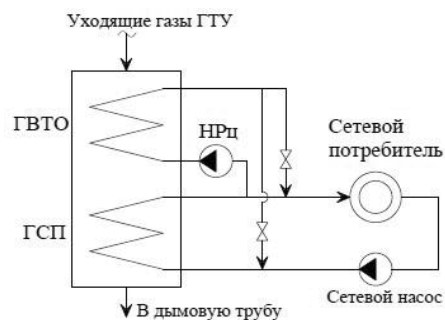


Рис. 1. Утилизационный контур с ГВТО.

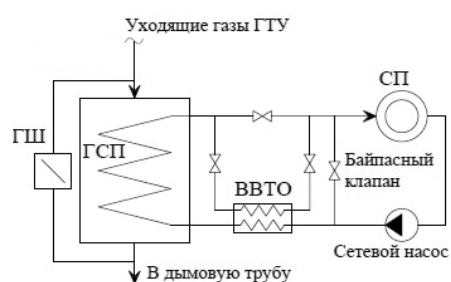


Рис. 2. Утилизационный контур с ВВТО

Утилизационный контур второй схемы представлен на рис. 2. Сетевая вода подогревается горячими УГ в газовом сетевом подогревателе (ГСП). Снижение тепловой нагрузки обеспечивается снижением мощности ГТУ преимущественно входным направляющим аппаратом и байпасированием газов мимо КУ через газовый шибер (ГШ). Для увеличения отпуска тепла предусмотрено дожигание топлива в камере дожигания (КД). Пиковые нагрузки покрываются за счёт ПВК. Для обеспечения требований к минимальной температуре воды на входе в КУ (не менее 55 °С) обратная сетевая вода подогревается в водо-водяном теплообменнике (ВВТО).

Из результатов расчёта тепловых схем в диапазоне температур наружного воздуха от -25 °С до +15 °С было подтверждено, что обе схемы позволяют решить проблему обеспечения отпуска тепла от отопительных ГТУ-ТЭЦ во всём диапазоне нагрузок при этом выдерживая требования к минимально допустимой температуре воды на входе в КУ со стабильным гидравлическим режимом работы поверхностей нагрева котлов-утилизаторов.

Полей А.К. ¹

¹ Дальневосточная энергетическая компания ГенерацияСети «ДВЭУК-ГенерацияСети», Дальневосточный федеральный университет «ДВФУ», г. Владивосток, 690003, Станюковича 1.
anton.poley@gmail.com

ВОПРОСЫ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ И НАДЕЖНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МИНИ-ТЭЦ О. РУССКИЙ

К началу 2020г. на Дальнем Востоке России эксплуатируются 3 мини-ТЭЦ (г. Владивосток) построенные на о. Русском к саммиту АТЭС 2012г. [1]. Они имеют простую тепловую схему без пара и высоких давлений, осуществляют теплоснабжение по закрытой схеме при количественном регулировании отпуска тепловой энергии с параметрами 98/70 ОС, работают параллельно с энергосистемой Дальнего Востока. Основным топливом для станции является природный газ Сахалинского месторождения (8672 ккал/нм³), в качестве резервного топлива предусмотрено дизтопливо. Для производства электрической энергии и тепла на мини-ТЭЦ используются ГТУ обеспечивающие в сочетании с утилизационным теплообменником высокий коэффициент использования топлива (КИТ) до 85%. ГТУ Kawasaki GPB 70D 2009г. выпуска с заявленным электрическим КПД 30% в номинальном режиме, $\eta_{oi}^{TU} = 0,86$, $\eta_{oi}^K = 0,85$, $\eta_{КС} = 0,98$, $\eta_{мех} = 0,98$, $\eta_{ген} = 0,97$, степень повышения давления в компрессоре 1:16. Для покрытия пиковых тепловых нагрузок на станциях установлены водогрейные жаротрубные котлы Термотехник ТТ100 с финскими горелками Oilon. Выбор основного оборудования в качестве ГТУ позволил сделать простую и компактную компоновку электростанции и обеспечить минимум вспомогательного оборудования.

Накопленный за 8 лет опыт эксплуатации данных объектов показал имеющиеся достоинства и недостатки принятых схемных решений для мини-ТЭЦ с ГТУ, которые влияют на энергоэффективность и надежность работы. Анализ эффективности работы мини-ТЭЦ показывает возможность работы с низкими УРУТ на тепловую 141,42 кг/Гкал и электрическую 233,45 г/кВт*ч. энергию в сравнении со средними показателями объектов энергосистемы Дальнего Востока 172,0 кг/Гкал, 416,3 г/кВт*ч.

Статистика аварийности показывает большее количество аварий в начальный период эксплуатации, когда при эксплуатации стали выявляться первые

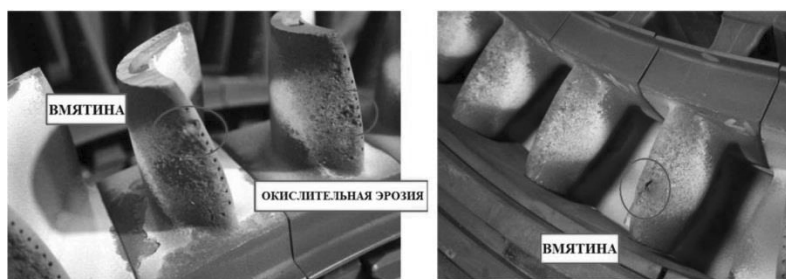


Рис. 1. Повреждение лопаток 1й ступени ГТУ 6,6 МВт

конструктивные недоработки проекта мини-ТЭЦ, особенности эксплуатации ГТУ, ошибки персонала. Большая доля отклонений от заданных режимов вызвана работой дожимных компрессорных станций природного газа ввиду их низкого качества изготовления и низким фактическим ресурсом отдельных узлов. По результатам аварий дорабатывались заводские инструкции по эксплуатации ГТУ, а так же вносить изменения в проектные схемы мини-ТЭЦ с целью обеспечения необходимой надежности работы оборудования.

К особенностям технического анализа и состояния рабочих элементов используемых на мини-ТЭЦ ГТУ можно отнести некоторые итоги ремонтов (инспекций). Основными элементами подверженным быстрому износу относительно обозначенной заводом изготовителем времени наработки являются камеры сгорания [2], повреждение которых зачастую обусловлены отслоением жаропрочной эмали и появлению прогаров в местах с меньшим значением подмеса воздуха вдоль стенок жаровой камеры. Имеются и критические повреждения не проявляющие себя при нормальной эксплуатации по показаниям приборов, определение которых возможно только при проведении бороскопных инспекций.

Раннее повреждение сопловых аппаратов и рабочих лопаток вызывающих необходимость замены до указанных часов наработки так же возможно ввиду неправильного режима горения не определяемого по показаниям приборов. Так наиболее подверженным риску элементом является первая ступень турбины.

Список литературы

1. Полей А.К., Штым К.А. «Установки когенерации на о. Русский» // Энергетик 2015 №1 с.11-13.
2. Bibikov D., Polei A., Shtym K., Tsoy K., Experience of operation of the gas turbine units in Russky Island // MATEC Web of conferences 115, 2017.

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АЭС С ВВЭР

Актуальность проблемы. Создание цифрового двойника энергоблока, полностью повторяющего характеристики реального оборудования, на котором можно менять режим, прогнозировать изменения состояния, с целью сделать действующую АЭС более безопасной на всех стадиях ее жизненного цикла.

Фундаментальные основы решения Создание модели объединяет три фундаментальных научных результата: формула Томсона-Кельвина для разряда конденсаторов 1853 г.; свойства акустического резонатора, сформулированные Гельмгольцем в 1869 году; доказательство автором статьи в 1984 г. правомерности использования метода электроакустических аналогий для исследования пульсирующих течений однофазной и двухфазной среды при наличии отрицательного дифференциального сопротивления.

Результаты: Путем применения междисциплинарного подхода созданы акустические модели реактора и первого контура. Установлено, что ядерный реактор является автоколебательной системой, с отрицательной диссипацией, способной генерировать акустические стоячие волны с параметрами, не зависящими от начальных условий и определяемыми только свойствами самой системы. Цифровые модели разработаны для всех элементов контура теплоносителя, число и комбинации которых определены конструкцией, пример показан на рис.1, а акустические свойства аналогичны радиотехническому генератору автоколебаний, представленному на рис.2.

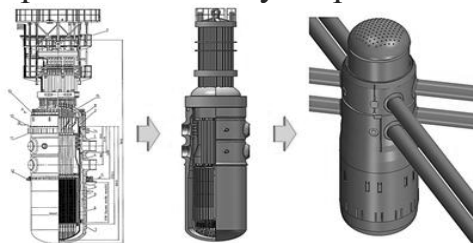


Рис.1. Реактор ВВЭР.

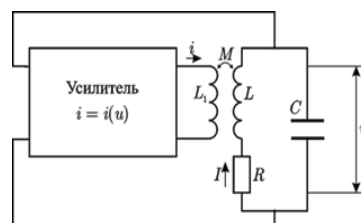


Рис.2 Радиотехнический генератор автоколебаний.

Исходными данными для определения акустических параметров теплоносителя являются результаты полученные при использовании современных трехмерных комплексов, предназначенных для совместного

решения физико-теплогидравлических задач для переходных и аварийных процессов в ядерных реакторах.

Новизна: Установлено неизвестное ранее свойство реактора с присоединенными к нему входящими и выходящими трубопроводами, генерировать одновременно несколько акустических стоячих волн.

Значимость: Влияние конструкции реактора и трассировки трубопроводов на вибрации оборудования и внутрикорпусных устройств, срок службы, эффективность эксплуатации, безопасность, сейсмостойкость.

Прогноз практического применения цифровой акустической модели АЭС с ВВЭР: для совершенствования нормативной документации, регламентов эксплуатации оборудования, для оптимизации конструкторских и компоновочных решений, позволяющих минимизировать циклические нагрузки в тепловыделяющих сборках и оборудовании в процессе эксплуатации, в маневренных режимах, при тяжелых авариях, при ударных и сейсмических воздействиях; при проектировании энергетических установок с реакторами большой, средней и малой мощности, увеличение эффективности эксплуатации, срока службы, безопасности и сейсмостойкости.

Проскуряков К.Н. Аникеев А.В., Афшар Е.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250,
Красноказарменная, 14
proskuriakovkn@mpei.ru,

ВЕРИФИКАЦИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ АВТОКОЛЕБАНИЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ АЭС С ВВЭР

Актуальность проблемы. Увеличение эффективности эксплуатации и сроков службы основного оборудования, а также работа энергоблоков в маневренных режимах входят в число приоритетных требований, предъявляемых к новому поколению атомных электрических станций (АЭС). Первый контур ВВЭР представляет собой разветвленную гидравлическую систему трубопроводов, содержащую элементы со сложной геометрией. Имеется ряд элементов, в которых возникают автоколебания потока теплоносителя, вызванные образованием вихрей и турбулентностью, которые приводят к вибрациям оборудования и уменьшению его срока службы. Подобно любому конструктивному элементу, обладающему массой и упругостью, теплоноситель в первом контуре АЭС имеет собственные частоты колебаний, которые при совпадении с частотами гидродинамических возмущений и вибраций оборудования приводят к виброакустическим резонансам, при которых существенно возрастает уровень вибраций.

Задачи исследования: а) разработка методов и алгоритмов расчета частот автоколебаний теплоносителя

АЭС с ВВЭР для его акустических цифровых моделей; б) экспериментальное исследование зависимости частоты автоколебаний от величин теплофизических параметров в пусковых и номинальном режимах;

в) верификация цифровых моделей генераторов автоколебаний теплоносителя на блоке №3 Ново-

воронежской АЭС с ВВЭР -440; г) обоснование эффективности и необходимости практического использования цифровых акустических моделей генераторов автоколебаний теплоносителя для прогнозирования, диагностирования, идентификации источников автоколебаний теплоносителя и управления их частотой.

Результаты. Разработаны методы и алгоритмы расчетов частот автоколебаний теплоносителя АЭС с ВВЭР для его акустических цифровых моделей. Разработана расширенная программа создания пусковых режимов на блоке № 3 Нововоронежской АЭС. По формуле Томсона с использованием метода электро- акустических аналогий определены частоты автоколебаний давления теплоносителя в исследованных режимах. Персоналом АЭС реализована программа пусковых режимов, измерений пульсаций давления теплоносителя и построения по результатам измерений автоспектральных плотностей мощности сигналов от датчиков пульсаций давления (ДПД) теплоносителя. Для измерения пульсаций давления использована системы вибрационного мониторинга SUS, установленная на 3 блоке Нововоронежской АЭС.

Для автоматической отбраковки спектров применена разработанная персоналом Нововоронежской АЭС программа для автоматического выделения пиков в автоспектральных плотностях мощности сигналов.

Результаты измерений пульсаций давления, представленные в виде распределения по шкале частот пиков в автоспектральных плотностях мощности сигналов от ДПД, практически совпадают с результатами их расчетной оценки с помощью разработанных цифровые модели автоколебаний теплоносителя. Проведенная верификация разработанных моделей теплоносителя на действующей АЭС является убедительным

обоснованием актуальности их использования для совершенствования проектирования и эксплуатации АЭС с реакторами ВВЭР большой, средней и малой мощности. Факт совпадения полученной расчётной частоты автоколебаний с результатами измерения частоты вибраций тепловыделяющих сборок (ТВС) доказывает, что причиной возникновения колебаний ТВС являются самовозбуждающиеся акустические стоячие волны (АСВ).

Заключение. Результаты расчета частот АСВ в первом контуре ВВЭР-440 являются характеристикой его индивидуального акустического поля, которое не может быть создано в лабораторных условиях.

Доказано, что акустические свойства ядерного реактора, независимо от количества подключенных к нему циркуляционных петель теплоносителя, подобны свойствам группы одновременно функционирующих резонаторов Гельмгольца.

Показано, что цифровые акустические модели генераторов автоколебаний теплоносителя обеспечивают прогнозирование, диагностирование, идентификацию источников автоколебаний теплоносителя и управление их частотой.

Приведенные в работе методы и алгоритмы расчета частот автоколебаний являются в настоящее время единственными верифицированными средствами прогнозирования и идентификации источников автоколебаний теплоносителя.

Прохоров В.Б.¹, Фоменко М.В.¹, Фоменко Н.Е.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

FomenkoMV@bk.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ НА ПРИМЕРЕ КОТЛА К-50-14-250

Горение угольного топлива является сложным процессом, сочетающим в себе многообразие физических и химических явлений. Сжигание угля в топках современных паровых котлов должно обеспечить надежную, экономичную и экологичную работу котлоагрегата. Моделирование горения твердого топлива на этапах разработки новых и совершенствования существующих схем сжигания позволяет получить подробную картину происходящих процессов (линии тока и взаимодействия топливовоздушных струй, поля распределения температур, скоростей и проч.), а также количественную характеристику работы топочной камеры (химический, механический недожог, температура на выходе из топочной камеры, тепловосприятие экранов и проч.). Моделирование также может быть использовано для выявления причин отклонения показателей работы топочных камер котлов от проектных.

Моделирование можно разделить на физическое, выполняемое на физических моделях (стендах), и численное, выполняемое с использованием математического аппарата описания физических и химических процессов вычислительной гидродинамики (ВГД) на

вычислительных машинах. В сравнении с физическим моделированием численное позволяет наиболее полно моделировать происходящие процессы с наименьшими допущениями, а также получить более наглядные и информативные результаты.

В работе проведено численное моделирование работы топочной камеры парового котла К-50-14-250 ст. № 2 производственно-отопительной котельной г. Таштагол с помощью пакета ВГД ANSYS Fluent для трех режимов работы котла и сравнение результатов моделирования с результатами натурных испытаний и результатами физического изотермического моделирования с применением искровой визуализации аэродинамики. Котел работает на кузнецком каменном угле с твердым шлакоудалением, имеет паропроизводительность 50 т/ч. Выбор котла обусловлен наличием достаточных данных о его работе и результатов «продувок» на физической модели.

В результате численного моделирования были получены линии тока топливовоздушной смеси в объеме топочной камеры, а также поля различных физических величин (температура, скорость, концентрация, и проч.).

При сравнении результатов численного и физического моделирования выявлены схожие траектории движения струй топливно-воздушных струй. Некоторые расхождения объясняются применением при численном моделировании модели турбулентности, осредненной по Рейнольдсу.

При сравнении результатов численного моделирования с результатами натурных испытаний, проведенных на реальном котле, получено:

- разница значений температуры дымовых газов на выходе из топочной камеры и тепла, воспринятого в топочной камере, не превышает 3,5 %;
- значения удельных потерь теплоты с механическим недожогом q_4 отличаются на 6 – 16 % (отнесенные к значению механического недожога q_4 в %), что вызвано малым абсолютным значением величины потерь тепла с механическим недожогом q_4 ;
- концентрации оксидов азота NO_x в дымовых газах имеют близкие значения при различных режимах.

Результаты численного моделирования достаточно адекватны и могут быть использованы в качестве инструмента проведения исследований процессов горения твердого топлива в топочных камерах котлов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проект № 16-19-10463П от 20 мая 2019 года.

Список литературы

1. Варнатц Ю. Маас Дж., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ //М.: Физматлит. – 2003.
2. Архипов А. М., Липов Ю. М., Прохоров В. Б. Использование прямооточных горелок и сопел в топках котлов: инновационный опыт МЭИ //М.: Изд-во МЭИ. – 2013.

Прохоров В.Б., Киричков В.С., Чернов С.Л., Каверин А.А., Фоменко Н.Е.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
prokhorovvb@mail.ru

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ТОПКИ М-ОБРАЗНОГО КОТЛА

С целью повышения термодинамического КПД цикла Ренкина, в России, Китае, США, странах ЕС ведутся разработки энергоблоков нового поколения с ультрасверхкритическими параметрами (УСКП) пара. Переход на УСКП параметры пара (температура – 700-760 °С, давление – 35 МПа) приведет к необходимости использования дорогостоящих никелевых сталей. Для сокращения общей длины главных паропроводов, предложена конструкция М-образного котла в однокорпусном исполнении для сжигания кузнецкого каменного угля марки ТР с технологией твердого шлакоудаления (ТШУ).

Применительно к данному котлу разработана схема сжигания твердого топлива с использованием прямооточных горелок и сопел в системе вертикальных и горизонтальных тангенциальных факелов, которая позволит обеспечить [1]: выбросы оксидов азота в атмосферу на уровне ниже, чем нормативные; длительную работу котла при отсутствии шлакования топочных экранов и перегрева металла труб; высокую степень выгорания угольной пыли, с обеспечением нормативной величины механического недожога топлива; длительную минимальную нагрузку котла на уровне не выше 40 % от номинальной по условиям устойчивости горения угольной пыли. Для проведения исследований аэродинамики топки котла М-образного профиля на УСКП параметры пара была изготовлена физическая изотермическая модель (рис. 1 а), точно повторяющая конфигурацию топочной камеры котла, масштаб моделирования m был принят равным 1/45.

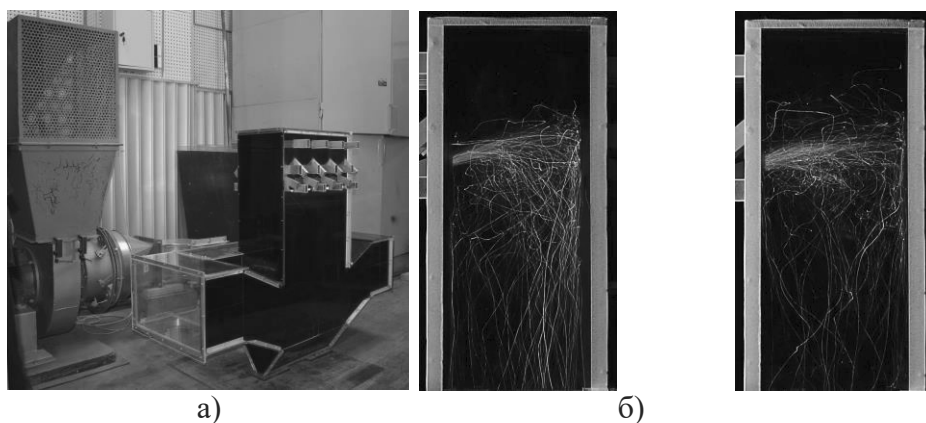


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования аэродинамики топки М-образного котла и траектории движения горелочных струй: а) — физическая модель топки; б) — траектория движения горелочной струи при базовом избытке первичного воздуха; в) — траектория движения струи при сниженном избытке первичного воздуха.

Проведены исследования – искровые продувки при базовом (рис. 1 б) и сниженном (рис. 1 в) избытке первичного воздуха, по результатам которых сделаны следующие выводы: обеспечивается высокая стабильность положения вихрей встречной направленности, как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, что обеспечит увеличение времени пребывания угольной пыли в зоне активного горения с возможностью сжигания ее при более низких температурах и снизит образование оксидов азота; реализуется ступенчатое сжигание угольной пыли с увеличением степени выгорания по длине каждого вихря при значительной внутренней рециркуляции продуктов сгорания в корнях струй; хвостовые массы горелочных струй оказывают повышенное динамическое давление на экранные трубы противоположной стены, а значит, возрастает вероятность локального шлакования и перегрева металла в этих зонах. Последнее обстоятельство послужило необходимостью изменения компоновки прямооточных горелок и сопел для котла УСКП.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10463-П от 20.05.2019).

Список литературы

1. Использование прямооточных горелок и сопел в топках котлов: инновационный опыт МЭИ / А.М. Архипов, Ю.М. Липов, В.Б. Прохоров. М.: Издательство МЭИ, 2013. 240 с.

Прохоров В.Б., Чернов С.Л., Киричков В.С., Каверин А.А, Фоменко Н.Е.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
fomenko.n.e@yandex.ru

ЧИСЛЕННОЕ ВАРИАНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВЕНТОРНОЙ ТОПКИ ДЛЯ М-ОБРАЗНОГО КОТЛА

Технология использования сверхкритических параметров (УСКП) пара (температура – 700-7600С, давление – 35 МПа) способствует повышению КПД термодинамического цикла Ренкина угольных энергоблоков свыше 50% . При проектировании энергоблоков на УСКП пара необходимо стремиться к минимизации длин главных паропроводов, которые выполняются из дорогих никелевых сплавов, стоимость которых может составлять до 20 % от капитальных затрат на блок. Одним из технических решений данной задачи является применение М-образной компоновки котла с инверторной (перевернутой) топкой, где горелки находятся сверху топки, а выход газов организуется снизу топки[1].

Выполнено вариантное численное моделирование аэродинамики шести вариантов изотермического физического стенда для различных схем сжигания. Математическая модель представляет собой систему следующих уравнений: уравнение неразрывности (сохранения массы); уравнение Навье-Стокса (сохранения количества движения); уравнения турбулентности (к-ε модель турбулентности). В схемах варьировались конструктивное исполнение горелок и сопел, отметки расположения, углы наклона, распределение избытков воздуха по каналам и выходные скорости. Моделирование проводилось с целью поиска оптимального варианта внутритопочной аэродинамики. Оценка оптимальности проводилась по следующим критериям: наличие интенсивного вихреобразования и массообмена в топке, эффективное взаимодействие горелочных струй с воздушными, отсутствие зон прямого удара горелочных струй о стены, глубокое проникновение струй в топку.

Исследовано 6 вариантов компоновки прямооточных горелок и сопел для котла УСКП. Во всех вариантах сохраняется общее количество горелок и сопел со встречно-смещённой компоновкой, двухъярусное размещение горелок с наклоном вверх. Все исследованные варианты показали свою принципиальную работоспособность на кузнецком тощем угле. Во всех исследованных вариантах наблюдается интенсивное вихреобразование в горизонтальной плоскости. В варианте №1 в силу повышенной дальноточности струй возможен риск шлакования топочных экранов и повышенного недожога в нижнем ярусе горелок (из-за слабого проникновения струй третичного воздуха в топку). В вариантах №2-5 наблюдается интенсивное вихреобразование в верхней вертикальной зоне активного горения, но имеет место недостаточно эффективное

взаимодействие струй в нижней вертикальной зоне. Вариант №6 обеспечивает наилучшее выполнение разработанных критериев эффективного и надежного сжигания твердого топлива при применении прямооточных горелок и рекомендуется к дальнейшему изучению на физической и математической моделях. Верификация компьютерной модели состояла в проведении проверки сеточной чувствительности в качественном сравнении траекторий струй, полученных по результатам численного и физического моделирования и подтвердила достоверность полученных данных. Были проведены искровые продувки модели топки котла М-образного профиля для одной из схем установки горелок и сопл. Результаты численного и физического моделирования качественно сравнивались между собой. Качественные картины развития струй имеют хорошие совпадения особенно для горелочных струй и вторичного воздуха 1-го яруса. В целом, отклонения являются допустимыми и результаты численного моделирования можно считать достоверными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проект № 16-19-10463П от 20 мая 2019 года.

Список литературы

1. V. B. Prokhorov, S. L. Chernov, and V. S. Kirichkov, Development of the Scheme of Stepwise Combustion of Coal in the Inverter Firebox of a Power Unit of 1000 MW Power. Thermal Engineering, 2017, Vol. 64, No. 9, pp. 675–679.

*Рафальская Т.А.*¹, *Рудяк В.Я.*^{1,2}

¹ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),

630008, Новосибирск, Ленинградская, 113

² Новосибирский государственный университет,

630090, Новосибирск, Пирогова, 2

rafalskaya.ta@yandex.ru

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕПЛООВОГО ПУНКТА СО СВЯЗАННОЙ ПОДАЧЕЙ ТЕПЛОТЫ

Современное функционирование систем централизованного теплоснабжения характеризуется рядом проблем, одной из которых является неполное использование тепловой мощности. Решение этой проблемы требует, в частности, разработки новых способов центрального и местного регулирования систем теплоснабжения, что невозможно без расчета переменных режимов совместной работы теплопотребляющих систем, поскольку в определённых режимах работы система отопления может недополучать значительное количество теплоты. Методики расчета переменных режимов работы тепловых пунктов разрабатывались для

схем теплообменников с несвязанной подачей теплоты, когда работа отдельного теплообменника не оказывает влияния на работу других теплообменников. Для таких схем расходы сетевой воды будут больше, чем в схемах со связанной подачей теплоты, когда тепловые потоки перераспределяются между теплообменниками в зависимости от режимов их работы. Существующие теории расчета переменных режимов теплообменных аппаратов основаны на применении постоянных безразмерных комплексов, одним из которых является параметр теплообменника, определяющий коэффициент теплопередачи через расчетные расходы теплоносителей. Этот параметр считается постоянным независимо от режима работы теплообменника. Такие теории позволяют произвести расчет режимов работы группы теплообменников в условиях недостаточности исходных данных, однако, имеют ограниченное применение, поскольку не учитывают влияние температур теплоносителей на коэффициент теплопередачи в теплообменнике. Они не применимы и при большом изменении расходов теплоносителей, что типично для тепловых пунктов со связанной подачей теплоты.

Ранее в работе [1] определена область применимости существующих теорий расчета, основанных на использовании постоянных параметров теплообменников, и разработана новая методика расчета, позволяющая рассчитывать переменные режимы работы систем теплоснабжения со связанной подачей теплоты [2]. Однако методика эта строится методом последовательных приближений и достаточно трудоёмкая, ее непросто использовать в реальных инженерных расчетах, что усложняет и проектирование схем тепловых пунктов, и управление их работой. Чтобы разработать более простой подход, в работах [3, 4] выполнено систематическое моделирование работы теплообменников в различных режимах и выведены аналитические формулы, описывающие изменения параметров теплообменников для различных схем тепловых пунктов и графиков центрального регулирования. В данной работе на основе полученных в [3, 4] формул предложена инженерная методика расчета переменных режимов работы теплового пункта.

При помощи разработанной методики была определена температура воды, возвращаемой в обратную магистраль теплосети и рассчитаны расходы сетевой воды с интервалом в один час. Результаты расчета сравнивались с эксплуатационными данными. Корреляционно-регрессионный анализ показал достаточно высокую точность предложенной методики. Это позволяет применять её для настройки системы регулирования и скорректировать нерациональные режимы работы.

Список литературы

1. Рафальская Т.А., Рудяк В.Я. О применимости соотношений с постоянными параметрами для расчета переменных режимов

- теплообменных аппаратов // Известия вузов. Строительство, 2018. № 8. С. 91–107. DOI: 10.32683/0536-1052-2018-716-8-91-107.
2. **Рафальская Т.А.** Исследование возможности организации низкотемпературного теплоснабжения при центральном качественном регулировании // Теплоэнергетика, 2019. № 11. С. 102–112. DOI: 10.1134/S0040363619110043.
 3. **Рафальская Т.А., Рудяк В.Я.** Влияние расходов теплоносителей на параметр теплообменника при переменных режимах его работы // Вестник МГСУ, 2019. Том 14. Выпуск 5. С. 621–633. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.621–633.
 4. **Рафальская Т.А., Рудяк В.Я.** О влиянии температур теплоносителей на параметр теплообменника в переменных режимах работы // Известия вузов. Строительство, 2019. № 10. С. 28–43. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-730-10-28-43.

Ремчуков С.С.¹, Лепешкин А.Р.^{1,2,3}, Ярославцев Н.Л.²

¹ ГНЦ ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»,

Москва, 111116, ул. Авиамоторная, 2

² ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,

Москва, 125993 Волоколамское шоссе, 4

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК СЛОЖНОГО ЦИКЛА

Газотурбинные энергетические установки (ГТУ) находят широкое применение в народном хозяйстве. В настоящее время используются и конвертированные авиационные двигатели (АД) в качестве ГТУ. Однако, для повышения эффективности наземных ГТУ существует гораздо больше возможностей в отличие от АД. Одна из актуальных задач повышения эффективности ГТУ наземного применения – снижение удельного расхода топлива. Ввиду снижения важности критерия массогабаритных характеристик при рассмотрении наземных ГТУ, заслуживает внимания способ повышения топливной эффективности за счет установки теплообменника (ТО). В таких ГТУ осуществляется передача части тепла отработавших в турбине газов закомпрессорному воздуху, благодаря этому, тепловая энергия возвращается в цикл [1]. Анализ эффективности различных типов поверхностей теплообмена показывает, что наилучшие показатели обеспечивают пластинчатые ТО.

Создание теплообменника для наземной ГТУ сложного цикла является многодисциплинарной задачей, которая включает этапы проектирования, расчета, изготовления и специальных испытаний (работа выполнена при частичной поддержке РФФИ грант № 12-08-00332). При создании пластинчатого ТО для наземной ГТУ целесообразно максимально автоматизировать все этапы работы. Методика комплексного автоматизированного проектирования, расчета и изготовления пластинчатых ТО для наземных ГТУ включает следующие этапы [2]: введение исходных данных в параметрическую модель и проверка соответствия ограничениям; перестроение параметрической модели; подготовка сеточных моделей пластины, воздуха и газа; расчет обтекания конверта воздухом и газом; вывод результатов расчетов; анализ результата, корректировка исходных данных. Комплексная методика имеет итерационный характер. Если в результате стадии проектирования и расчета тепловые и гидравлические характеристики ТО не устраивают проектанта, то осуществляется возврат к первому этапу и просчитывается следующая конфигурация. При достижении требуемых параметров осуществляется переход к стадии технологической подготовки, которая включает в себя следующие этапы [3]: формирование 3D модели спроектированной пластины; моделирование комплекта формообразующих для изготовления пластины; проектирование оснастки для входных каналов пластины; создание прижимных приспособлений для соединения пластин в конверт; моделирование технологических вставок для соединения конвертов между собой. Результатами работы по разработке комплексной методики автоматизированного проектирования, расчета и изготовления являются полный комплект 3D моделей ТО оптимальной конфигурации и технологическая оснастка для его изготовления. По предложенной комплексной методике был изготовлен экспериментальный теплообменник, который прошел испытания на испытательном стенде ЦИАМ и подтвердил заявленные характеристики.

Список литературы

1. **Тихонов А.М.** Регенерация тепла в авиационных ГТД. М.: Машиностроение, 1977. 108 с.
2. **Ремчуков С.С., Данилов М.А., Чистов К.А.** Автоматизированное проектирование и расчет пластинчатого теплообменника для малоразмерного газотурбинного двигателя // Вестник МАИ. 2018. Т. 25. № 3. С. 116—123.
3. **Ремчуков С.С., Лебединский Р.Н., Ярославцев Н.Л.** Внедрение технологии изготовления пластинчатого теплообменника МГТД в методику автоматизированного проектирования и расчета // Авиационная промышленность. 2019. № 2. С. 26—30.

Ротов П.В.¹, Сивухин А.А.², Гафуров Р.А.¹, Ротова М.А.¹

¹ Ульяновский государственный технический университет,
Ульяновск, 432027, Северный Венец, 32

² УМУП «Городской теплосервис»,

Ульяновск, 432071, К.Маркса, 25

asivuhin@mail.ru

О НОРМАТИВАХ НА ПОДОГРЕВ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ

В настоящей работе рассматриваются существующие законодательные особенности горячего водоснабжения, санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования, а также температурные нормативы к качеству горячей воды.

Практика показывает, что норматив на подогрев холодной воды в отличие от норматива на отопление, повсеместно занижен. Особенностью отечественных систем горячего водоснабжения, существенно влияющей на экономичность их работы, является большое значение циркуляционного расхода в тепловом балансе. При постоянной циркуляции и температуре горячей воды в пределах от 60°C до 70°C, значение фактического удельного теплоснабжения на ГВС может быть более 0,1 Гкал/м³. В малозаселённых домах, кварталах, а также там, где некоторые из жителей перешли на самостоятельный газовый или электрический нагрев воды, эта величина ещё выше.

В целях определения фактических коэффициентов на подогрев холодной воды для предоставления коммунальной услуги по горячему водоснабжению и сопоставления с утвержденным нормативом на подогрев, влияющем на распределение потерь в общей системе теплоснабжения и горячего водоснабжения, проведено обследование режимов работы внутридомовых систем горячего водоснабжения ряда многоквартирных жилых домов в системе теплоснабжения г. Ульяновска.

По итогам проведенных технических мероприятий определены значения фактических коэффициентов на подогрев холодной воды, предложены способы снижения сверхнормативного расхода тепла на подогрев холодной воды и определена техническая возможность их реализации.

Румянцев Е.В.¹, Токталиев П.Д.², Мартыненко С.И.^{2,3}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, 119991, Ленинские горы, д. 1

² Институт проблем химической физики РАН,
142432, Московская область, город Черноголовка, проспект академика
Семенова, 1,

³ Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И.
Баранова,
Москва, 111116, ул. Авиамоторная, 2
Martynenko@ciam.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СМЕШЕНИЯ В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПОДАЧЕЙ ОКИСЛИТЕЛЯ

В работе приведены результаты математического моделирования горения топливовоздушной смеси в модельной камере сгорания прямоугольного поперечного сечения с распределенной подачей окислителя. Схема исследуемой модельной камеры сгорания приведена на рис. 1. Окислитель (воздух) подают во входном сечении канала, однако часть окислителя подается через боковую поверхность канала. Целью работы является исследование влияния схемы подачи окислителя на интенсивность горения углеводородного топлива (УВТ), а так же построение методики оптимизации горения в рассматриваемых условиях. Фактически речь идёт о решении одной из обратных задач тепломассобмена при горении, в которой управляющим воздействием является способ подачи окислителя (граничное условие), а следствием – состояние системы «топливо-окислитель», характеризуемое некоторым параметром, например, полнотой сгорания топлива.

3D математическая модель состоит из уравнений Навье-Стокса, уравнений $K-\varepsilon$ модели турбулентности и уравнений субмодели, описывающих горение компонентов газовой смеси. В данной работе была использована модель горения, основанная на использовании переменных Шваба-Зельдовича и получившая широкое применение для задач с раздельной подачей топлива и окислителя.

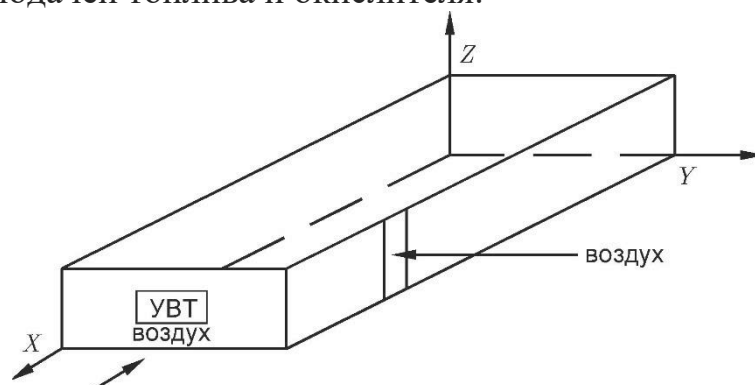


Рис. 1. Схема модельной камеры сгорания и распределенной подачей окислителя.

В инженерной практике чаще всего обратную задачу пытаются свести к совокупности прямых задач, т.е. варьируют параметры прямых задач до тех пор, пока не будет достигнут удовлетворительный результат. Как правило, подобный перебор возможных вариантов требует колоссальных вычислительных усилий. Кроме того, заранее неизвестна возможность физической реализуемости искомого решения. Объем вычислительной работы можно уменьшить, если помимо 3D модели использовать 1D модель, использующей эмпирические данные, полученные в результате 3D моделирования. В работе представлен алгоритм решения данной обратной задачи, основанный на схеме «предиктор» (1D моделирование) и «корректор» (3D моделирование), и результаты вычислительных экспериментов. Разработанный вычислительный алгоритм представляет интерес для оптимизации топливосжигающих устройств различного назначения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-31-20059 (Развитие аналитических и численных методов и программных средств математического моделирования для определения, сопоставления и оптимизации характеристик реактивных двигателей с медленным и детонационным горением)

*Sabanin V. R.*¹, *Nesterenko V.A.*¹, *Repin A. I.*²

¹ National Research University "MPEI",

Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

² Energoavtomatika LLC,

Russia, 109316 Moscow, proezd Ostapovsky, 3, building, 2

MULTIPARAMETRIC MULTIEXTREMAL OPTIMIZATION ALGORITHM «SIMPLEX EVOLUTION»

The multiparametric multi-extreme optimization algorithm «Simplex Evolution» combines several optimization strategies: the Nelder-Mead search method [1], evolutionary search, and parallel computation. The evolutionary computation makes the algorithm heuristic. This means that the optimization result is not guaranteed to be accurate, but is generally acceptable for most tasks. In [2], the main method essence and its testing on the number of multi-extreme functions are presented. Its effectiveness in comparison with genetic optimization algorithms is shown. In this paper, we propose the algorithm modification by using parallel computation. To speed up the optimization algorithm, not one, but several parallel evolving populations are used. Studies show that parallel computation can increase the global extremum finding probability and reduce the total calculation time. The required populations number depends on the processor type that is used for calculations. Moreover, the parallel calculation efficiency depends not on the number of possible processor threads, but on the number of cores. For example, for single-core

processors, increasing the number of threads that run the calculation does not lead to optimization efficiency increase. For multi-core processors, the effective number of populations is usually equal to the number of processor cores.

Figure 1 shows the algorithm convergence graph for one of the test multi-extreme problems. Calculations were performed on a Quad-core Intel Core i7 processor.

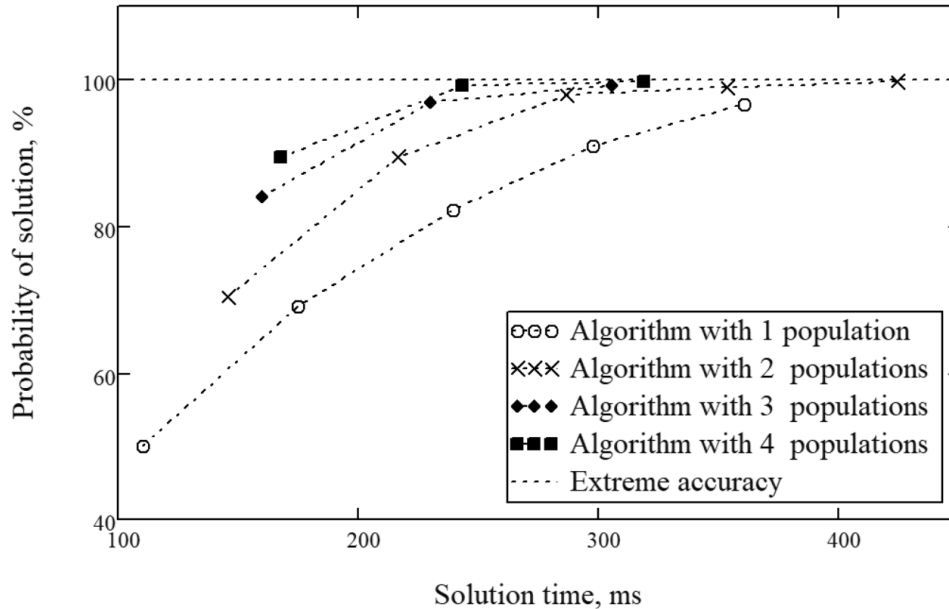


Fig.1. The Simplex Evolution algorithm convergence graphs for different parallel evolving populations numbers

The figure shows that increasing the parallel population numbers of in the calculation can significantly increase the global extremum finding probability and reduce the total calculation time.

List of references

1. J. A. Nelder and R. Mead, Computer Journal, 1965, vol. 7, p. 308—313.
2. Sabanin V. R., Smirnov N. I., Repin A. I. Modified genetic algorithm for optimization problems in management/ / EXPONENTA PRO, mathematics in applications, scientific and practical journal, №3 – 4 (7 – 8) 2004 G. Pages 78-85.

*Слюсарский К.В.¹, Ларионов К.Б.¹, Янковский С.А.¹, Губин В.Е.¹,
Гвоздяков Д.В.¹, Рыжий И.В.², Штегман А.В.²*

¹ Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина, 30

² Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена
трудового красного знамени теплотехнический
научно-исследовательский институт»,
Москва, 115280, ул. Автозаводская, 14
laryk070@gmail.com

РЕЗУЛЬТАТЫ ПУСКОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ДЕМОНСТРАЦИОННОГО СТЕНДА ГОРНОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕЙ

Использование в качестве первичного источника энергии твердого топлива в мировой энергетике занимает значительную долю от общего количества потребляемых энергоресурсов и составляет по оценке экспертов в мире в целом более 40% [1]. Стратегия развития топливно-энергетического комплекса России предполагает увеличение количества добываемого угля, используемого в основном для энергетики и коксохимической промышленности. Такой прогнозируемый рост добычи неизбежно приведет к значительному увеличению антропогенной нагрузки и ухудшению экологической ситуации. Одним из решений, направленных на технологическое совершенствование подходов к использованию энергетического потенциала угля является его глубокая конверсия с последующим получением синтетического газа. В настоящей работе представлены результаты пусковых испытаний опытно-промышленной газогенерирующей установки горнового типа (производительностью 4 т/ч) для различных марок углей.

Газогенератор представляет собой цилиндрический сосуд, работающий под давлением (номинальное давление 0,6 МПа) с водяным охлаждением. Способ отвода образующегося шлака – жидкий. В качестве газифицирующего агента подводимого фронтальным способом, используется воздух и перегретый пар (200-300 °С), который подается от компрессора и парогенератора соответственно. В качестве исследуемых образцов были приняты следующие марки углей с размером фракции 5-50 мм: ЗБ, Д, Т и А. Топливо после механического фракционирования загружается в топливный бункер с помощью крутонаклонного конвейера, а затем через систему шлюзования – в предварительно прогретый (до 800 °С) газогенератор.

После загрузки топлива, в газогенератор подавался сжатый воздух. В результате взаимодействия окислительной среды и угля начинался

процесс возгонки летучих веществ (пиролизный газ) с последующей газификацией образующегося углеродного остатка. Образующийся генераторный газ с температурой 800-1100 °С (в зависимости от типа угля) перед факельной установкой охлаждается впрыском воды до температуры 500-600 °С. Далее газ по тракту направляется в систему очистки и охлаждения. Количественный состав получаемого синтез-газа (СО, СО₂, Н₂ и СН₄) определяется с помощью поточного газоанализатора БОНЭР (Россия).

В таблице 1 представлен состав синтез-газа, зафиксированный в ходе проведения испытаний в номинальном режиме работы газогенератора.

Таблица 1 – Состав синтез-газа

Параметр	Обозначение	Марка угля			
		Д	2Б	Т	А
СО ₂	% об.	5,4	7,4	4,9	9,3
СН ₄		3,6	8,8	8,2	3,4
СО		20,8	18,1	26,2	21,3
Н ₂		7,3	7,8	8,2	23,2

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации проектов № FSWW-2020-0022.

Список литературы

1. International Energy Agency. Coal information, <http://www.iea.org/Sankey>; 2017; [accessed 20.12.2019]

Стеклов А.С.

Акционерное Общество "Опытное Конструкторское Бюро
Машиностроения имени И.И. Африкантова"
603074, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд 15

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АРМАТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

В процессе эксплуатации арматура подвергается воздействию значительного числа факторов, зачастую случайных (варьирование параметров рабочей и окружающей среды). Вследствие этого происходит рассеивание параметров технического состояния арматуры. При этом, чем выше вариация параметров технического состояния, тем менее эффективны регламентные схемы ТОиР, т.к. в этом случае всегда присутствует фактор неопределенности технического состояния объекта.

Решение задач диагностики неразрывно связано с прогнозированием надежности на ближайший период эксплуатации, до следующего технического осмотра, капитального ремонта и т.д.

Перспективным направлением в области решения задач прогнозирования является применение аппарата искусственных нейронных сетей.

Нечеткие нейронные, или гибридные, сети призваны объединить в себе достоинства нейронных сетей и систем нечеткого вывода. С одной стороны, они позволяют разрабатывать и представлять модели систем в форме правил нечетких продукций, которые обладают наглядностью и простотой содержательной интерпретации. С другой стороны для построения правил нечетких продукций используются методы нейронных сетей, что является более удобным и менее трудоемким процессом для системных аналитиков.

Основная идея, положенная в основу модели гибридных сетей, заключается в том, чтобы использовать существующую выборку данных для определения параметров функций принадлежности, которые лучше всего соответствуют некоторой системе нечеткого вывода. При этом для прохождения параметров функции принадлежности используются известные процедуры обучения нейронных сетей.

Гибридная сеть обучается с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Этот алгоритм представляет собой итеративный градиентный алгоритм минимизации среднеквадратичного отклонения значений выхода от желаемых значений (минимизации ошибок) в многослойных нейронных сетях.

В докладе показана разработанная нечеткая модель гибридной сети для прогнозирования технического состояния задвижки. Суть данной задачи состоит в том, что зная динамику изменения состояния системы за фиксированный интервал времени, спрогнозировать значения состояния системы на определенный момент в будущем.

В докладе предложен подход к прогнозированию технического состояния арматуры, основанный на применении аппарата искусственных нейронных сетей, которые позволяют предсказывать значение прогнозируемой величины с учетом внешних факторов, таких как условия эксплуатации и износ оборудования. Применение такой системы диагностики и прогнозирования позволит выявлять отказы элементов арматуры на ранних стадиях и предотвращать их, что положительно скажется на уровне безопасности.

Стрижиченко А.В.¹, Зенина Е.Г.¹, Султанов М.М.¹, Желяскова О.И.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Волжский, 404110, проспект Ленина, 69

Strijichenko@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Силовые трансформаторы относятся к основному электротехническому оборудованию электростанций и распределительных сетей. При превышении эксплуатационного ресурса трансформаторного оборудования, особенно под воздействием неблагоприятных условий, возможны его тяжелые повреждения с нарушением электроснабжения потребителей.

Чаще всего отказ трансформатора происходит по причине повреждения изоляции, что, в свою очередь, происходит из-за неправильного или некачественного монтажа, износа изоляции, короткого замыкания, значительной или длительной перегрузки в аварийных и послеаварийных режимах, грозовых или коммутационных перенапряжений, загрязнения масла, конструкционных (производственных) ошибок [1].

Требования к допустимым нагрузкам силовых масляных трансформаторов общего назначения мощностью до 100000 кВА включительно с видами охлаждения М, Д, ДЦ и Ц, а также методику расчета относительного износа витковой изоляции устанавливает [2]. Стандарт устанавливает метод расчета допустимых систематических нагрузок и аварийных перегрузок по задаваемым исходным данным, а также нормы таких нагрузок и перегрузок для суточного графика нагрузки трансформаторов с учетом температуры охлаждающей среды. Однако приведенная методика расчета относительного износа витковой изоляции трансформаторного оборудования не учитывает влияния показателей качества электрической энергии на сокращение срока службы изоляции трансформатора. Степень соответствия электрической энергии нормируемым показателям устанавливает [3]. Данный стандарт содержит требования к коэффициентам искажения синусоидальной кривой напряжения. Высшие гармонические составляющие напряжений и токов приводят к возникновению дополнительных потерь мощности в трансформаторе, усиленному нагреву его обмоток и увеличению значения температуры наиболее нагретой точки. Источниками высших гармонических составляющих тока являются электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

В работе показано, что на суточное сокращение срока службы витковой изоляции существенное влияние оказывает наличие высших

гармонических составляющих тока, также получена зависимость влияния высших гармонических составляющих тока на скорость износа витковой изоляции трансформаторного оборудования.

Учет высших гармоник тока в расчете скорости относительного износа витковой изоляции и суточного сокращения срока её службы позволит прогнозировать остаточный ресурс трансформаторов и планировать своевременный вывод оборудования в ремонт по текущему состоянию.

Список литературы

1. Илюшин П.В., Догадкин Д.И. Пути повышения надежности работы и снижения затрат на эксплуатацию силовых трансформаторов 6-220 кВ в распределительных сетях // ЭнергоЭксперт, 2012, № 5, С. 74-79.
2. ГОСТ 14209-85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки.
3. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Султанов М.М.¹, Байдакова Н.В.¹, Бондаренко Н.Е.¹, Латышов К.В.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Волжский, 404110, проспект Ленина, 69
baydakovanv@mail.ru

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗВИТИЮ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВИЗАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Процесс цифровизации затрагивает все важнейшие области промышленности и экономики, в том числе и топливно-энергетический комплекс (ТЭК). Внедрение информационных технологий при системном подходе способно решить основные проблемы ТЭК, связанные с низкой эффективностью предприятий и изношенностью сетей и оборудования, а также создать инновационные продукты для дальнейшего развития всей отрасли. Прежде всего, цифровизация позволит обеспечить безопасность производства, оптимизировать процессы и сократить издержки, связанные с плохим состоянием сетей и оборудования.

При проведении цифровой трансформации в энергетике существует три направления:

1. Цифровизация текущей операционной модели.
2. Использование продвинутой аналитики.
3. Изучение новых технологий.

В рамках развития первого направления могут быть применены такие решения как цифровизация внутренних интерфейсов, что позволит

улучшить и упростить взаимодействие с потребителями, повысить доступность данных, а также использование их при принятии решений для оценки технического состояния оборудования и принятия решения при реализации процесса генерации.

Для развития второго направления необходимо наращивать компетенции сотрудников в использовании продвинутой аналитики, так как внедрение инновационных технологий значительно увеличивает количество данных по сравнению с ручным сбором, а глубокий анализ этих данных не может быть проведен с использованием стандартных инструментов. Обладая достаточным объемом информации, можно корректировать и менять стратегии развития предприятий ТЭК, делая их более конкурентоспособными и клиентоориентированными.

Авторами проведен анализ данных о режимах, техническом состоянии оборудования и выполнения программ восстановления технических систем для разработки новых подходов и комплексных технических решений для энергетических компаний в условиях рыночной и цифровой экономики и создания методологии обеспечения высокого уровня безопасности, надежности и экономичности функционирования оборудования на действующих энергетических предприятиях.

Авторами предложен алгоритм формирования базы данных о режимах и системы непрерывного учета и анализа данных о техническом состоянии оборудования энергетических систем.

Список литературы

1. **Захарченко В.Е., Сидоров А.А.** О цифровизации гидроэлектростанций // Автоматизация в промышленности 2019. № 1. С. 19—23.
2. **А. Заутер** Как новые технологии превратят энергетические предприятия в ИТ-компании // Control Engineering Россия декабрь 2018
3. **С. Румянцева** Цифровизация энергетики: от «интеллектуальных» турбин до «умных» сетей // Газета "Энергетика и промышленность России". 2018. № 11-12 с.343-344.

Султанов М.М., Смирнов А.А., Юров В.А., Луненко В.С.

Филиал «НИУ «МЭИ» в г. Волжском,

Волжский, 404110, пр. Ленина, 69

kuponosovavalentina@mail.ru

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КОНСЕНСУСА И СТРУКТУРЫ БЛОКОВ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Современный уровень развития технологий энергетических предприятий предъявляет высокие требования к надежности оборудования, а также эффективной его работы. Надежность оборудования базируется на обязательном применении новейших средств, методов контроля и наладки энергетического оборудования. Одним из основных критериев обеспечения надежности энергетического оборудования является качество информационного обеспечения, в котором отражаются информация об объекте за весь период работы.

Анализ статистических данных позволяет определить наиболее характерные причины, приводящие к авариям и отказам оборудования.

В связи с этим повышается актуальность создания единой базы для информационного обеспечения надежности энергетического оборудования, в которой бы хранились данные о текущем состоянии объекта и данные о дефектах, отказах, ремонтах и авариях.

Для создания такой информационной системы можно использовать технологии децентрализованного хранения данных, на основе блокчейна. Здесь каждый участник системы может хранить данные и выводить их.

Блокчейн представляет собой инструмент для хранения и передачи данных. Хранение всех данных происходит одновременно у всех пользователей, тем самым гарантируется безопасность информации.

Для рассматриваемой информационной системы все участники энергетического рынка являются равноправными и берут на себя функции контроля, обеспечения надежности и безопасной деятельности в этой сфере. Государство должно взять на себя функции контроля допуска в системе информационного обеспечения различных участников энергетического рынка.

Каждый участник должен проходить регистрацию. Если участник соответствует всем установленным требованиям, то ему передается приватный ключ, с помощью которого он может подписывать свои данные и отправлять в блокчейн.

Вся информация хранится в виде блоков с данными, где каждый блок имеет хэш предыдущего блока. Индивидуальный блок цепочки несет в

себе информацию обо всех предыдущих блоках. В результате такого хэширования цепочка блоков становится неизменяемой.

На рисунке 1 представлена общая схема информационной системы, на которой изображено два блока в цепочке.

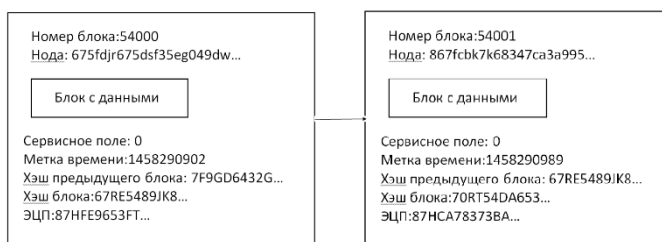


Рис. 1 Схема блоков информационной системы

Блоки, попадающие в сеть, должны соответствовать алгоритмом консенсуса, в противном случае участники сети не принимают эти блоки, и они не попадают в общую цепочку с данными.

*Тверской Ю.С., Голубев А.В., Муравьев И.К., Никоноров А.Н.,
Гайдина Ю.А., Колесов И.А.*

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»,
Иваново, 153003, Рабфаковская, 34
kafsu@ispu.ru

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ АСУТП ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПАРАДИГМА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Современное развитие энергетики в России характеризуется вводом в действие энергоблоков, оснащенных распределенными многофункциональными автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП) на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры. ПТК в этой структуре служит системообразующим компонентом, а АСУТП в целом формирует единую информационно-технологическую среду энергоблока.

Основные проблемы многофункциональных АСУТП связывают с недостаточным техническим уровнем ПТК, неотработанностью алгоритмов управления и несовершенством технологии создания системы. Проблема технического уровня ПТК в последние годы во многом утратила свою остроту вследствие широкого применения (при разработке ПТК) достижений в области новых информационных технологий и накопленного опыта по отработке инструментальных средств реализации типовых информационных и управляющих функций для впервые вводимых в действие полномасштабных АСУТП. Однако, выходя за пределы типовых функций в направлении создания

интеллектуальных АСУТП, следует признать, что возможности современных ПТК весьма ограничены.

В основе разработки многофункциональных АСУТП лежит сквозная технология проектирования. Основной наукоемкой задачей совершенствования сквозной технологии создания АСУТП является решение проблем начальных этапов работ, связанных с получением гарантированного результата на стадии ввода сложной систем и ее последующей эффективной эксплуатации.

Суть проблемы связана, *во-первых*, с критериями оценки принимаемых общесистемных решений (в части обоснования информационного масштаба АСУТП и проектной компоновки ПТК).

Во-вторых, как следствие - с требуемым уровнем технического и программного обеспечения ПТК и его компонентов, в том числе сторонних подсистем (прежде всего в части получения необходимой объективной информации о технологических процессах, точности преобразования формируемых сигналов и создания представительного/адекватного архива АСУТП).

В-третьих, - с синтезом прикладных алгоритмов управления и диагностирования (в части разработки, испытания и функционирования, как типовых задач, так и реализации новых функций АСУТП).

Преодоление обозначенных проблем совершенствования технологии АСУТП связано с развитием методологии разрабатываемых математических моделей объектов управления и процессов, особенностями динамических каналов, информационными свойствами параметров и формируемых сигналов. При этом парадигма проблемы эффективности (цена/качество) АСУТП заключается в том, что ответ на эти ключевые вопросы может быть получен только после ввода системы в эксплуатацию и проведения дополнительных работ по оценке и оптимизации информационно-функциональной и технической структур АСУТП.

В докладе обсуждаются некоторые новые результаты решения обозначенных задач в рамках совершенствования технологии современных АСУТП и перспективы их развития как основного научного направления кафедры систем управления ИГЭУ.

Список литературы

1. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн. 1. Проблемы и задачи / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского. ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2013. 260 с.
2. **Тверской Ю.С., Таламанов С.А.** Особенности и проблемы современного этапа развития технологии создания АСУТП тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2010. № 10. С. 37-44.

3.Тверской Ю.С., Голубев А.В., Никоноров А.Н. «Полигон АСУТП электростанций» – эффективное средство подготовки специалистов и тестирования сложных систем управления // Теплоэнергетика. 2011. №10. С. 70-75.

Тверской Ю.С., Муравьев И.К.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, 153003, Рабфаковская, 34
kafsu@ispu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЭНЕРГОБЛОКОВ С ПАРОГАЗОВЫМИ УСТАНОВКАМИ

Развитие современных многофункциональных АСУТП энергоблоков направлено на повышение эффективности тепломеханического оборудования путем более полного учета разного рода факторов и ограничений и носит, как правило, междисциплинарный характер. Особенно остро междисциплинарные проблемы проявились при освоении парогазовых технологий.

Несмотря на то, что энергоблоки с парогазовыми установками (ПГУ) обладают целым рядом известных преимуществ, для них характерен ряд существенных отрицательных факторов, которые влияют как на снижение экономичности оборудования, так и его эксплуатационной надежности (срок службы газовых турбин более чем в 2 раза меньше срока службы паровых турбин).

В условиях реальной эксплуатации при участии энергоблоков в регулировании общесистемных параметров для поддержания эффективности ПГУ требуется совместное решение, по меньшей мере, трех следующих проблем.

Первая проблема связана с обоснованием информационного масштаба многофункциональной АСУТП, который, как правило, имеет опытно-коммерческое происхождение. Другими словами, состояние современных локальных систем управления требует строгого обоснования вектора управляемых технологических параметров ПГУ, как сложного технологического объекта управления.

Вторая проблема определяется критичностью работы ПГУ к изменениям нагрузки и внешних климатических параметров, что существенно влияет на динамические особенности температурного режима газовой турбины и требует многопараметрической оптимизации подачи топлива и воздуха в камеру сгорания.

Третья проблема связана с технологическими особенностями тепловых схем энергоблоков с ПГУ, содержащих активную газотурбинную часть с регулируемой подачей топлива и воздуха и пассивную утилизационную

часть с практически полным отсутствием управления тепловой нагрузкой котла-утилизатора и мощности паровой турбины.

В докладе представлены новые результаты развития методологии обобщенного термодинамического анализа эффективности газотурбинной установки и бинарного энергоблока в целом, направленное на исследования и анализ способов управления мощностью энергоблоков с ПГУ. При этом выделены случаи экономичного режима, учитывающие режимные ограничения и вариацию климатических факторов, и режим форсированной мощности, учитывающий требование нормированного первичного регулирования общесистемных параметров.

Полученный результат определяет подходы к решению проблем структурного синтеза автоматической системы регулирования подачи топлива и воздуха в газотурбинную установку, разработку методики их настройки (параметрической оптимизации) и оценку эффективности в широком диапазоне нагрузок при разного рода ограничениях с учетом изменяющихся внешних климатических факторов. Исследования выполнены на математических моделях (полимоделльном комплексе).

Список литературы

1. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн. 1. Проблемы и задачи / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского. ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2013. Кн.1. 260 с.
2. **Tverskoy Yu.S., Muravev I.K.** Optimization of controlled processes in combined-cycle plant (new developments and researches) // РТРРЕ-2017. IOP Conf. Series 891 (2017). 012260. doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012260.
3. **Аракелян Э.К., Косой А.А.** Особенности работы ПГУ в режимах регулирования нагрузки энергосистемы // Новое в российской электроэнергетике. 2020. № 2. С. 6-15.

*Тверской Ю.С., Целищев Е.С., Голубев А.В., Муравьев И.К.,
Никоноров А.Н.*

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, 153003, Рабфаковская, 34
kafsu@su.ispu.ru

ОПЫТ И ОСОБЕННОСТИ ИННОВАЦИОННОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ НА ПОЛИГОНЕ АСУТП ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Уровень требований к подготовке инжинирингового и эксплуатационного персонала в области современных систем автоматизации и управления определяется, в первую очередь, сложностью

управляемого технологического оборудования. Так энергоблоки и энергоустановки как объекты управления характеризуются высокой размерностью и переопределенностью, присутствием фактора неопределенности большинства характеристик в целом нелинейной нестационарной системы, а также действием случайных, как правило, неконтролируемых возмущений и значительным числом параметров, недоступных для непосредственного измерения.

В связи с этим важнейшее значение приобретает задача создания и совершенствования адекватных средств и методов обучения в области автоматизации и управления путем интеграции фундаментального инженерного образования и современных достижений в области информационных технологий управления.

Лабораторная база, существующая в высших технических учебных заведениях, во многом не соответствует современному уровню промышленных систем и не достаточна для обеспечения требуемого уровня междисциплинарной подготовки специалистов в области современных систем управления.

При этом, с одной стороны, большое число компьютерных учебников по теории автоматического управления и технологии АСУТП оторваны от практики создания промышленных систем управления и не закрывают нишу научно-экспериментальной лабораторной базы. С другой стороны, штатные компьютерные тренажеры энергоблоков электростанций и отраслевые центры переподготовки создаются под конкретное оборудование, отрабатывают в основном функции оперативного управления и не могут выполнять основную задачу – *базовую междисциплинарную подготовку специалистов в области автоматизации, технологии создания и эксплуатации современных системообразующих многофункциональных АСУТП, реализуемых на базе ПТК сетевой иерархической структуры.*

В докладе обобщаются результаты 20-летнего опыта использования и развития учебно-исследовательского комплекса «Полигон АСУТП электростанций» и лабораторий Учебно-научного центра «АСУТП в энергетике» для подготовки специалистов по автоматизации и повышения квалификации персонала электростанций. Рассматриваются методологические особенности разработки учебно-исследовательских АСУТП, применяемых в учебном процессе, и методы обучения различных групп специалистов.

Список литературы

1. **Тверской Ю.С., Аракелян Э.К., Кузнецов С.И.** Подготовка и повышение квалификации специалистов в области современных АСУТП электростанций // Теплоэнергетика. 2006. №11. С. 70-74.
2. **Tverskoy Yu.S., Golubev A.V., Nikonov A.N.** The proof ground for automated process control systems of power stations: an efficient tool for

training specialists and testing complex control systems // Thermal Engineering. 2011. №10. P. 869-875.

3. **Marcano L., Haugen F., Sannerud R., Komulainen T.** Review of simulator training practices for industrial operators: How can individual simulator training be enabled? // Safety Science. Volume 115. June 2019. P. 414-424.

Тугов А.Н.

ОАО «ВТИ»

Москва, 115280, ул. Автозаводская, д. 14

ANTugov@vti.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ТКО: РОССИЙСКИЕ РЕАЛИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Под энергетической утилизацией отходов обычно понимают их термическую переработку, в результате которой энергопотенциал отходов преобразуется в тепловую и/или электроэнергию с последующим отпуском этой энергии потребителю. Сейчас только в Европе работает 492 предприятий для термической переработки твердых коммунальных отходов (ТКО). Всего в мире их насчитывается примерно 2450, а их суммарная электрическая мощность уже составляет более 15 ГВт с объемом отпускаемой электроэнергии свыше 53 млрд кВт-ч в год [1]. Но все же не на всех таких предприятиях процесс выработки энергии из отходов можно отнести к энергетической утилизации.

В ЕС термическую переработку ТКО приравнивают к утилизации только в том случае, если энергоэффективность (Ξ) предприятия, на котором энергопотенциал ТКО преобразуется в тепловую и электрическую энергию, составляет не менее 0,65. Энергоэффективность рассчитывается следующим образом:

$$\Xi = \frac{(E_p - (E_f + E_i))}{(0,97 \cdot (E_w + E_i))}$$

где E_p – энергия, отпущенная потребителю в виде тепла или электроэнергии, ГДж/год. Эта величина умножается на коэффициент 1,1 при отпуске тепла и на 2,6 при выработке электроэнергии; E_f – теплота дополнительного топлива, затраченного на производство энергии, ГДж/год; E_w – энергия, содержащаяся в перерабатываемых отходах, рассчитанная с учетом их теплоты сгорания, ГДж/год; E_i – импортируемая энергии, получаемая от внешнего поставщика, ГДж/год, исключая E_w и E_f ; 0,97 – показатель для расчета тепловых потерь с золошлаковыми остатками и в окружающую среду.

В РФ продолжается рост объемов образования ТКО: в 2016 г. было направлено на объекты захоронения почти 270 млн м³ отходов, в то время

как в 2000г. – только 150 млн м³ ТКО. Если принять плотность отходов на уровне 0,2 т/м³, среднюю теплоту сгорания российских ТКО в рабочем состоянии примерно 8 МДж/кг, а эффективность преобразования энергопотенциала ТКО в электрическую энергию на уровне 20 %, то суммарный энергопотенциал образующихся в России отходов составит примерно 3 ГВт.

Сейчас же в нашей стране построено только три предприятия, на которых энергопотенциал ТКО преобразуется в электроэнергию. Это введенный в 2001 г. после реконструкции московский СЗ №2, на котором установлены три турбоагрегата электрической мощностью 1,2 МВт каждый, московский СЗ № 4 (год пуска 2005 г., установленная электрическая мощность 12 МВт) и московский СЗ № 3 (2007 г., 11 МВт).

С 01 января 2020 вступил в силу Федеральный закон РФ от 27 декабря 2019 г. № 450–ФЗ, в котором использование ТКО в качестве вторичных энергетических ресурсов трактуется как энергетическая утилизация. Вряд ли можно ожидать, что головные образцы отечественных предприятий для энергетической утилизации ТКО будут иметь энергоэффективность выше 0,65. Это, как показано в [1], подразумевает их работу только в теплофикационном режиме с гарантированным отпуском тепла потребителю, что весьма проблематично в России в настоящее время. Скорее всего, в большинстве случаев это будут конденсационные ТЭС с $\eta_{эл} = 0,2$, на которых будут сжигать ТКО с $Q_i' = 7-9$ МДж/кг. Энергоэффективность таких ТЭС на ТКО не превысит 0,45. Именно такое значение следует принять на начальном этапе в качестве критерия отнесения процесса термической переработки ТКО к энергетической утилизации. Только тогда открываются реальные перспективы создания отечественных предприятий для энергетической утилизации ТКО в нашей стране. В дальнейшем по результатам опытной эксплуатации головных образцов таких предприятий этот показатель может быть скорректирован в сторону увеличения, а в пределе даже сравняться с принятым в ЕС значением.

Список литературы

1. Тугов А.Н. К вопросу об энергетической утилизации твердых коммунальных отходов в России// Энергетик.-2020.- №9.- С. 15-18

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ТКО

Для проектирования и эксплуатации ТЭС, основным топливом которой являются твердые коммунальные отходы (ТКО), необходимо знать, по крайней мере, такие основные теплотехнические характеристики ТКО как теплота сгорания, влажность и зольность. Определить интегральные теплотехнические характеристики ТКО, используя принятый в теплотехнике метод расчета, практически невозможно. В этой связи во ВТИ была специально разработана методика [1], наиболее приспособленная для прикладного использования на энергоустановках, сжигающих ТКО.

Суть изложенной в [1] методики состоит в том, что отобранная, представительная проба отходов предварительно путем просеивания через грохот (решетку) с размером ячеек 50×50 мм разделяется на мелкую (подрешеточную) и крупную (надрешеточную) фракции. Далее надрешеточная фракция сортируется по компонентным группам на древесные, бумажные, металлические, кожанотекстильные, пластиковые (включая пленки, ПЭТФ-бутылки) и пищевые отходы, композитные материалы (пакеты для жидких продуктов питания – упаковка тетра-ПАК), а также неорганические материалы. Определяется массовая доля каждой из этих компонентных групп, включая долю мелкой фракции - K_n^r . Далее в лабораторных условиях определяется влажность (W_{in}^r) и зольность на сухое состояние (A_n^d) этих компонентных групп, а затем рассчитываются интегральные значения теплоты сгорания (Q_i^r), влажности (W_t^r) и зольности (A^r) в целом для ТКО по формулам:

$$Q_i^r = \sum [K_n^r (1 - W_{in}^r / 100) (1 - A_n^d / 100) \cdot Q_{in}^{daf}] - 0,02442 \cdot \sum (K_n^r \cdot W_{in}^r)$$

$$W_t^r = \sum (K_n^r \cdot W_{in}^r)$$

$$A^r = \frac{\sum [K_n^r A_n^d (100 - W_{in}^r)]}{\sum [K_n^r (100 - W_{in}^r)]} \cdot \left[1 - \frac{\sum (K_n^r W_{in}^r)}{100} \right].$$

Ниже в таблице представлены значения низшей теплоты сгорания на сухое беззольное состояние (Q_{in}^{daf}), влажности и зольности на сухое состояние основных компонентных групп ТКО.

Наименование компонента	$Q_{daf, in}^*$, МДж/кг	W_{in}^r , %		A_n^d , %	
		Диапазон	Средняя для ТКО г. Москвы*	Диапазон	Средняя для ТКО г. Москвы*
Пищевые отходы	18,2	60-80	71,4	7-15	10,0
Бумага/картон	16,9	25-35	32,8	7-15	10,7
Древесина	20,3	10-30	20,0	2,5-3,5	3,2
Текстиль	22,6	30-40	32,5	3-8	5,4
Кожа, резина	31,1	5-20	9,7	10-20	15,4
Пластмасса	27,4	10-25	12,7	1,5-7	3,9
Композиционные материалы	26,4	15-25	18,4	10--15	12,3
Отсев (< 50 мм)	20,1	40-60	50,0	20-60	38,1

* - Значения получены путем определения в лаборатории ВТИ для каждого вида отхода, входящего в состав компонентной группы, стандартными методами и последующего усреднения полученных величин для группы в целом.

Для металла и неорганических материалов теплота сгорания принимается равной нулю. Зольность металлических отходов и неорганических материалов из-за прилипших горючих веществ несколько отличается от 100 % и рекомендуется принимать для неорганических материалов (стекла, керамики) – 99,5 %, металлических изделий – 98,9 %.

Список литературы

1. **СТО ВТИ 44.001-2011.** Методика отбора проб, определения морфологического состава, влажности, зольности и низшей теплоты сгорания твердых бытовых отходов. Нормы и требования.- М.: ОАО «ВТИ», 2011.- 11с.

Тупов В.Б., Скворцов В.С., Кузьмина С. А.
 Национальный исследовательский университет «МЭИ»
 Москва, 111250, Красноказарменная ул, 14
 Tupovvb@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ОТ ЛИНЕЙНОГО ИСТОЧНИКА С ПЕРЕМЕННЫМИ ШУМОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПО ДЛИНЕ

Вопросы расчетов из линейных источников хорошо изучены, а результаты представлены во многих работах, особенно применительно к автомобильным и железным дорогам. При этом проблемы расчетов из линейных источников с переменными характеристиками по длине изучены недостаточно, и нет методик расчетов, так и результатов расчетов из линейных источников с переменными характеристиками по

их длине. Такими источниками шума в энергетике являются газопроводы после газорегуляторного пункта (ГРП). Поэтому актуальным является разработка методики расчета от линейного источника с переменными шумовыми характеристиками по длине, так и получение результатов расчетов от такого источника [1]. В настоящей работе получена новая теоретическая формула расчета изменения уровней звукового давления от линейного источника на участке конечной длины. При этом контрольные точки находятся на фиксированном расстоянии от канала. Проведен анализ различных факторов, влияющих на изменение уровней звукового давления от линейного источника с переменными шумовыми характеристиками по длине канала. Особое внимание уделено определению коэффициента снижению уровня шума по длине линейного источника k . По результатам натурным измерений [2], выполненных около газопроводов ТЭС найдена формула нахождения коэффициента k от длины газопровода. Это позволяет получать не только качественные, но и количественные значения снижения уровня шума по длине канала. Результаты расчетов имеют практический интерес. Например, это касается расчета уровня шума от газопровода после газорегуляторных пунктов. Полученные формулы позволяют определять изменение уровня шума на определенном расстоянии по всей длине трубопровода. Результаты расчетов позволяют принять необходимые решения для создания малозагрязняющего объекта и выбрать необходимые меры для его шумозащиты [3].

Список литературы

1. **Тупов В. В.** Calculation of noise level from a linear source with variable noise characteristics along the length// AKUSTIRA, 2019, 32 pp 64-66
2. **Тупов В. В., Тупов В.В., Skvortsov V. S.** Features of Noise Emission from Gas Distribution Stations and Gas Pipelines //Power Technology and Engineering, 2018, 52 , 4 pp 448-450
3. **Тупов В.В.** Комплекс мероприятий по снижению шума от ТЭС// Электрические станции. 2013.№3. С.26-31

Тупов В.Б., Тараторин А.А.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, 111250, Красноказарменная ул, 14
Tupovvb@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ШУМА ОТ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Газотурбинные установки (ГТУ) являются самыми интенсивными источниками постоянного шума среди энергетического оборудования при их штатной эксплуатации [1]. Шум ГТУ излучается от воздухозабора компрессора, от корпуса установки и от среза устья дымовой трубы ГТУ. Самый интенсивный шум, излучаемый через систему воздухозабора ГТУ, обусловлен переменными аэродинамическими силами взаимодействия турбулизованного воздуха от ротора и статора компрессора, а также явлениями неустойчивости турбулентного потока. В настоящее время ГТУ всегда поступает на станцию вместе с глушителем для воздушного тракта, который обеспечивает соблюдения санитарных норм. Влияние шума от корпуса агрегата определяется звукоизолирующими свойствами помещения, где оно установлено, и, как правило, невелико. Шум, излучаемый выхлопным трактом ГТУ, вызван процессом горения, высокой скоростью прохождения газов через проточную часть турбины и турбулентностью газового потока. Уровень шума, излучаемый от дымовой трубы ГТУ, меньше, чем из системы воздухозабора. Поэтому глушители здесь не устанавливаются в обязательном порядке. При отсутствии глушителей шум горения ГТУ, который излучается от срезов дымовых труб, будет определять уровни шума в окружающем районе.

В настоящей работе проанализированы уровни шума от выхлопных газов ГТУ в окружающем районе.

Для этой цели составлены математические модели станций с ГТУ различной мощности. Всего выполнено 24 расчета для восьми типов ГТУ различной мощности от 16,8 до 287 МВт. В моделях рассматривалась установка от одной до трех ГТУ одинаковой мощности на ТЭС. Проанализированы уровни шума от устьев дымовых труб газовых трактов в зависимости от мощности ГТУ и количества установок на различных расстояниях от станций.

Получена новая формула для определения уровня звука от срезов устьев дымовых труб в зависимости от мощности ГТУ и расстоянии от них.

Рассмотрено влияние климатических региональных факторов на излучение шума от ГТУ [2].

Впервые указывается на важность учета климатических региональных факторов как для определения уровня шума на

расстоянии от станции с ГТУ, так и определения величины требуемого снижения шума от каждой ГТУ. Приведены результаты расчетов уровней шума с учетом климатических региональных факторов. Показана важность учета расчета уровней звукового давления на различных среднегеометрических частотах, когда коэффициенты звукопоглощения для различных регионов могут существенно отличаться друг от друга в течение года.

Рассмотрены возможные мероприятия [3] по снижению шума от ГТУ и доведения его до санитарных норм.

Список литературы

1. Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду/ В.Б.Тупов.– М.– Издательский дом МЭИ, 2012.–284 с.
2. **Тупов В.Б., Тараторин А.А., Скворцов В.С.** Влияние региональных климатических факторов на снижение уровня шума от энергетического оборудования//Теплоэнергетика, №11, 2018, С.72-77
3. **Тупов В.Б.** Комплекс мероприятий по снижению шума от ТЭС// Электрические станции. 2013.№3. С.26-31

Тупов В.Б, Тараторин А.А

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

Tupovvb@mpei.ru

ВЛИЯНИЕ ЗАМЕЩЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК НА ПГУ НА РАЗМЕР САНИТАРНО-ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ ПО ФАКТОРУ ШУМА

Повышение безопасности энергетического оборудования тепловых электростанций (ТЭС) является важной задачей. На безопасность силового оборудования влияют физические воздействия, наиболее важным из которых является шум, который является одним из факторов определяющих размер санитарно-защитной зоны ТЭС.

В работе анализируется влияние состава оборудования ТЭС на размер санитарно-защитной зоны (СЗЗ) по фактору шума при замещении оборудования традиционных паросиловых установок на оборудование парогазовых установок. Парогазовые установки (ПГУ) являются наиболее перспективной технологией в теплоэнергетике. В настоящее время большая часть выработавших свой ресурс паротурбинных установок (ПТУ) заменяется ПГУ. ПГУ имеют большую экономичность и при этом отличаются лучшими экологическими показателями, которые заключаются как в меньшем выбросе загрязняющих веществ, так и в меньшем шумовом воздействии. ПТУ поставляются в типовой комплектации, так как их экономичность слабо зависит от внешних

условий работы. Напротив, экономичность ПГУ существенно зависит от климатических условий работы. Такая зависимость обуславливает необходимость выполнения индивидуальных проектов, что позволяет ещё на этапе проектирования оборудования ПГУ предусмотреть необходимые мероприятия для снижения шума. Основными источниками шума ПГУ являются воздухозаборное устройство и газовый тракт за газовой турбиной. Для указанных источников при проектировании предусматриваются мероприятия, позволяющие снизить уровень шума до нормативных значений на границе СЗЗ или рядом с ближайшими нормируемыми объектами. В работе приводятся данные расчётов, показывающие, что повышение мощности генерирующего паросилового оборудования приводит к увеличению размера СЗЗ. Приводится также сравнение с результатами расчётов по полуэмпирической модели и расчётами с использованием вычислительной техники размеров СЗЗ при разном типе и составе паросилового оборудования. При этом переход на сверхкритические параметры пара вызывает скачкообразный рост уровней шума. Рассматривается поэтапный вывод оборудования ПГУ и его замена ПГУ. В этом случае наблюдается снижение уровней шума на границе СЗЗ. Описанный эффект позволяет проводить модернизацию оборудования в городах в условиях сложившейся жилой застройки в том числе с увеличением установленной мощности ТЭЦ. Описано влияние климатических условий на ширину санитарно-защитных зон. Показано, что в течение года границы СЗЗ изменяются при неизменном составе оборудования. Наиболее корректным является указание диапазона, в котором находится граница санитарно-защитной зоны для рассматриваемого объекта. Приведенные результаты позволяют более точно выбирать меры по шумоглушению.

Тупов В.Б., Тараторин А.А., Кузьминова С. А., Скворцов В. С.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
Tupovvb@mail.ru

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СНИЖЕНИЕМ ШУМА

Повышение безопасности энергетического оборудования тепловых электростанций (ТЭС) является важной задачей. На безопасность силового оборудования влияют физические воздействия, наиболее важным из которых является шум, который негативно воздействует на персонал станций и является основной причиной ошибок при принятии решений [1]. Следовательно, повышение энергетической безопасности оборудования связано с уменьшением шума от него. Обсуждаются новые решения для повышения безопасности энергетического оборудования

снижением шума для разных типов электростанций путем использования одновременно нескольких мероприятий.

Рассматривается три типа станций: ТЭС с паротурбинным оборудованием, с ГТУ и с ПГУ.

Для решения этой задачи выполнены математические модели указанных электростанций. Каждый тип электростанций имеет свое оборудование, шумовые характеристики которого отличаются от оборудования для другого типа электростанции.

Математические модели электростанций позволяют рассчитывать уровни шума от комбинаций различных типов оборудования в зависимости от типа станций и ее мощности. Математического моделирования станций позволяет учитывать количество источников, их расположение на площадке, режим работы оборудования, ориентацию силового оборудования, рельеф местности и другие факторы. Проведено сравнение уровней шума от ТЭС с паротурбинным оборудованием различных параметров, с ГТУ и с ПГУ на различных расстояниях при аналогичных мощностях. Показано, что уровни шума от ТЭС с паротурбинным оборудованием с докритическими параметрами существенно меньше в окружающем районе, чем от ТЭС с паротурбинным оборудованием на сверхкритическое давление (СКД). Показано, что уровни шума в окружающей районе от оборудования ТЭС с ПГУ будут меньше, чем при работе ТЭС на паровом оборудовании аналогичной мощности. Проведено сравнение уровней шума в окружающем районе при работе ГТУ в сравнение с паротурбинными ТЭС и ТЭС с ПГУ.

Показано, что выполнение расчетов уровней шума в 3D моделях позволяет определить изменение уровней шума по высоте над уровнем земли. Причём разница в значениях уровней шума от ТЭС в расчетных точках между первым и верхним этажом здания составляет 3-6 дБ. Это особенно важно при принятии решений по шумоглушению оборудования ТЭС, рядом с которой находятся высотные здания.

Показано, как климатические региональные факторы влияют на выбор мер по снижению шума от различного оборудования [2]. Это связано не только с выбором материалов для устройств шумоглушения, но и с необходимым снижением шума от источника.

Проведенные акустические расчеты определили основные группы источников шума от каждого типа станций, а также величины требуемых снижений уровней шума от них. Снижение шума от каждого типа ТЭС является комплексной задачей [3], которое может быть достигнуто принятием одновременно нескольких мероприятий. Рассматриваются новые подходы за счет использования одновременно нескольких мероприятий с наименьшими затратами для достижения необходимого снижения уровня шума. На примере газораспределительной станции

(ГРС) и газопроводов после нее показаны новые возможные комплексные решения для уменьшения шума путем использования акустических экранов и нанесением звукоизоляции на канал.

Список литературы

1. Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду/ В.Б.Тупов.— М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 284 с.
2. Тупов В.Б., Тараторин А.А., Скворцов В. С. Влияние региональных климатических факторов на снижение уровня шума от энергетического оборудования//Теплоэнергетика, №11, 2018, С.72-77
- 3.Тупов В.Б. Комплекс мероприятий по снижению шума от ТЭС// Электрические станции. 2013.№3. С.26-31

Тягунов М.Г.¹, Султанов М.М.², Байдакова Н.В.², Скопова Е.М.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Волжский, 404110, проспект Ленина, 69

baydakovanv@mail.ru

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ГЕНЕРИРУЮЩИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА БАЗЕ КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ

Задача обеспечения промышленной безопасности в условиях продолжающегося физического и морального износа оборудования предприятий российского тепло-энергетического комплекса (ТЭК) обуславливает повышение роли методов и средств диагностики.

Существующие методы оценки технического состояния оборудования сосредоточены на изучении отдельных элементов технической системы. Внедрение информационных технологий при системном подходе способно решить основные проблемы ТЭК, связанные с низкой эффективностью предприятий и изношенностью сетей и оборудования, а также помочь энергетикам создать инновационные продукты для дальнейшего развития всей отрасли. Цифровизация позволит обеспечить безопасность производства, оптимизировать процессы и сократить издержки, связанные с плохим состоянием сетей и оборудования.

Одним из эффективных направлений является внедрение цифровых двойников – моделей взаимосвязанных элементов систем теплоснабжения, учитывающих режимы работы источников тепла, конфигурацию теплосетей и графики тепловой нагрузки потребителей.

Это позволяет эффективно и в режиме реального времени локализовать очаги потерь тепла даже при частичном внедрении счетчиков энергии.

Аварии на предприятиях обусловлены нарушением регламентов и инструкций по проведению ремонтных работ, а также морально и физически устаревшим оборудованием объектов ТЭК. Это требует совершенствования методов оценки технического состояния, а также системы обслуживания и ремонта. Существующая система планово-предупредительного ремонта (ППР) имеет ряд недостатков. Переход от регламентированных по времени профилактических и ремонтно-восстановительных работ к обслуживанию оборудования по фактическому техническому состоянию (РТС) позволит повысить ресурс и надежность оборудования, сократить затраты на ремонт и простои. Зачастую остаточный ресурс выведенного в ремонт оборудования оказывается значительным. Авторами разработан метод оценки уровня надёжности, который позволит изменить структуру ремонтной деятельности с ППР на РТС. Предлагается внедрение расчета параметра точечной оценки наработки на отказ оборудования, выражаемой формулой:

$$\hat{t}_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{t_i}},$$

где t_i - суммарное время работы i -го элемента оборудования в процессе испытаний или эксплуатации; m_i - число счетных отказов и неисправностей, зафиксированных в процессе испытаний или эксплуатации i -го элемента оборудования; n - число элементов оборудования.

На базе предложенного Метода авторами разработан программно-расчетный комплекс, показавший эффективность перестройки ремонтной деятельности объектов ТЭК на РТС, достоверные и применимые зависимости, необходимые для внедрения в производственную деятельность.

Список литературы

1. **А. Заутер** Как новые технологии превратят энергетические предприятия в ИТ-компании // Control Engineering Россия декабрь 2018
2. **С. Румянцева** Цифровизация энергетики: от «интеллектуальных» турбин до «умных» сетей // Газета "Энергетика и промышленность России". 2018. № 11-12 с.343-344.
3. **Узакова Л. П., Каландаров Н. О.** Современные методы и средства технического диагностирования // Молодой ученый. – 2014. – №9. – С. 216-218.

Устинов А.С., Кузнецов В.Е., Питухин Е.А.
Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ),
Петрозаводск, 185910, Ленина, 33
anton-ustinov@psu.karelia.ru

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ НА ПРИМЕРЕ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ ПСГ-2300-2-8-І ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ТЭЦ

Рассматривается тепловой расчет передачи теплоты от пара к сетевой воде на примере подогревателей сетевой воды горизонтальных ПСГ-2300-2-8-І, установленных на Петрозаводской ТЭЦ. Повышение эффективности теплообмена основано на переходе от плёночной конденсации пара к капельной посредством придания гидрофобных свойств поверхности трубок теплообменника. Достигается данный результат путем технологии «гравировки» поверхности трубок методом обработки металла мощным лазерным излучением высокой частоты с помощью фемтосекундного лазера [1]. Посредством данной технологии в местах локального нагрева достигается высокая температура, что приводит к полной абляции вещества и его испарению. Между тем, такое термическое воздействие должно приводить к большим остаточным тепловым напряжениям в металле, но благодаря использованию импульсов фемтосекундной частоты, такие напряжения минимизированы.

Средний коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации горячего пара на внешней поверхности горизонтальных трубок трубного пучка определяется [2]:

$$\alpha_1 = 2,77 \cdot 10^5 \cdot (10 \cdot p_s)^{0,151} \cdot (\overline{\Delta t})^{-0,57}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (1)$$

Здесь p_s , МПа — давление насыщения конденсата; $\overline{\Delta t}$, °С — температурный напор теплоносителей.

Коэффициент теплоотдачи к сетевой воде от внутренней стенки трубок трубного пучка рассчитывается [2]:

$$\alpha_2 = \frac{1600 \cdot r_{жс} \cdot \mu_{жс}}{4 \cdot \Delta t \cdot l}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (2)$$

Здесь $r_{жс}$, кДж/кг — теплота парообразования; $\mu_{жс}$, Па·с — динамическая вязкость жидкости; l м — длина трубок трубного пучка сетевого подогревателя.

Использование гидрофобных поверхностей труб трубного пучка обеспечивает большую эффективность теплообмена за счет увеличения коэффициента теплопередачи до K , Вт/(м²·К) для подогревателя сетевого горизонтального ПСГ-2300-2-8-І. Расчеты показывают [3], что при заданной максимальной мощности для подогревателя сетевого горизонтального ПСГ-2300-2-8-І, которая составляет 203,5 МВт, расчетная площадь поверхности нагрева при использовании гидрофобной

поверхности трубок трубного пучка, при которой существует капельная конденсация, составляет 1212,2 м², что 1,89 раза меньше, чем основной рабочий параметр, характеризующий подогреватель, а именно поверхность теплообмена при капельной конденсации, которая составляет 2300 м² по наружному диаметру труб. Экономия по теплопроизводительности для нагрева одного и того же количества воды при новом способе теплообмена, т.е. при капельной конденсации, составит 96,2 МВт, что позволит сократить отбор пара с турбины на 159,7 т/ч, который направляется на подогрев сетевой воды для теплофикации потребителей путем централизованного теплоснабжения. Появляется возможность создавать менее металлоёмкие теплообменные аппараты, нести прежнюю тепловую нагрузку, сжигая меньшее количество топлива на уже существующих аппаратах, или повысить их производительность.

Список литературы

1. Vorobyev A. Y. and Chunlei Guo Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses // Journal of Applied Physics. Vol. 117, 033103 (2015).
2. Аметистов Е. В., Григорьев В. А., Емцев Б. Т. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник. — М.: Энергоиздат, 1983, — 512 с.
3. Устинов А.С., Кузнецов В.Е., Питухин Е.А. Применение гидрофобных трубок трубного пучка подогревателя сетевой воды ПСГ–2300–2–8–I на примере Петрозаводской ТЭЦ ТГК–1. // Вестник Международной академии холода. 2020. № 1. С.40—45.

Федотова Е.В., Козлова Ю.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
e.v.kasilova@gmail.com

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРАТЕГИЙ ИНТЕГРАЦИИ ВИЭ В РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ГЕРМАНИИ И РОССИИ

Изменение глобального энергетического баланса и структурные сдвиги в энергетических системах, которые происходят по всему миру на протяжении последних двадцати лет, позволяют утверждать, что «энергетический переход» (energy transition) из теоретической концепции стал реальностью. Для России эти изменения означают неизбежную стагнацию спроса на главную статью российского экспорта – углеводородное сырье – уже через следующие двадцать лет [1]. В этих условиях освоение технологий возобновляемой энергетики и внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в российские

энергосистемы становится необходимым условием энергетической безопасности и экономического развития.

Последние десятилетия для российской электроэнергетики также ознаменовались началом нового этапа развития ВИЭ. Использование новых технологий и нового типа оборудования в составе существующих электроэнергетических систем России требует решения большого круга задач: начиная с вопросов технологической и инфраструктурной интеграции и заканчивая нормативно-правовой и рыночной

поддержкой. На протяжении следующих нескольких лет в России планируется многократное увеличение установленной мощности ВИЭ [2]. К 2024 г. суммарная мощность ветровых, солнечных и малых

гидроэлектростанций должна составить более 5 ГВт. Из-за очевидных резких отличий характера генерации ВИЭ и традиционных тепловых (ТЭС), атомных (АЭС) и крупных гидроэлектростанций, составляющих основу российской энергетики, можно ожидать возникновения принципиально новых проблем при увеличении доли ВИЭ в региональных энергосистемах. Представление об этих проблемах и возможных путях их решения целесообразно искать в накопленном международном опыте. Для нашего анализа мы выбрали Германию, где вплоть до начала 2000-х гг. угольные ТЭС и АЭС были основой национальной энергосистемы, обеспечивая около 80% выработки электроэнергии [3].

Был выполнен обзор нормативных документов и существующих практик регулирования энергетического рынка и энергетических систем в Германии и России. Проведен анализ механизмов, на сегодняшний день позволяющих обеспечить стабильную работу региональных энергетических систем

Германии для высоких значений доли ВИЭ в электрической генерации – вплоть до рекордного значения 74.5%, достигнутого 1 февраля 2020 г., когда в северных областях Германии сложились особо благоприятные условия для работы ветрогенераторов [4]. Показано, что основные различия в практике развития и регулирования энергосистем Германии и России связаны с финансово-правовыми условиями работы магистральных и распределительных электрических сетей, использованием специальных мер по повышению маневренности ТЭС и АЭС, а также с различным целеполаганием при управлении потоками энергии в энергетических системах. Выполнен анализ финансово-экономических показателей, позволивший оценить стоимость мер по интеграции ВИЭ в немецкую энергетику для домохозяйств и промышленных потребителей.

На основе выполненной аналитической работы были сформулированы основные концепции, которыми определяется успех интеграции ВИЭ в энергосистемы, изначально основанные на традиционных

технологиях генерации (в первую очередь ТЭС и АСЭ). Этот результат будет использован при моделировании современной трансформации региональных энергетических систем.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10255).

Список литературы

1. Перспективы экспорта энергоресурсов из России: Социокультурные, экологические и технологические аспекты / В.В. Клименко, А.Г. Терешин, О.В. Микушина и др.; Под ред. В.В. Клименко. М.: ИД Энергия, 2017. 160 с.
2. Распоряжение от 28 июля 2015 года №1472-р О стимулировании производства электроэнергии с использованием возобновляемых источников
3. Umweltbundesamt на основе базы данных Basis AG Energiebilanzen, декабрь 2018. Режим доступа: <https://www.umweltbundesamt.de> (5.02.2020; немецкий)
4. Martin Jendrischik Übertragungsnetzbetreiber sichern Netzstabilität trotz Winter-Rekord-Phase für erneuerbare Stromerzeugung // Clean Thiking 3. Februar 2020 (немецкий)

Филимонова О.Н., Викулин А.С., Енютина М.В.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
394063, Воронеж, Старых Большевиков, 54А
olga270757@rambler.ru

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВХОДНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НА ИЗОТЕРМИЧЕСКУЮ АДСОРБЦИОННУЮ ОЧИСТКУ ГАЗА ОТ МОНОПРИМЕСИ НЕПОДВИЖНЫМ СЛОЕМ АДСОРБЕНТА

Известно влияние термодинамических факторов на сепарацию примесей атмосферного воздуха в блоке комплексной очистки газодобывающих станций [1], однако кинетика процесса пока полностью не идентифицирована при изменении во времени входной концентрации выделяемых составляющих [2].

В основу анализа положена модель [3]:

$$-\frac{u\partial c(z,\tau)}{\partial z} - \frac{\partial a(z,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\varepsilon\partial c(z,\tau)}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial a(z,\tau)}{\partial \tau} = \beta[c(z,\tau) - c^*(z,\tau)]; \quad (2)$$

$$a(z,\tau) = Hc^*(z,\tau), \quad (3)$$

с замыкающими условиями

$$c(z,0) = a(z,0) = 0; \quad (4)$$

$$c(0, \tau) = c_0[1 + k\sin(\omega\tau)]; \quad a(0, \tau) = Hc_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta\tau}{H}\right)\right], \quad (5)$$

где z – аксиальная декартова координата, м; τ – время, с; u – средняя по сечению адсорбера скорость газа, м/с; ε – пористость; c, a – концентрации примеси в газе и адсорбенте, кг/м³; β – кинетический коэффициент массоотдачи, с⁻¹; c^* – равновесная концентрация примеси в газе, кг/м³; $H=a_0/c_0$ – константа Генри [4]; c_0 – среднестатистическая концентрация примеси в газе на входе в адсорбер, кг/м³; a_0 – ёмкость адсорбента по примеси, кг/м³; ω – частота колебаний, с⁻¹; k – амплитуда; причём вид граничного условия для $a(0, \tau)$ получен из рассмотрения кинетики заполнения лобового слоя адсорбента.

С помощью относительных переменных $Z=z/h, \theta = \tau u/h, C(Z, \theta)=c(z, \tau)/c_0, A(Z, \theta)=a(z, \tau)/a_0, Pe=\beta h/u; W=\omega h/u$ система (1)–(5) приведена к безразмерному виду:

$$-\frac{\partial C(Z, \theta)}{\partial Z} - \frac{H \partial A(Z, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\varepsilon \partial C(Z, \theta)}{\partial \theta}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial A(Z, \theta)}{\partial \theta} = (Pe/H)[C(Z, \theta) - A(Z, \theta)]; \quad (7)$$

$$C(Z, 0) = A(Z, 0) = 0; \quad (8)$$

$$C(0, \theta) = 1 - k\sin(W\theta); \quad A(0, \theta) = 1 - \exp\left(-\frac{Pe\theta}{H}\right), \quad (9)$$

Пусть функциональная зависимость для кинетики заполнения гранул адсорбента от θ близка к однородной функции Хэвисайда (физически это означает, что лимитирующая стадия массопередачи – диффузия примеси в гранулах), а это означает, что $A(Z, 0) = C(Z, 0)$ и система (6)–(9) трансформируется в систему

$$-\frac{\partial C(Z, \theta)}{\partial Z} = (H + \varepsilon) \frac{\partial C(Z, \theta)}{\partial \theta}; \quad (10)$$

$$C(Z, 0) = 0; \quad C(0, \theta) = 1 + k\sin(W\theta). \quad (11)$$

Решение (10), (11), полученное аналитически применением одностороннего интегрального преобразования Лапласа, позволило оценить степень снижения эффективности очистки от примеси.

Список литературы

1. Казьмин И.А., Иванов А.В., Воробьев А.А. Оценка влияния температуры окружающего воздуха на производительность мобильной газодобывающей станции // ВКС.ТиП. 2018. № 8. С. 119—126.
2. Криогенные системы. Основы проектирования аппаратов, установок и систем / А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др.; Под ред. А.М. Архарова. М.: Машиностроение, 1999. Т. 2. 720 с.
3. Tien C. Adsorption calculations and modeling. NY: Elsevier Science, 2013. 200 p.
4. Ягодковский В.Д. Адсорбция. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2015. 219 с.

*Филиппов Г.А.¹, Пикина Г.А.¹, Аракелян Э.К.¹, Пащенко Ф.Ф.²,
Мезин С.В.¹.*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

² Институт проблем управления РАН,
117697, Москва, ул. Профсоюзная, 65
ArakelianEK@mpei.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТУПЕНИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ В МАЛОРАСХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Малопаровые режимы, в частности, беспаровой и моторный режимы ступени паровой турбины, являются глубоко нерасчетными и имеют свои особенности гидродинамических и тепловых процессов. В ранее проведенных исследованиях для упрощения математической модели на начальном этапе исследований были приняты некоторые допущения, влияние которых остались вне рамок проведенных исследований. В частности, не учитывался теплообмен протекающего через ступень пара со внешней средой, не были учтены изменение параметров пара перед ступенью вследствие подачи охлаждающего пара, не в полной мере учитывались конструктивные особенности исследуемой паровой турбины и т.д.

Как известно, основным назначением моторного режима (МР) является удержание турбины в горячем резерве без выработки электроэнергии в сеть. При этом в условно названном «беспаровом» МР ступени паровой турбины работают на паре, проникающих в проточную часть от передних и концевых уплотнений. так как проточная часть находится под разрежением

Отмеченная специфика назначения и условий работы турбины в малопаровых режимах накладывает дополнительные требования к математической модели. В разрабатываемой модели должны быть учтены: подача внешней мощности вращения ротора от генератора; выделение тепла от трения между паром и вращающимися частями ротора; расход энергии на компенсацию вентиляционных потерь; наличие расходов пара через внешние уплотнения цилиндров турбины; наличие протечек пара через уплотнения направляющих аппаратов ступеней; наличие утечек пара в междисковое пространство; наличие потерь тепла в окружающую среду через изоляцию статора; возникновение перепада давления по радиусу проточной части, приводящий к отрыву потока; подсос влаги или паро-водяной смеси из конденсатора турбины в корневую зону последней ступени ЦНД. Входящие в объект физические среды: пар проточной части и в пространство между дисками; протечка пара через уплотнение ротор – направляющий аппарат; металл вращающихся деиалей; металл статора и выхлопных патрубков. Исходя из названных сред, определяем объем дифференциальной части уравнений модели каждой ступени: по три дифференциальных уравнения для двух паровых потоков: законов сохранения вещества, энергии и импульса силы, двух уравнений теплопроводности для металла дисков и статора и одного уравнения теплопередачи от пара к наружному воздуху через изолированный корпус турбины. Для упрощения математической модели она декомпозирована на две части: модели гидродинамических и тепловых процессов без учета внешних потерь тепла и модель потерь тепла через внешнюю поверхность корпусных деталей.

Исследование выполняется с поддержкой РФФ, грант № 19-19-00601.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА НА РАБОТУ ГАЗОТУРБИННОГО ЦИКЛА В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ НА ИСКУССТВЕННЫХ ГАЗАХ

В настоящее время перед разработчиками перспективных энергоустановок на ископаемом твердом топливе стоит две глобальные задачи:

- 1) повышение экономичности и экологичности сжигания твердых топлив до уровня перспективных показателей при работе на природном газе;
- 2) решение проблемы эмиссии антропогенного техногенного CO_2 .

Перспективным направлением поиска решения этих задач наряду с развитием высокоэффективных пылеугольных энергоблоков на суперсверхкритических параметрах (ССКП) является разработка парогазовых установок (ПГУ) на искусственных газовых топливах. К искусственным газовым топливам относят синтез-газы, полученные путём термохимической конверсии твердых топлив в узле внутрицикловой газификации ПГУ-ВЦГ, и побочные продукты металлургической,

химической и нефтяной промышленности, сжигаемые с воздухом в стандартных газовых турбинах по открытому циклу, а также новые топливные газы (H_2 или CO), получаемые из природных и синтез-газов и сжигаемые с кислородом в новых турбоустановках по полукрытому циклу. Изменение теплофизических параметров рабочего тела, соответствующее разным составам газов и схемам их сжигания, радикальным образом изменяет энергетические показатели газотурбинного цикла и энергоустановки в целом.

Разнообразие составов рабочих тел турбинной установки укрупненно можно разбить на четыре группы (типа), выделяемые по технологии получения и/или применения:

– А (от «Air») – состав рабочих тел, получаемых по Air-fuel технологии при сжигании природного и искусственных газов. Применяется в ГТУ

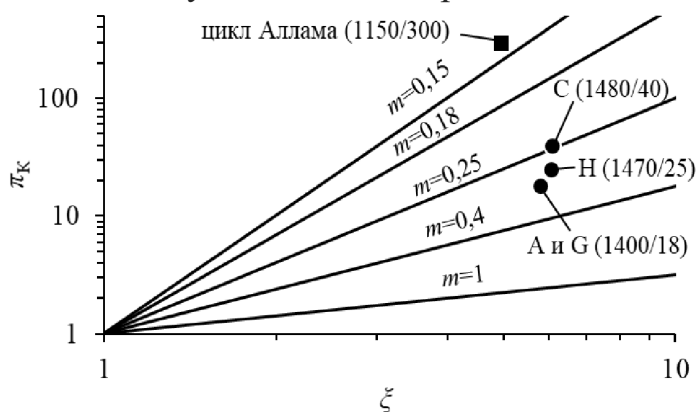


Рис. 1. Соотношение оптимальных (линии) и фактических (точки) степеней сжатия π_k и перегрева ξ для рабочих тел с разными m : $m = (k-1) / k$, k – показатель адиабаты рабочего тела

открытого цикла в составе освоенных и разрабатываемых ПГУ на природном газе, ПГУ-ВЦГ (в т.ч. и с системами CCS) и ПГУ на промышленных газах;

– H (от «Hydrogen») – состав рабочих тел, получаемых по Oxy-fuel технологии при сжигании в среде O_2 - H_2O синтез-газов парокислородной конверсии после отделения углерода (CO_2) по технологии pre-combustion CCS. Планируется применить в разработках ГТУ полузамкнутого цикла в составе ПГУ-ВЦГ с системами CCS;

– C (от «Carbon») – состав рабочих тел, получаемых по Oxy-fuel технологии при сжигании в среде O_2 - CO_2 синтез-газов O_2 - CO_2 конверсии. Планируется применить в перспективных разработках ГТУ полуоткрытого цикла в составе ПГУ-ВЦГ;

– G (от «Gas») – специальные среды (смеси гелия с ксеноном, азотом или аргоном) используемые в ЗГТУ малой мощности с высокотемпературными гелиевыми реакторами (High Temperature Reactor Helium Gas Turbine – HTR-GT).

В работе выявлены расчетным путем оптимальные термодинамические параметры энергетической турбоустановки в зависимости от технологии получения состава рабочего тела в открытом и полуоткрытом цикле.

*Хохлов Д.А., Хохлова Д.А., Зайченко М.Н.,
Стерхов К.В., Плешанов К.А.*

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
khokhlovda@mpei.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ РАБОТЫ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ С ВЫСОКОНАПОРНЫМ КОТЛОМ-УТИЛИЗАТОРОМ

Критически важной проблемой энергетики России является модернизация основного энергетического оборудования на ТЭС. Это направление отражено в программе развития отечественной энергетики и постоянно появляется в решениях профильных комитетов и докладах на конференциях по энергетике. Существующая программа модернизации основного оборудования тепловых электростанций подразумевает модернизацию около 40 ГВт мощности в период до 2030 г.

В решении комитета по энергетике Государственной Думы РФ от 25 мая 2019 г. было указано, что большинство проектов по модернизации подразумевают минимальный объём реконструкции. Основной чертой данных проектов является проведение неглубокого по объёму капитального ремонта и низкочатратное продление паркового ресурса оборудования. Такая модернизация не приведёт к сколько-нибудь

значительному росту в эффективности, надёжности и экологической безопасности работы основного энергетического оборудования.

На электрических станциях России установлено большое количество разнообразного оборудования. Индивидуальный подход к выбору одной из возможных схем модернизации приводит к росту затрат на реализацию. Возможность унификации устанавливаемого оборудования позволила бы уменьшить эти затраты.

Работающие на природном газе станции обладают потенциалом к использованию унифицированных решений. Большие размеры основного генерирующего оборудования, в первую очередь котлов, сжигающих газ, и котлов-утилизаторов за газовыми турбинами, не позволяют в полной мере воспользоваться данным преимуществом.

Требованиям по унификации смогло бы удовлетворить использование высоконапорных парогенераторов в соответствии с предложенной концепцией (рис. 1). Использование такого решения позволило бы сохранить паровую турбину и систему регенерации тепла, а также частично или полностью использовать существующее здание паротурбинного цеха. Следует отметить, что паровые турбины установленные на Российских ТЭС обладают высокой надёжностью и, как показывает практика, их ресурс может продлиться на сроки, сопоставимые с их текущей наработкой после проведения одной из программ модернизации завода-изготовителя.

Использование высоконапорных парогенераторов являлось перспективным направлением развития парогазового цикла в конце 60-х начале 70-х годов. Такой проект был реализован для Невинномысской ГРЭС, где высоконапорный парогенератор производства завода ТКЗ работал с турбиной ГТ-35-770 производства завода Турбоатом в составе блока ПГУ-200. Парогенератор вырабатывал 450 т/ч перегретого пара с давлением 12.8 МПа и температурой 540 °С. Однако ввиду низкой эффективности работы такой схемы от неё отказались. Дальнейшее направление развития ПГУ было связано в первую очередь с повышением параметров работы газовых турбин.

Предлагаемое решение отличается от существовавшего до 2010 г. проекта ПГУ-200 тем, что высоконапорный парогенератор устанавливается в рассечку между газовой турбиной высокого и низкого давлений. Это позволяет, с одной стороны, существенно снизить

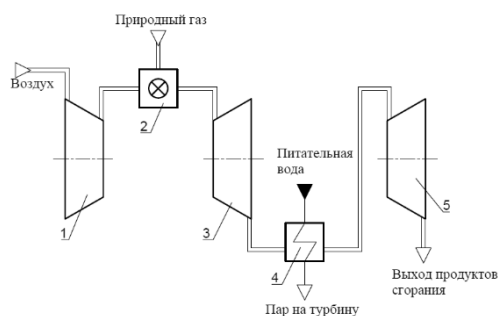


Рис. 1. Предлагаемая схема парогазовой установки с высоконапорным парогенератором. 1 – компрессор, 2 – камера сгорания, 3 – газовая турбина высокого давления, 4 – высоконапорный парогенератор, 5 – газовая турбина

металлоёмкость котла-утилизатора, а с другой стороны – получать относительно высокую эффективность работы газовой турбины. Требуемое количество пара для работы существующих паровых турбин будет обеспечиваться использованием нескольких ячеек, каждый из которых состоит из двухступенчатой газовой турбины и высоконапорного парогенератора.

Предлагаемое решение выглядит перспективно с точки зрения замещения паровых котлов ТЭС, однако возможность его реализации будет напрямую зависеть от оценки возможных затрат на модернизацию и их сопоставление с затратами на модернизацию оборудования по наиболее эффективному в России сценарию – полная замена изношенного оборудования на новое.

Цыпин А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
tsypinav@mpei.ru

МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Долгое время унифицированные выходные сигналы являлись основным средством передачи информации в измерительных системах, но ситуация стала изменяться с развитием вычислительных систем, а также широким распространением цифровых средств измерения. Стало очевидно, что возможности по обработке, хранению и передаче результатов измерений в цифровом виде гораздо шире, чем в аналоговом варианте. В целом начало XXI века можно назвать временем четвертой промышленной революции, которая предполагает внедрение глобальных вычислительных сетей, элементов искусственного интеллекта, интернета вещей. Все это нужно для оптимизации технологических процессов, управления циклом жизни оборудования за счет предиктивных алгоритмов диагностики, а также внедрения методов адаптации оборудования к текущим условиям работы, что особенно важно для теплоэнергетики, характеризующейся распределенной структурой и повышенными требованиями к надежности и устойчивости к отказам.

В настоящее время существует множество методов передачи информации в автоматизированных системах управления тепловыми процессами, в которые, как составные части, входят контрольно-измерительные системы. В зависимости от области применения можно выделить протоколы, которые предпочтительно применять на полевого уровне (уровень первичных преобразователей), промежуточном уровне и верхнем уровне систем.

Так для полевого уровня важны такие характеристики как помехозащищенность, простота монтажа и эксплуатации, надежность, а

также невысока стоимость в силу большого количества приборов. Для верхнего уровня автоматизированной системы важны высокое быстродействие для обработки больших массивов информации, возможность передачи данных на значительные расстояния и развитые интеграционные способности со смежными системами. Средний же уровень должен обеспечивать эффективное взаимодействие между верхним и нижним уровнями. Важно обеспечить безопасность систем на всех уровнях, включая нижний, который часто считают защищенным в силу его физической изолированности и не уделяют должное внимание к потенциальному несанкционированному вмешательству.

В последнее время заметным становится развитие беспроводных самоорганизующихся ячеистых сети, например HAR Wireless или Bluetooth Mesh, которые позволяют организовать сеть без трудоемкого монтажа кабельных соединений и обеспечить высокую надежность функционирования, скорость передачи данных и при этом защищенность от внешнего проникновения. Периферийные устройства в этом случае могут обмениваться информацией, минуя ядро системы, что снижает требования к производительности центрального вычислительного устройства, а ячеистая архитектура обеспечивает надежность передачи данных даже в случае отказа одного из элементов системы.

Современные технологии передачи данных позволяют значительно сократить финансовые, трудовые и прочие затраты при реализации систем управления, повысить их робастность и функциональность.

Вместе с тем на первый план выходят следующие задачи:

- 1) разработка метрологического обеспечения передачи информации в современных системах управления и сохранения точности как данных, получаемых от средств измерений, так и управляющих воздействий;
- 2) стандартизация шлюзов для реализации интегрированных подсистем, построенных с применением различных протоколов передачи данных;
- 3) обеспечение информационной безопасности на всех уровнях передачи информации;
- 4) разработка алгоритмов анализа массивов информации для внедрения систем превентивной диагностики и управления на основе технологий больших данных ("BIG DATA") и нейронных сетей.

Список литературы:

1. **Фетисов В.С.** Протокол информационного обмена HART в измерительных и управляющих системах: учебное пособие для студентов приборостроительных направлений и специальностей высших учебных заведений / В. С. Фетисов. - Уфа: Фотон, 2011. - 87 с.
2. **Большев А.** Атаки на низкоуровневые протоколы АСУ ТП на примере HART. / А. Большев // Газета для корпоративных пользователей информационных технологий и решений "PC Week/RE". - 2014. - №12 (867). - С. 14.

Черных А.А., Арзамасцев А.Г., Шаранов А.И.
Липецкий государственный технический университет,
Липецк, 398055, Московская, 30
antonchernux@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ДИСПЕРСНЫМИ ШАРОВЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Имеющиеся на данный момент методы определения коэффициента теплопроводности композитных материалов не учитывают геометрию дисперсных включений и влияние термического сопротивления на границе «матрица-дисперсное включение» [1]. Указанные факторы оказывают большое влияние на теплофизические свойства композитных материалов [2]. В работе получена аналитическая формула для вычисления коэффициента теплопроводности композита, которая содержит отношение коэффициентов теплопроводности основного материала матрицы и материала наполнителя [1]. При этом модель основывается на изменении термического сопротивления на границе «матрица-дисперсное включение» и использовании осредненных значений параметров.

Решение численным методом дифференциального уравнения теплопроводности для дисперсных композиционных материалов показывает, что приводимая аналитическая зависимость согласуется с результатами математического моделирования при относительно небольших значениях коэффициента теплопроводности и диаметра включения, при этом с ростом этих параметров величина расхождения увеличивается. Сравнение данных других авторов с аналитической зависимостью, полученной в данной работе, с целью уточнения интервалов ее применимости при различных отношениях коэффициента теплопроводности включения и основного материала матрицы также показала хорошее совпадение при относительно небольших значениях коэффициента теплопроводности и диаметра включения наполнителя.

Список литературы

1. **Sharapov A.I., Korshikov V.D., Chernykh A.A., Peshkova A.V.** A method of researching the thermal conductivity coefficient of dispersion composite materials // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2020. Vol. 55, Iss. 1. P. 148-155.
2. **Ngo I., Jeon S., Byon C.** Thermal conductivity of transparent and flexible polymers containing fillers: a literature review // Interactive J. Heat Mass Tran. 2016. Vol. 98. P. 219–226.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ШУМА ПРИ СБРОСЕ ВЛАЖНОГО ПАРА В АТМОСФЕРУ

Направленность излучения звука является одной из важнейших характеристик источника шума, существенно оказывающая влияние на создаваемые уровни шума на прилегающих территориях. Для прогнозирования акустического воздействия источников шума на окружающий район и определения требуемого снижения в расчётную зависимость затухания звука в атмосфере входит Фактор направленности [1].

Одним из наиболее мощных источников шума на различных промышленных предприятиях являются выбросы пара в атмосферу. При выполнении акустических расчетов, зачастую, выброс пара в атмосферу рассматривается как точечный источник шума, основное свойство которого – всенаправленное и равномерное излучение шума. В действительности, выхлоп пара в зависимости от выходного устройства может иметь выраженную направленность излучения шума, которую необходимо учитывать при проектировании глушителей шума для обеспечения повышенной акустической эффективности.

Для исследования направленности излучения шума при выбросе пара в атмосферу авторами была разработана специальная конструкция глушителя шума, имеющая специальное устройство выхлопа в боковом направлении с

применением
рассекателя потока
из стальной сетки
(рис.1). Испытания
глушителя шума для
определения
направленности
излучения звука
проводились на
действующем
энергетическом
предприятии с
натурными
измерениями
уровней шума,

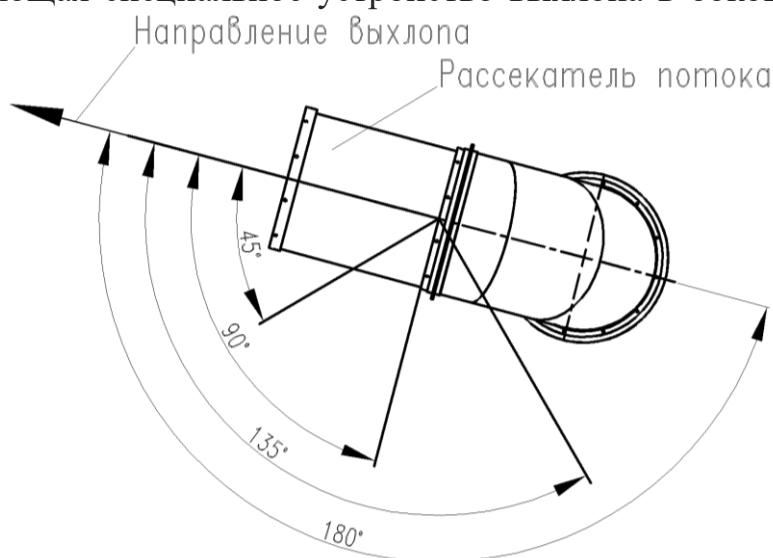


Рисунок 3 – Вид сверху на устройство выхлопа пара в боковом направлении с рассекателем потока из стальной сетки

которые выполнялись в соответствии с нормативными требованиями [2].

Исследование проводилось при расходе сбрасываемого влажного пара – 30 т/ч со следующими параметрами перед сбросной задвижкой: температура – 160 °С, давление (изб.) – 1,2 кгс/см²[3].

Акустические измерения выполнялись для пяти точек, равноудаленных от сбросного устья глушителя шума. Каждая точка измерения выбиралась в соответствии с углом направленности излучения (σ), значения которого составляло от 0 до 180° (рис.1).

По результатам обработки опытных данных было получено, что уровень звука существенно отличается для различных углов направленности излучения. Уменьшение уровня звука (ΔL) в зависимости от угла направленности излучения представлено в таблице 1. Также было установлено, что изменение уровней звукового давления в спектре шума для среднегеометрических частот в зависимости от угла направленности имеет различный характер.

Таблица 1 – Снижение уровня звука при различных углах направленности излучения

$\sigma, ^\circ$	0	45	90	135	180
$\Delta L, \text{дБА}$	0,0	1,5	5,0	8,1	12,0

Список литературы

1. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996) «Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета».

2. ГОСТ 23337-2014 «Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий».

3. Фоменко К.С., Чугунков Д.В., Сейфельмлюкова Г.А. Результаты акустического обследования промышленного предприятия при сбросе влажного пара в атмосферу с анализом основных особенностей генерации шума // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации». – Санкт-Петербург, 19-21 марта 2019 . – С. 365-372.

*Чугунков Д.В., Журавлев Е.А., Сейфельмлюкова Г.А., Фоменко К.С.,
Богданова А.Е.*

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
ChugunkovDV@mpei.ru*

ИСПЫТАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРИГИНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДИССИПАТИВНОГО ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА

Одним из наиболее мощных источников постоянного шума на энергообъектах являются энергетические котлы с тягодутьевыми машинами. Основные пути распространения шума от данных источников – газовые тракты и дымовые трубы. Наиболее опасными источниками шума являются устья дымовых труб, поскольку они являются высотными и воздействуют на большие расстояния. Для снижения шума в газовых трактах котлов в мировой практике получили широкое распространение диссипативные глушители шума пластинчатого типа [1].

Особенно остро стоит проблема негативного шумового воздействия от тепловых электрических станций (ТЭС) на расположенные в непосредственной близости жилые районы. Во многих случаях установка в газовых трактах котлов ТЭС типовых диссипативных пластинчатых глушителей шума, состоящих из пластин с плоскими боковыми стенками [2], не обеспечивает требуемую акустическую эффективность при фиксированной длине пластин и низком аэродинамическом сопротивлении. В связи с этим, актуальным направлением исследований является разработка новых подходов по улучшению акустических характеристик диссипативных глушителей шума.

В публикации [1] приведено описание элемента шумоглушения (кассета НИУ «МЭИ») [3], разработанная авторами, позволяющая значительно увеличить акустическую эффективность диссипативных глушителей шума. Для подтверждения расчётной акустической эффективности глушителя шума оригинальной конструкции, состоящего из кассет НИУ «МЭИ», были проведены натурные стендовые испытания опытного образца глушителя шума в соответствии с [4]. Технические характеристики экспериментальных образцов кассет НИУ «МЭИ»: толщина – 200 мм, звукопоглощающий материал – базальтовое волокно с плотностью 40 кг/м³, на боковых поверхностях кассет выполнены полуцилиндрические вогнутости диаметром 60 мм с шагом 70 мм.

Опытный образец глушителя шума испытывался для нескольких вариантов проходных сечений с расстояниями между пластинами, при которых относительное проходное сечение типового глушителя шума с плоскими боковыми стенками пластин составляет соответственно 67%, 50% и 33%. По результатам натурных испытаний акустическая

эффективность на отдельных среднегеометрических частотах достигала при относительном проходном сечении 67% – до 14 дБ/м, при 50% – до 21 дБ/м, а при 33% – до 23 дБ/м, что значительно выше в сравнении с типовыми аналогами [2], особенно в диапазоне среднегеометрических частот 500-8000 Гц.

Исследование выполнено в рамках программы научных исследований, поддержанной стипендией Президента Российской Федерации СП-1944.2019.1.

Список литературы

1. Zhuravlev E.A., Chugunkov D.V., Seyfelmyukova G.A. Improving the acoustic efficiency of laminated dissipative noise silencers for boiler gas-air paths // E3S Web of Conferences 140, 02005 (2019). P.1–5.
2. Расчет и проектирование глушителей шума энергоустановок/ Ф.Е. Григорян, Е.А. Перцовский. Л.: Энергия, 1980. 120 с.
3. Кассета звукопоглощающая для глушителей шума газо-воздушных трактов: пат. 188694 Рос. Федерация, МПК F01N 1/10/ Д.В. Чугунков, Г.А. Сейфельмлюкова, Е.А. Журавлев К.С. Фоменко, А.Д. Скурихина, А.Е. Богданова, Бюл. № 12 – 6 с.
4. ГОСТ 28100-89. Глушители шума. Методы определения акустических характеристик.

Шапошников В.В., Батько Д.Н., Михалко Я.О.

Кубанский государственный технологический университет
350072, Краснодар, ул. Московская, 2
shaposhnikov.valentin@gmail.com

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГТУ М701F4, РАБОТАЮЩЕЙ В СОСТАВЕ ПГУ-410 КРАСНОДАРСКОЙ ТЭЦ, ПОСЛЕ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА

Введение. В 2021 году в России будут подводиться итоги программы ДПП, по которой было построено значительное количество парогазовых установок. В тоже время подходят сроки капитального ремонта газотурбинных установок в составе ПГУ. В данном докладе предлагается рассмотреть результаты одного из таких ремонтов.

Описание объекта исследования. Краснодарская ТЭЦ является крупнейшим объектом электрогенерации в Кубанском РДУ. Ее установленная электрическая мощность составляет 1 025 МВт. В 2011 году на ней смонтирована парогазовая установка ПГУ-410. Она является трехконтурной бинарной парогазовой установкой, состоящей из газотурбинной установки типа М701F4 производства Mitsubishi Heavy Industries, Ltd (Япония), котла-утилизатора ЭМА-003-КУ (Еп-307/353/41,5-12,6/3,1/0,5-565/560/250) производства ОАО «ЭМАльянс» и паровой турбины типа Т-135/145-12,4 производства ЗАО «Уральский

турбинный завод». В мае 2019 года был произведен капитальный ремонт ГТУ М701F4 с заменой лопаток газовой турбины. При этом в первых двух ступенях была применена новая конструкция лопаток, позволившая сократить расход воздуха на их охлаждение.

Методы исследования. Замеры параметров работы оборудования, необходимых для определения энергетических показателей и построения энергетических характеристик, производились штатными приборами. Исходными данными для разработки энергетических характеристик является набор стабильных режимов работы ГТУ, отобранных за период эксплуатации, продлившийся с июня 2018 г. до момента капитального ремонта (май 2019 г.) и с июня 2019 г. по январь 2020 г. Обработка данных будет производиться согласно ГОСТ Р 52782-2007 (проект ИСО 2314).

Результаты исследования. После обработки режимов будут построены ключевые характеристики до и после капитального ремонта ГТУ:

- 6) зависимость мощности ГТУ от температур наружного воздуха;
- 7) зависимость температуры уходящих газов от температур наружного воздуха при разной нагрузке;
- 8) зависимость КПД ГТУ от температур наружного воздуха при разной нагрузке.

Обсуждение результатов. Будет проведен анализ полученных характеристик и сделаны выводы о влиянии замены двух ступеней газовой турбины на работу ГТУ М701F4.

Шапошников В.В., Михалко Я.О., Батько Д.Н.

Кубанский государственный технологический университет

350072, Краснодар, ул. Московская, 2

shaposhnikov.valentin@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕНИЯ РЕГУЛИРОВОЧНОГО ДИАПАЗОНА КРАСНОДАРСКОЙ ТЭЦ ЗА СЧЕТ ЧАСТИЧНОГО ВЫТЕСНЕНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ОТБОРОВ БЛОКА К-150-130 ПАРОМ ОТ ПРОТИВОДАВЛЕНЧЕСКОЙ ТУРБИНЫ

Описание объекта исследования. Краснодарская ТЭЦ – это классическая городская теплоэлектроцентраль и самый мощный объект электрогенерации в операционной зоне Кубанского РДУ. Ее оборудование в разные годы было очень различно: от маломощных паросиловых установок неблочной компоновки работающих на угле, до одной из самых современных парогазовых установок с электрическим КПД 58 %. Краснодарская ТЭЦ является крупнейшим объектом электрогенерации в Кубанском РДУ. Ее установленная электрическая мощность составляет 1 025 МВт. Однако в условиях энергодефицитной

энергосистемы, которой является Кубанское РДУ (потребление превышает выработку более чем в два раза) есть запрос на расширение регулировочного диапазона, а именно повышение технического максимума ТЭЦ.

Описание применяемого решения.

Одним из ключевых способов прохождения пиковых нагрузок является временное отключение регенеративных отборов на ПВД, как способ прохождения пиковых нагрузок. Его применение давно и хорошо изучено. Учеными Шерстобитовым И.В. и Бирюковым Б.В. были разработаны схемы совместной работы паротурбинных блоков сверх- и докритических параметров, усовершенствование и оценка которого предлагается в докладе.

В данном исследовании предложена схема совместной работы четырех энергоблоков К-150-130 Краснодарской ТЭЦ с дополнительно установленной противодавленческой турбиной для вытеснения регенеративных отборов на подогреватели высокого давления. Для вытеснения пара ПВД 1 и 2 рассматривается применение установки Р-12-8,8/3,1-1 Калужского турбинного завода (номинальные параметры острого пара: 8,8 МПа, 535 °С, его расход 182 т/ч; за турбиной: 3,05 МПа, 399 °С). Выбор пал на нее в связи с близкими параметрами пара противодавленческой турбины и первого отбора, а также возможностью использования для ее работы пара из котла ТП-15 неблочной части. Последнее позволит более рационально эксплуатировать имеющееся оборудование и снизит капитальные затраты на модернизацию. Для исследования выбран конденсационный режим, чтобы использовать обобщенную тепловую схему энергоблоков (отборы на теплофикацию условно не показаны).

Оценка технического эффекта. Произведен расчет эффективности применения схемы совместной работы и отключения ПВД 1, 2. Он показал, что при реализации предлагаемого технического решения увеличение мощности в режиме технического максимума для каждого блока составило 7,8 МВт. Суммарный же прирост по электростанции равен 43,6 МВт. Применение схемы совместной работы позволяет повысить технический максимум электростанции при более высокой энергетической эффективности: удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии на 4 г у.т./кВт*ч ниже, чем при отключении ПВД 1, 2..

Оценка экономического эффекта. Проведена оценка экономического эффекта применяемого решения для условий Краснодарской ТЭЦ. Она выполнена по РД 53-34.1-09.321-2002. Методика экспресс-оценки экономической эффективности энергосберегающих мероприятий на ТЭС. В результате расчета годовой прирост чистой прибыли составил 33,7 млн. руб., а срок окупаемости инвестиций – 4,7 года.

Шарапов В.И., Ротов П.В., Гафуров Р.А.

Ульяновский государственный технический университет,

Ульяновск, 432027, ул.Северный Венец, 32

gafurus@mail.ru

АНАЛИЗ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ПОДПИТОЧНОЙ ВОДЫ ТЕПЛОСЕТИ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОДОПОДГОТОВКИ

Надежность и экономичность работы систем централизованного теплоснабжения городов и промышленных объектов в значительной мере определяется эффективностью противокоррозионной подготовки воды для энергетического оборудования. Удаление из воды растворенных газов является важной составной частью технологических процессов подготовки добавочной питательной воды паровых котлов и подпиточной воды систем теплоснабжения.

В статье рассмотрены различные схемы подогрева подпиточной воды, их достоинства и недостатки. В основном недостатками существующих схем подогрева подпиточной воды является неэффективное использование в качестве греющего агента пара производственного отбора турбин, что влечет за собой дополнительные потери на тепловом потреблении, а также нестабильный нагрев исходной воды перед деаэратором. Повышение энергетической эффективности вакуумной деаэрации может быть осуществлено с помощью совершенствования способов регулирования процесса деаэрации или схем включения вакуумных деаэраторов в теплофикационные турбоустановки.

Предложены варианты включения вакуумных деаэрационных установок в тепловые схемы ТЭЦ, обеспечивающие работу теплофикационных турбин с пониженной температурой подпиточной воды и стабильным нагревом исходной воды для нужды водоподготовки. Предложенные варианты отличаются друг от друга тепловой схемой и способом регулирования, но результат один - стабильный нагрев исходной воды перед деаэратором. Выполнена оценка энергетической эффективности новых схем на основе фактических параметров процесса водоподготовки при разных режимах работы тепловой электрической станции. Сделан анализ полученных расчетных данных оценки энергетической эффективности методом удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении за счет отборов пара на подогрев теплоносителей в тепловой схеме водоподготовки. Разработаны решения, позволяющие обеспечить стабильную работу вакуумных деаэраторов при разных режимах работы ТЭЦ наряду с максимальной экономичностью работы теплофикационных турбоустановок.

Экономичность новых технологий оценивается по величине годовой экономии условного топлива при переходе от традиционной

схемы подогрева исходной воды перед деаэратором паром производственного отбора турбин к новым схемам нагрева исходной воды.

Список литературы

1. **Шарапов В.И., Мингараева Е.В., Гафуров Р.А.** Повышение энергетической эффективности обработки подпиточной воды теплосети // СОК. 2018 № 10. С. 52-55.

Шацких Ю.В., Геллер Ю.А

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И РЕЖИМА РАБОТЫ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Регенеративные теплообменники давно и успешно внедрены в различных областях промышленного производства. Весьма перспективно их использование в системах утилизации низкопотенциальной теплоты.

Как к любым теплообменникам к регенеративным аппаратам предъявляется требование максимальной тепловой эффективности при минимальном гидравлическом сопротивлении. Основное направление исследований, касающихся регенеративных теплообменников, связано с интенсификацией теплообмена и разработкой новых типов насадки с повышенной удельной поверхностью теплообмена. Однако особенностью регенеративных теплообменников является то, что эффективность их работы во многом определяется не только конструкцией насадки, но и режимными параметрами периодов нагрева и охлаждения. Иными словами, при неверно подобранном режиме работы даже эффективная насадка не обеспечит максимальный коэффициент регенерации [1].

Очевидно, что при рассмотрении регенеративных теплообменников необходимо учитывать взаимное влияние конструктивных характеристик насадки и режимных параметров работы аппарата на интенсивность теплообмена. Ранее комплексный подход к анализу процесса регенерации теплоты был применен при оптимизации конструкции и режима работы доменных воздухонагревателей[2]. Перспективным является проведение подобных исследований для регенеративных вращающихся воздухоподогревателей котельных агрегатов, регенераторов систем утилизации низкопотенциальной теплоты.

В докладе приведены результаты расчетного исследования взаимосвязи конструктивных характеристик и режима работы регенеративных теплообменников. Проведенные расчеты показали, в каком диапазоне имеет смысл повышать коэффициент теплоотдачи насадки при установленном диапазоне изменения расходов теплоносителей и времени

периодов нагрева и охлаждения. Также авторами сформулировано направление оптимизации режима работы регенеративных теплообменников.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-08-01078).

Список литературы

1. Шацких Ю.В., Шарапов А.И. Исследование работы регенеративного воздухоподогревателя // Труды седьмой российской национальной конференции по теплообмену в 3х томах. 2018. С. 432-434.

2. Губарев В.Я., Шацких Ю.В. Исследование работы регенеративных теплообменных аппаратов // В сборнике: Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. 2014. С. 1041-1043.

Шацких Ю.В., Геллер Ю.А., Королева А.П.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

shatskih_jv@mail.ru

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

В настоящее время в системах утилизации низкопотенциальной теплоты находят все большее распространение регенеративные теплообменные аппараты.

Рациональная работа регенеративных теплообменных аппаратов зависит от многих факторов, взаимное влияние которых не всегда четко просматривается. Большинство исследований в этой области направлены на интенсификацию теплообмена в регенераторах. С другой стороны, эффективность работы именно регенеративных теплообменников определяется также и режимными параметрами: соотношение расходов теплоносителей, выбор продолжительности периодов нагрева и охлаждения. Таким образом, при высоких теплотехнических характеристиках насадки не всегда удастся обеспечить максимальных коэффициент регенерации.

На данный момент нет единой методики конструирования регенеративных теплообменных аппаратов, учитывающей влияние как характеристик насадки, так и режимных параметров работы. Для каждого типа регенеративных теплообменников многочисленными исследователями разработана собственная расчетная модель, которую невозможно применить для других типов регенеративных теплообменников ввиду значительного отличия конструкции аппаратов, теплофизических свойства насадки и теплоносителей, режимов работы.

Авторами доклада предложены критерии оптимизации регенеративных теплообменных аппаратов с учетом взаимного влияния теплотехнических, конструктивных и режимных параметров их работы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-08-01078).

Шевырёв С.А.

Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева,
Кемерово, 650000, Весенняя, 28
ssa.pmahp@kuzstu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ASPEN PLUS ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРОВОЙ БЕСКИСЛОРОДНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Одним из перспективных способов глубокой переработки угля и биомассы является процесс паровой бескислородной газификации [1]. Он позволяет в идеальных условиях [2] получить максимальное количество водорода и СО, которые являются основными компонентами для осуществления синтеза различной химической продукции.

Для реализации паровой бескислородной газификации требуется значительное количество перегретого водяного пара с достаточно высокой температурой около 900°C и давлением менее 30 бар. Такие условия являются необходимыми для получения достаточно высокого качества синтез-газа (с большим содержанием СО и Н₂), который впоследствии может быть применен для синтеза-химических веществ, например по методу Фишера-Тропша.

Обеспечить требуемые характеристики давления, температуры и расхода можно на тепловых электрических станциях при совместной работе котельного агрегата и паровой турбины при осуществлении дополнительного перегрева пара в топке котла. В этом случае важно оценивать изменение характеристик работы турбины и котельного агрегата при варьировании параметров перегретого пара, направляемого на паровую бескислородную газификацию, а также изменение основных характеристик тепловой электрической станции в целом.

Оценку таких изменений можно произвести при использовании различного рода пакетов прикладных программ. Среди таких программ можно выделить Aspen Plus [3], которая достаточно часто стала применяться в последнее время. Она используется в основном для моделирования химико-технологических систем, однако может быть применена и для моделирования энергетических процессов при горении разнообразного топлива и моделировании процесса тепломассообмена для различных аппаратов и устройств.

При использовании программы Aspen Plus было осуществлено моделирование процесса горения биомассы в виде буковых опилок в паровом котле с производством перегретого водяного пара для турбины, а также их газификацию в отдельном газогенераторе при использовании перегретого водяного пара. Результаты моделирования показывают, что при реализации паровой бескислородной газификации удается достичь высокой энергетической эффективности выработки тепловой и электрической энергии при осуществлении паровой бескислородной газификации и без использования сверхкритических параметров перегретого водяного пара.

Список литературы

1. Bogomolov A.R., Shevyrev S.A., Alekseev M. V. Prospects for high-temperature gasification of coal and sludge // Therm. Eng. (English Transl. Teploenerg. 2013. Vol. 60, № 2. P. 153–156.
2. Shevyrev S., Bogomolov A., Alekssev M. Prospects for production of synthetic liquid fuel from low-grade coal // EPJ Web of Conferences. 2015. Vol. 82.
3. Dattatray A.D., Shilapuram V. Detailed parametric investigation of dry gasification oxy-combustion power cycle using ASPEN Plus simulations // Fuel. Elsevier Ltd, 2019. Vol. 236. P. 501–515.

Щербатов И.А.¹, Цуриков Г.Н.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ

Организация ремонтных работ энергетического оборудования по его фактическому состоянию является актуальной задачей для современной энергетики. При планировании ремонтов энергетического оборудования, в рамках данного подхода, требуется оценка технического состояния самого оборудования [1]. Кроме того, актуальной задачей является прогнозирование технического состояния энергетического оборудования. Построение точного предсказания о возможном дефекте энергетического оборудования или возможном его переходе в неработоспособное состояние позволит осуществить своевременную реакцию и запланировать мероприятия и ресурсы (финансовые, людские, материальные) для приведения данного оборудования в исправное техническое состояние, соответствующее нормам, или своевременно осуществить его восстановление [2].

Системы предиктивной аналитики позволяют заранее планировать и своевременно проводить мероприятия для обеспечения работоспособного и исправного состояния энергетического оборудования. Данные системы

работают с большими данными (Big Data) и обеспечивают получение прогноза на основе алгоритмов машинного обучения.

Для решения указанных задач проведено исследование при поддержке Фонда содействия инновациям по договору № 313ГУЦЭС8-D3/56383 от 2020 г. В рамках исследования рассмотрено применение алгоритмов машинного обучения: логистической регрессии, случайных лесов (Random Forest), градиентного бустинга (XGBoost), ансамблей данных алгоритмов - для прогнозирования дефектов ("засорение дренажных канавок") системы регулирования турбины гидроэлектростанции.

В работе использованы данные о параметрах состояния энергетического оборудования и технологического процесса рассматриваемой системы регулирования и дефектах при данных параметрах состояния, накопленные гидроэлектростанцией за промежуток времени с 10 июля 2017-го по 17 августа 2017 года и представленные в виде набора аналоговых и дискретных сигналов, поступающих в систему с различной частотой опроса. Техническое состояние рассматриваемой системы в каждый момент времени было поставлено в соответствие двум классам: "1" - обнаружен дефект, "0" - дефект отсутствует. Таким образом, для предсказания наступления возможного дефекта - необходимо было спрогнозировать вероятность принадлежности данного технического состояния классу "1". В качестве целевой функции, минимальное значение которой на обучающей выборке должно было соответствовать оптимальному алгоритму машинного обучения, была выбрана функция логистических потерь (cross-entropy). Сравнение работы алгоритмов на тестовой выборке производилось по метрикам log loss, precision и recall. При этом необходимо было обеспечить максимальное значение метрики recall - с целью не допустить ложных предсказаний алгоритма о возможном дефекте, также желательно было получить и наибольшее возможное значение метрики precision - для получения максимальной точности алгоритма. Кроме того, после получения оптимальной ML модели осуществлялся поиск наиболее оптимального (с точки зрения максимизации указанных метрик) порога классификации.

Наилучшее качество, как на обучающей, так и на тестовой выборке было получено при использовании ансамблей алгоритмов логистической регрессии и случайных лесов. Количество ошибок FN (ложный пропуск") на тестовой при использовании данного ансамбля составило 0, количество ошибок FP ("ложное срабатывание") составило при этом 1, что обеспечило значение recall, равное 1.0 и значение precision - 0.9999 при значении оптимального порога классификации - 0.2.

Список литературы

1. **Jashura A. I.** 2006 Power Equipment Maintenance and Repair System (Moscow: National Center ENAS) 504 p.
2. **Arakelian E. K., Pashchenko A. F., Shcherbatov I. A., Tsurikov G. N., Titov F. M.** Creation of Predictive Analytics System for Power Energy Objects. Proc. of 2018 11th Int. Conf. MLSD. 2019. 5 p.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Гидродинамика и тепломассообмен	6
Секция 2. Физика плазмы и плазменные технологии	324
Секция 3. Свойства рабочих тел в энергетике	376
Секция 4. Актуальные вопросы теплоэнергетики и теплотехник	463