

Всероссийская конференция
**XIII СЕМИНАР ВУЗОВ
ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ
И ЭНЕРГЕТИКЕ**

12 – 14 октября 2023 года

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



125



НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ
ПО ТЕПЛОМАССООБМЕНУ
Российской Академии наук

приоритет2030⁺
лидерами становятся

г. Нижний Новгород

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

**XIII СЕМИНАР ВУЗОВ
ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ**

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
Всероссийской научной конференции**

12-14 октября 2023, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

**© Нижегородский
государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2023**

Нижний Новгород 2023

УДК 536.2

XIII семинар вузов по теплофизике и энергетике: тезисы докладов Всероссийской научной конференции [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2023. – 1 электрон. диск (CD-ROM): зв., цв., 12 см. – Систем. требования: ПК с процессором 486; ОЗУ 8 Мб.; операц. система Windows 95; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана. – 30 экз.

Сборник содержит доклады международной научной конференции «XIII семинар вузов по теплофизике и энергетике», которая проводилась 12-14 октября 2023 г. в Нижнем Новгороде на базе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. В сборнике представлены доклады по направлениям: физическая гидрогазодинамика и тепломассообмен; горение натуральных топлив; математическое моделирование в теплофизике и энергетике; свойства рабочих тел и конструкционных материалов в энергетике; энергоэффективность и энергосбережение; совершенствование энергетического оборудования ТЭС и АЭС; водоподготовка и водно-химический режим; возобновляемые источники энергии; вопросы экологической безопасности; образовательные программы по теплофизике и энергетике.

Рецензенты:

доктор технических наук, старший научный сотрудник ИТ СО РАН

П.Д. Лобанов;

кандидат технических наук, начальник НИИК АО «ОКБМ Африкантов»

М.А. Камнев

Редактор О.В. Пугина

Электронное издание подготовлено ЦДОТ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, компьютерная верстка С. Зубкова

ISBN 978-5-502-01735-0

Адрес издающей организации: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

© Нижегородский
государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОБМЕН	10
Вафин Д.Б., Зиганшин Ш.Г., Мукатдаров А.А. Зависимость аэродинамики продуктов сгорания газообразного топлива и тепловых потоков к трубчатому экрану в трубчатых печах от типа и размещения горелок	10
Зайнутдинова Д. А., Павлов Г.И., Теляшов Д.А., Горбунова О.А. Теоретическое исследование массы выпариваемой влаги из дисперсных частиц от времени сушки	12
Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Накоряков П.В., Горбунова О.А. Об особенностях свободного всплытия газовых пузырьков в жидкости в условиях формирования в ней стоячей волны	14
Зубков А.Г., Олексюк Д.А., Щербинин А.А., Вертиков Е.А. Экспериментально-расчетное исследование локальных параметров теплоносителя на многостержневых моделях ТВС-квадрат	16
Исламова А.Г., Кропотова С.С., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А. Столкновение капель жидкости с пиролизирующей поверхностью угля	18
Кабардин И.К., Правдина М.Х., Яворский Н.И. Меледин В.Г., Гордиенко М.Р., Зубанов К.С., Какаулин С.В., Полякова В.И. Исследование распределения температуры в трубах ранка круглого и квадратного поперечного сечения	20
Кайсенов Н.Э., Мелихов О.И. Влияние климатических параметров площадки строительства АЭС «АККУЮ» и тепловыделений отработавшего ядерного топлива на безопасность его хранения	22
Колесова А.А., Веретенников С.В. Колесова Е.Г. Исследование формирования пелены охладителя за отверстием цилиндрической формы	26
Коновалов И.А., Соколов А.Н., Щекин Д.В., Баринов А.А. Применение перспективных методов анализа данных для оценки влияния режимных и геометрических параметров канала на звуковое истечение водяного теплоносителя	28
Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Курдюмов А.С., Чинак А.В., Светоносков А.И., Волков С.М., Евдокименко И.А. Особенности двухфазного течения состоящего из газа и тяжелого жидкометаллического теплоносителя	30
Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В., Дорожкин А.В. Интенсификация теплообмена на бифильных поверхностях нагрева	32
Панкратов Е. В. Исследования числа Рейнольдса и угла закрутки на формирование вторичных вихрей в кольцевом канале с неподвижными поверхностями	34
Плотников Л.В., Шурупов В.А., Следнев В.А., Лаптев А.Д. Интенсивность теплоотдачи стационарного потока воздуха в цилиндре при заполнении через тарельчатый клапан	36
Погорелов М.Д., Маров А.Р., Бокова Т.А., Волков Н.С., Сумин Р.В., Зырянова Т.К. Исследование технологии свинец-висмутного теплоносителя при относительно низких температурах расплава	39
Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А. Экспериментальное исследование эффекта энергоразделения при поперечном обтекании цилиндра сжимаемым потоком воздуха	41
Пьянкова С.Ю. Разработка расчетной модели гидравлических и тепловых характеристик турбины низкого давления авиационного ГТД	43
Серяков А.В., Конькин А.В., Алексеев А.П. Пульсирующие изменения толщины и температуры пленки конденсата в коротких тепловых трубах при закручивании парового потока	45

Стрижак П.А., Высокоморная О.В., Антонов Д.В.	
Критические условия микро-взрыва капель жидкостей	46
Суворин И.Д., Ершов М.И., Тупоногов В.Г., Рыжков А.Ф.	
Экспериментальное определение скорости витания частиц неправильной формы	48
Сумин Р.В., Бокова Т.А., Мелузов А.Г., Волков Н.С., Маров А.Р., Зырянова Т.К., Погорелов М.Д.	
Определение гидравлических потерь на участках трасс с различной геометрией в среде тяжелого жидкометаллического теплоносителя	51
Павлов Г.И., Ваньков Ю.В., Теляшов Д.А., Мукаддаров А. А., Зайнутдинова Д. А.	
Исследование влияния температуры газов на характеристики термического разложения резины в инертной газовой среде	54
Терехов В.И., Терехов В.В., Филиппов М.В., Чохар И.А.	
Би-стабильность кольцевых импактных струй. Физика явления и возможные приложения	55
СЕКЦИЯ 2. ГОРЕНИЕ НАТУРАЛЬНЫХ ТОПЛИВ	58
Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Пурин М.В., Саломатов В.В.	
Математическое моделирование процесса зажигания угольной пеллеты	58
Шлегель Н.Е., Стрижак П.А., Клименко А.	
Критические условия фрагментации капель водомазутной эмульсии с присадками в высокотемпературной газовой среде	60
Стрижак П.А., Шлегель Н.Е.	
Применение газогидратов для повышения эффективности горения низкосортных топлив	62
СЕКЦИЯ 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕПЛОФИЗИКЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ	65
Базюк С.С., Киселев Д.С., Полунин К.К., Солдаткин Д.М., Стойков К.В.	
Исследование поведения оболочек толерантных ТВЭЛОВ ВВЭР-1000 при аварии с потерей теплоносителя	65
Божеева Д.М., Кузнецов В.А., Дектерев А.А.	
Численное исследование зависимости физико-химических процессов сжигания ВУТ от концентрации кислорода в дутье	67
Вертиков Е.А., Олексюк Д.А., Малютин М.А., Зубков А.Г.	
Валидация субканального теплогидравлического кода SC-INT по локальным параметрам двухфазного теплоносителя	69
Богомолов А.Р., Гардер А.Д.	
Моделирование пиролиза в реакторе с неподвижным слоем	71
Гуров Е.Н., Айвазьян Т.В., Мохина Т.А., Макаров О.В.	
Оптимизация временных затрат при проведении расчетов температурного состояния оборудования	73
Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Сентябов А.В.	
Численное моделирование кавитации при обтекании тел с использованием программного кода SIGMAFLOW	75
Деревич И.В., Матюхина Д.И.	
Моделирование микровзрыва композитных капель углеводород – вода	77
Жигарев В.А., Минаков А.В., Лысакова Е.И.	
Моделирование транспорта шлама растворами с добавкой углеродных нанотрубок	79
Жигарев В.А., Минаков А.В.	
Моделирование процессов сопряженного теплообмена при бурении скважин в условиях ММП	81
Иванов Ф.С., Макаров О.В., Марков А.С., Переведенцева И.В.	
сокращение времени проведения термоциклических испытаний элементов конструкции ПП перспективных РУ с применением методологии численного моделирования	83
Борисов Б.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А., Салагаев С.О.	
Влияние условий работы системы воздухообмена на концентрацию CO ₂ в локальной рабочей зоне в помещении с газовым инфракрасным излучателем	85

Окатыев Р.С., Колесниченко И.В. Моделирование сепарации дисперсной примеси в жидкометаллических теплоносителях	88
Парфенов Г.И., Смирнов Н.Н., Тютиков В.В. Имитационное двухмерное моделирование процесса теплопередачи через оконный блок с теплоотражающими экранами	90
Постников И.В., Медникова Е.Е. Оценка эффективности внедрения подсистемы распределенного теплоснабжения на базе просьюмера в действующей теплоснабжающей системе	92
Постников И.В., Медникова Е.Е. Методы и модели иерархического формирования централизованно-распределенных тепло-снабжающих систем с просьюмерами	94
Терешкин В.С., Левашов В.Ю. Моделирование испарения и конденсации методами молекулярной динамики	96
Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А. Математическая модель образования вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель	98
Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю., Чебакова Е.В. Численное моделирование процессов получения водорода при электролизе раствора КОН	100
Мельников И.А., Шмельков Г.Б., Голубев М.А., Великанов А.В. Моделирование радиационного теплообмена в полости над расплавом	102
Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В., Савекин С.С., Яковлева О.В. Разработка и валидация комплекса программных средств для анализа радиационных последствий запроектных аварий на АЭС С ВВЭР	104
СЕКЦИЯ 4. СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ	106
Барбин Н.М., Титов С.А., Терентьев Д.И. Изменение температуры взаимодействия в системах радиоактивный графит-воздух с увеличением содержания кислорода	106
Волосников Д.В., Поволоцкий И.И., Марчукова А.А., Скрипов П.В. Теплоотдача к импульсно перегретым водным растворам гликолей и оценка их критических параметров	110
Е.Ю. Лага, А.В. Дорожкин, Е.Г. Орлова, Д.В. Феоктистов Разработка процедуры гидрофобизации материалов на основе лазерного химического модифицирования поверхности	112
Курьяков В.Н. Перспективы разработки теплоносителей на основе фазово-переходных материалов. Физико-химические свойства наноразмерных водных дисперсии n-алканов	114
СЕКЦИЯ 5. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ	115
Абдуллин Т.Р., Кондратьев А.Е., Ахметова И.Г., Зарипова Д.А., Носов С.В. Использование аэрогеля на ТЭЦ для повышения эффективности энергосбережения	116
Абрамова Д.А., Дубцов Н.Д., Петрова С.Е. Экономическая эффективность использования АЭС для производства водорода	118
Аверьянова А.А., Ваньков Ю.В. Методика повышения энергетической эффективности нефтеперерабатывающего завода	120
Алексеев П.Д., Леухин Ю.Л. Струйный модульный рекуператор	122
Аль-Окби А.К., Ваньков Ю.В., Гарнышова Е.В., Зиганшин Ш.Г. Система кондиционирования воздуха с аккумулятором тепла	124
Базукова Э.Р., Пономарев Р.А., Политова Т.О., Гапоненко С.О. Оценка экономического эффекта вариантов тепловой защиты паропроводов промышленного комплекса	126
Моторин О.В., Болога М.К. Влияние электрического поля на тепловые характеристики пульсационной тепловой трубы	129

Киндра В.О., Максимов И.А., Брызгунов П.А.	
Повышение маневренности АЭС за счёт интеграции водородного энергетического комплекса	131
Федюхин А.В., Гафиатуллина К.Р., Крайков М.Д., Мухаметова Л.Р.	
Применение современных теплоизоляционных материалов для технологического оборудования и сооружений промышленных предприятий	133
Клюкин И.И., Александров Р.Н, Загретдинов А.Р., Зиганшин Ш.Г., Измайлова Е.В.	
Акустический контроль утечек трубопровода с применением метода нормированного размаха	135
Косторева Ж.А., Омаров А.А., Сыродой С.В., Пурин М.В.,	
Экспериментальные исследования процессов секвестирования антропогенных оксидов при сжигании влагонасыщенного топлива	138
Ваньков Ю.В., Федотова А.О., Крайков М.Д., Гафиатуллина К.Р	
Модернизация кожухотрубного теплового аккумулятора 3D интенсификаторами теплообмена	140
Алексеева В.Д., Крайнов Д.А., Полканов С.В.	
Использование теплоносителя гелий в контуре ВТГР для покрытия тепловых нужд на промышленных предприятиях	142
Кропотова С.С., Стрижак П.А., Волков Р.С.	
Система идентификации возгорания в помещении и подавления горения	144
Ваньков Ю.В., Макарова А.Р., Измайлова Е.В., Ахметова И.Г.	
Коэффициент теплопроводности влажной изоляции при отрицательных температурах	147
Овчинников К.А., Ефремов А.В.	
Оценка предела вложений в повышение КПД ТЭС	149
Плотников Л.В., Давыдов Д.А., Красильников Д.Н., Рыжков А.Ф.	
Сравнительный анализ технико-экономических показателей поршневого двигателя, работающего на бензине и синтез-газе	151
Плотникова Л.В., Ваньков Ю.В., Политова Т.О.	
Повышение эффективности использования сбросной тепловой энергии в энерготехнологических промышленных комплексах с применением системного подхода.	153
Санчес Гомес О.М., Кузнецов О.Н.	
Модернизация и развитие электроэнергетической системы острова Хувентуд	155
Кудинович И.В., Сыралёва М.Н.	
Повышение энергоэффективности систем обогрева судовых цистерн	157
Ушаков К.Ю., Богомолов А.Р., Садовский В.М.	
Топливная составляющая процесса совместного ожижения сапромикситов и резиновой крошки	159
Цэрэндорж Ц., Султангузин И.А.	
Исследование снижения теплопотери зданий в Улан-Баторе	161
Султанов М.М., Болдырев И.А., Курьянова Е.В., Шевченко М.Е.	
Методы и модели технологического прогнозирования в энергетике	164
СЕКЦИЯ 6. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС И АЭС	165
Балакин Д.Ю., Аронсон К.Э.	
Определение предельного режима функционирования ступени многоступенчатого пароструйного эжектора с помощью расширенной схемы измерения...	165
Демидов А.Л., Аронсон К.Э., Рябчиков А.Ю., Александрова Е.К.	
Распределение скорости циркуляционной воды по рядам трубок входной водяной камеры конденсатора паровой турбины	167
Киселев Д.С., Бахин А.Н., Беспечалов Б.Н., Викторова С.М., Вишневыский В.Ю., Зайцев Д.А., Козлов В.В., Репников В.М., Тихонов Н.А.	
Плотное топливо перспективных ядерных реакторов	169
Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Окатьев Р.С., Мамыкин А.Д.	
Применение электромагнитных сил для контроля и управления жидкометаллическим теплоносителем	170

Садкин И.С., Щинников П.А. Анализ энергетических показателей установок на основе CO ₂ -циклов при изменении их термодинамических параметров	172
СЕКЦИЯ 7. ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ	175
Курьяков В.Н. Анализ жидкостей на содержание наноразмерных механических примесей методом ультрамикроскопии	175
СЕКЦИЯ 8. ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ	177
Любов В.К. Повышение эффективности энергетического использования отходов фанерного производства	177
Нигаи Н.А., Сыродой С.В., Познахарев А.С. Влияние формы слоя древесной биомассы на характеристики её сушки	179
Шевырёв С.А. Эксергетический анализ комплекса полигенерации по производству водорода из биомассы	181
СЕКЦИЯ 9. ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	184
Ушаков К.Ю., Богомолов А.Р., Горина В.З. Исследование продуктов пиролиза и газификации крошки отработанных шин	184
Росляков П.В. Оценка снижения выбросов парниковых газов предприятиями теплоэнергетики	186
Рябов Г. А., Литун Д. С., Фоломеев О. М. Использование технологии химических циклов для улавливания CO ₂ и получения полезных продуктов	188
Темникова Е.Ю., Полтавец А.В., Зуев М.В., Абулханов В.И, Богомолов А.Р. Обследование золошлаков Ново-Кемеровской ТЭЦ	190
Фомичев В.В., Кочнов О.Ю., Пахолик Д.А., Кузнецов Н.В. Влияние ИЯУ малой мощности на окружающую среду	193
Стрижак П.А., Шлегель Н.Е. Применение газогидратов из дымовых газов для ликвидации возгораний	195
СЕКЦИЯ 10. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ	198
Данилова-Третьяк С.М. Актуальные направления работы института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси в области теплофизики и энергетики	198
Куприянов В.М., Белоусов П.А., Разинькова Т.Н. Возможности использования современных средств комплексного описания ядерно-технологических знаний	199
ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ОТ ИССЛЕДОВАНИЙ К ВНЕДРЕНИЮ – 2023	201
Киндра В.О., Максимов И.А., Брызгунов П.А. Анализ влияния стоимости органического топлива на конкурентоспособность атомных станций малых мощности	201
Бондаренко А.А.^{1,2}, Колесниченко И.В.^{1,2} Моделирование индукционного датчика уровня	203
Мелькова А.С., Пильковская М.Р. Новые решения в обеспечении безопасности АЭС	205
Пильковская М. Р., Мелькова А. С. Цифровые двойники АЭС	207
Куприянов В.М.¹, Белоусов П.А.¹, Разинькова Т.Н.¹ Об унификации обменного формата описания и хранения данных о свойствах конструкционных материалов	209

Титов С.А.¹, Барбин Н.М.¹, Терентьев Д.И.¹	
Изменения термодинамических параметров в системах «радиоактивный графит O ₂ + N ₂ » с увеличением содержания кислорода	211
Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Добров А.А., Курицин Д.Д., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.	
Особенности гидродинамики теплоносителя на выходе из твс реактора типа РИТМ	213
Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Добров А.А., Курицин Д.Д., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.	
Гидродинамика теплоносителя на входе в ТВС реактора типа РИТМ АСММ	215
Цветкова И.А., Кочеткова Т.М., Воробьева В.А., Семенов А.Н., Басов А.А.	
Естественные источники облучения человека. Анализ. Минимализация	217
Пупынин В.А., Басов А.А., Егорова Е.С., Семенов А.Н.	
Анализ конструкции охлаждающих элементов для визуализации ядерных излучения в камере Вильсона	219
Воробьева В.А., Цветкова И.А., Кочеткова Т.М., Сатаев А.А.	
Естественная циркуляция в реакторе. Определения расхода теплоносителя при естественной циркуляции	221
Прытков Л.Н.¹, Барбин Н.М.¹, Терентьев Д.И.¹	
Термодинамическое моделирование поведения плутония в натриевом теплоносителе	223
Пупынин В.А., Басов А.А., Егорова Е.С., Семенов А.Н.	
Метод измерения активности источника путем цифрового анализа треков частиц в камере Вильсона	225
Торхова Д.А., Каверзнев М.М.	
Возможности использования SCO ₂ -цикла Брайтона на АСММ с РУ РИТМ-200	226
Тарасюк А. В.	
Подход к обеспечению безопасности АЭС	228
Егорова Е.С.¹, Гришин А.Л.², Пупынин В.А.¹	
Измерение содержания радионуклидов в теле человека на спектрометрической установке «Контрольный СИЧ», градуировка установки	230
Д.В. Доронков, А.А. Добров, А.Н. Пронин, Т.Д. Демкина, А.В. Рязанов, Д.Д. Курицин	
Экспериментальное исследование гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР	232
Н.Ю. Косенкова, Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев	
Излучательная способность металлов, используемых в производстве сборок ядерных реакторов	234
Сумин Р.В., Бокова Т.А., Мелузов А.Г., Маров А.Р., Волков Н.С., Зырянова Т.К., Погорелов М.Д.	
Экспериментальные исследования различных методов измерения уровня тяжелого жидкометаллического теплоносителя	236
Д.М. Аношин, М.В. Гариевский	
Исследование процессов разрядки аккумулятора фазового перехода в составе АЭС для ТАМ LiNO ₃ и смеси 18,5% NANO ₃ + 81,5% NaOH	238
Д.А. Тимин, А.М. Анфимов, Д.В. Кузнецов	
Методический подход для детерминистического анализа запроектных аварий на реакторах БН	240
Вознесенский М.В., Чернышев В.М., Седов А.Р., Касаткин Н.И., Басов А.А., Семенов А.Н.	
Исследование радиационной и термической стойкости постоянных, редкоземельных магнитов	241
Вознесенский М.В., Седов А.Р., Чернышев В.М., Касаткин Н.И., Басов А.А., Семенов А.Н.	
Исследование нейтронного потока методом активационного анализа. Сравнительный анализ детекторов, состоящих из родия, индия и серебра	243
Румянцев С.С.	
Особенности применения технологии tdr в первом контуре ядерной энергетической установки	245

Н.О. Заузолкова¹, Т.С. Сабурин¹, А.В. Пахомов¹, А.Н. Семенов¹ Перспективы использования свойств нейтрино	247
М.Д. Погорелов, Т.А. Бокова, Н.С. Волков, А.Р. Маров, Р.В. Сумин, Т.К. Зырянова Экспериментальное исследование идростатического подшипника двойного взаимобратного щелевого дросселирования в условиях ТЖМТ при низких температурах сплава 250 °С	248
В.А. Горбунов, С.С. Теплякова Повышение эффективности работы тепловыделяющих элементов за счет их конструктивных изменений	250
В.А. Горбунов, С.С. Теплякова, М.Н. Мечтаева, П.А. Минеев Кластерный и факторный анализ в процессе промышленного эксперимента на Калининской АЭС	252
В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, С.С. Теплякова, Н.Н. Мечтаева, П.А. Минеев Цифровые двойники тепломеханического оборудования второго контура АЭС	254
Андреев Т. А., Арбузова С. М., Власичев Г. Н. Специфика использования растворного ядерного топлива в реакторах малой мощности	256
Д. А. Ожигин, Н. Г. Андреев, Громова П.Е. Основные требования, предъявляемые к двухцелевым транспортным упаковочным комплектам для РУ РИТМ-200Н	257
Ракова Д.И., Андреев В.В., Тарасова Н.П. Получение обобщенной зависимости для ускоренного прогнозирования кривых гидравлического сопротивления циркуляционных контуров	259
Арбузова С. М., Андреев Т.А., Власичев Г. Н. Развитие корпусов активных зон реакторов малой мощности серии ВИР	260
К.Г. Галстян, Н.Г. Катков, В.В. Андреев Предварительный анализ программ для расчёта гидравлического сопротивления контуров	261
Кабиров Б. М., Аношкин Ю. И. Аккумуляторы тепла, основные теплоаккумулирующие материалы	262
Сухарев М.С., Сатаев А.А. Термические, сорбционные, мембранные методы очистки жидких радиоактивных отходов и их различия	264
Н.Г. Катков, Галстян К.Г., Андреев В.В. Прогнозирование показателей гидравлического сопротивления циркуляционных контуров	265
Королев А. В., Полуничев В. И. Исследование характеристик систем компенсации давления теплоносителя первого контура РУ с ВВР	266
Громова П. Е., Ожигин Д. А., Полуничев В. И. Сравнительный анализ кампаний кассетной и канальной активной зоны	267

СЕКЦИЯ 1. ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОБМЕН

УДК 536.3:535.4:665.642

Вафин Д.Б., Зиганшин Ш.Г., Мукатдаров А.А.
Казанский государственный энергетический университет

ЗАВИСИМОСТЬ АЭРОДИНАМИКИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ К ТРУБЧАТОМУ ЭКРАНУ В ТРУБЧАТЫХ ПЕЧАХ ОТ ТИПА И РАЗМЕЩЕНИЯ ГОРЕЛОК

Сырьем для получения широко используемых в настоящее время полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида полистирола и многих других являются этилен и пропилен – олефины-мономеры. Их получение в настоящее время производится пиролизом нефтяных фракций, в частности легкого бензина, этана, пропана. Наиболее распространенными аппаратами для проведения пиролиза стали трубчатые печи. В змеевики конвекционных секций таких печей подается сырье, которое подогревается дымовыми газами в основном за счет конвективного теплообмена. Сырье испаряется и смешивается с водяным паром и нагревается до температуры примерно до 650 °С, при которой начинаются реакции разложения. Пиролиз углеводородов происходит в трубчатых реакторах камеры радиации печи за счет теплоты сгорания газообразного топлива в горелках разного типов.

Выход целевых продуктов определяется правильной организацией подвода теплоты парогазовой смеси в трубчатых реакторах за десятые доли секунды (0,2 – 0,3 с). Для этого необходимо обеспечить высокий уровень температурной нагрузки реакционных труб экрана, что приводит к их нахождению на пределе жаростойкости материалов. Существующие печи пиролиза, как правило, имеют вертикально подвешенные змеевики с движением сырья в несколько потоков (до десяти).

Основное количество теплоты (более 90 %) пирозмеевику поступает за счет радиационных потоков и раскаленных футерованных стен камеры радиации и дымовых газов. Для расчета тепловых потоков в объеме радиационной камеры необходимо знать распределение температуры продуктов сгорания и концентрации их излучающих компонентов. Локальные значения этих величин можно получить лишь численным интегрированием системы дифференциаль-

ных уравнений переноса импульса, неразрывности, энергии, переноса энергии излучением, моделей турбулентности и горения газообразного топлива.

В данной работе описывается способ моделирования взаимосвязанных физико-химических процессов в камерах радиации трубчатых печей пиролиза этана и пропана системой дифференциальных уравнений сохранения энергии, модели горения газообразного топлива и уравнений радиационной газовой динамики. Приведены результаты численных исследований тепло- и массообмена при применении настенных газовых горелок нескольких типов и изменении их размещения на боковых футерованных стенах, на полу и своде камеры радиации. Продукты сгорания, исходящие из сопел настенных горелок разных типов, создают сложные поля температуры и скоростей в объеме камеры. За счет излучения дымовых газов, мельчайших частиц сажи и раскаленных футерованных стен камеры радиации формируются тепловые потоки к трубчатому экрану, где происходит пиролиз этана или пропановой фракции с целью получения этилена или пропилена. В зависимости количества ярусов горелок различных типов и их расположения в камере радиации печи получается разные поля температуры и течения продуктов сгорания и распределения плотностей тепловых потоков по высоте трубчатого экрана. В результате расчетов для разных вариантов использования горелок получены поля скоростей, температуры в объеме камеры радиации и концентрации основных компонентов продуктов сгорания.

Температура продуктов сгорания меняется как по высоте и ширине камеры радиации, так и по ее глубине вдоль оси z . Непосредственно при выходе из горелок температура смеси топливного газа и воздуха еще низкая. В небольшом объеме факела температура резко повышается, однако не достигает значений адиабатной температуры. Затем за счет отдачи теплоты за счет излучения и перемешивания дымовыми газами из более отдаленных областей камеры температура плавно уменьшается. Наименьшая температура дымовых газов получается на переходе из камеры радиации в конвекционную секцию печи.

В камере радиации возникает сложное поле течения продуктов сгорания с присутствием обратных зон течений в областях между горелками. Наличие зон обратных течений около устья горелок способствуют обеспечению устойчивости горения. Достаточно большие зоны обратных течений возникают у пода камеры, вблизи трубчатого экрана на уровне 3-го ряда снизу горелок правой половины и на уровне 5-го, 6-го ярусов левой половины топочного объема. Эти зоны и обеспечивают относительно равномерное поле температуры около труб змеевиков. Значения скорости продуктов сгорания в большей части камеры радиации лежат в пределах 0,5...1,5 м. Имеется небольшое сходство между полями температуры и скоростей, что указывает на определенное влияние конвективного теплообмена на формирование поля температуры

Наши исследования показали, что путем использования горелок различных типов и изменения их расположения можно регулировать распределение тепловых потоков по высоте трубчатого экрана и добиться желаемого выхода целевых продуктов. Использование большого количества настенных горелок с многоярусным их расположением (в данном случае 8 ярусов с одной стороны) обеспечивает достаточно равномерное распределение суммарных тепловых потоков по высоте трубчатого экрана.

УДК 53.09

Зайнутдинова Д.А., Павлов Г.И., Теляшов Д.А., Горбунова О.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАССЫ ВЫПАРИВАЕМОЙ ВЛАГИ ИЗ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ОТ ВРЕМЕНИ СУШКИ

При расчете сушильных установок важным параметром является знание определения количества связанной влаги. В настоящее время эти значения определяются экспериментальным методом и даются в табличной форме во многих источниках [1, 2].

Процесс теплообмена при сушке частиц, согласно закону сохранения энергии, будет характеризоваться уравнением:

$$Q_{\text{и}} + LI_{\text{исх}} + c_{\text{т}}m_{\text{т}}t_{\text{м0}} + c_{\text{ж}}C_0m_{\text{т}}t_{\text{м0}} = Q_{\text{с}} + Q_{\text{пт}} + LI_{\text{к}} + c_{\text{т}}m_{\text{т}}t_{\text{мк}} + c_{\text{ж}}C_{\text{к}}m_{\text{т}}t_{\text{мк}},$$

где $c_{\text{т}}$ – теплоемкость твердой фазы;

$c_{\text{ж}}$ – теплоемкость жидкой фазы; $m_{\text{т}}$ – масса твердой фазы; $t_{\text{м0}}$ и $t_{\text{мк}}$ – температура исходного и высушенного материала; и $C_{\text{к}}$ – начальная и конечная влажности; $Q_{\text{и}}$ – тепло, подводимое к сушильному агенту в источнике; $Q_{\text{пт}}$ – потери тепла; r – удельная теплота парообразования; $LI_{\text{исх}}$, $LI_{\text{к}}$ – тепло соответственно исходного и отработанного сушильного агента.

Тогда $Q_{\text{с}} = Q_{\text{и}} - L(I_{\text{к}} - I_{\text{исх}}) - m_{\text{т}}t_{\text{м0}}(c_{\text{т}} + c_{\text{ж}}C_0) - m_{\text{т}}t_{\text{мк}}(c_{\text{т}} + c_{\text{ж}}C_{\text{к}})$

Из работы [3] известно, что тепло, затрачиваемое на удаление связанной влаги определяется по формуле

$$Q_{\text{с}} = r \cdot m_{\text{вв}}.$$

Тогда масса связанной влаги рассчитывается по формуле

$$m_{\text{ВВ}} = [Q_{\text{и}} - \frac{\lambda}{d} \left\{ 4 + \frac{3,3162 \cdot Re^{0,2}}{(1 + 0,1321Re^{0,25})^{1,8} - 0,0261 \cdot Re^{0,45}} \right\} \cdot F_{\text{ч}} \cdot \Delta t_{\text{ч}} - \frac{m_{\text{Т}} t_{\text{М0}} (c_{\text{Т}} + c_{\text{Ж}} C_{\text{0}})}{\tau} - \frac{m_{\text{Т}} t_{\text{МК}} (c_{\text{Т}} + c_{\text{Ж}} C_{\text{К}})}{\tau} - Q_{\text{ПТ}}] / r$$

где λ – коэффициент теплопроводности оживающего агента; d – диаметр частицы; Re – критерий Рейнольдса; $F_{\text{ч}}$ – поверхность теплообмена; $\Delta t_{\text{ч}}$ – разность температур оживающего агента и твердых частиц; τ – время сушки.

Таким образом, зная основные характеристики оживающего агента и частиц высушиваемого материала, можно определить теоретическую зависимость массы выпаренной влаги от времени сушки. В работе проводились расчетные исследования по влиянию размеров дисперсных частиц на интенсивность удаления связанной влаги. В качестве частицы был взят горох разного диаметра и начальной влажности: $d_1 = 4,6$ мм, $C_{01} = 31,7$ %; $d_2 = 6,1$ мм, $C_{02} = 21,5$ %; $d_3 = 6,2$ мм, $C_{03} = 18,6$ %; $d_4 = 6,2$ мм, $C_{04} = 15,7$ %; $d_5 = 6,9$ мм, $C_{05} = 19,7$ %. Тепловая мощность источника тепла составляла 4,8 кВт. В качестве сушильного агента использовались продукты сгорания сжиженного газа – пропана, их характеристики были взяты из справочников. Расчетные исследования показали, что интенсивность удаления связанной влаги при прочих равных условиях в сильной степени зависит от диаметра частиц.

Получено, что чем больше диаметр частиц, тем быстрее удаляется связанная влага. Для проверки полученной зависимости на лабораторном стенде проводились эксперименты. Детальное описание стенда и методика проведения экспериментов описаны в работе [3]. Анализ сравнения расчетных данных с экспериментальными результатами показал, что использованная математическая модель качественно удовлетворительно описывает зависимость интенсивности удаления влаги от диаметра дисперсных частиц.

Для удовлетворительного описания количественных характеристик процесса сушки необходимо усовершенствовать существующую математическую модель.

Библиографический список

1. Акулич П.В., Акулич А.В. Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета: учебное пособие. – Минск: Вышэйшая школа, 2019. 376 с.

2. Муштаев В.И. Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. – М.: Химия, 1988. 352 с.

3. Кутовой К.В., Осипов Ю.Р. Решение задачи массообмена при термообработке дисперсного материала комбинированным способом // Фундаментальные исследования. 2012. № 9 (4). С. 927-931

УДК 534-14

Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Накоряков П.В., Горбунова О.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СВОБОДНОГО ВСПЛЫТИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ В НЕЙ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Барботажные установки широко используются в различных отраслях промышленности. В них происходят сложные физические процессы, включая свободные всплытия пузырей газа. Скорость всплытия пузырей зависит от различных факторов, таких как: диаметр пузыря, коэффициент вязкости среды, плотности газов и жидкостей и т.д. В общем виде уравнение движения газового пузыря в жидкости, находящейся в покое, описывается уравнением

$$m_a \frac{dw}{dt} = G_a + F_A + F_R, \quad (1)$$

где m_a - масса воздушного пузыря; G_a - гравитационная сила; F_A - сила плавучести; F_R - сила сопротивления.

В технике иногда встречаются другие более сложные случаи свободного всплытия газовых пузырей в жидкости, когда присутствуют акустические колебания [1,2]. В большинстве случаев, в этих работах рассмотрены поведения отдельных монодисперсных газовых пузырей в акустическом поле. Задачи свободного движения газового пузыря в жидкости в зависимости от частоты колебания и в условиях полидисперсности не рассматривались.

Цель исследований авторов – изучение поведения ансамбля всплывающих полидисперсных газовых пузырей в столбе жидкости, в котором генерируются акустические волны слабой интенсивности на разных частотах.

Экспериментально установлено, что потери динамического давления газа в трубке подачи газа в керамический рассеиватель, находящийся в жидкости, при наличии в ней звуковых волн достигают до 47% по сравнению с динами-

ческим давлением газа в трубке при отсутствии колебаний в жидкости. Причем, они сильно зависят от частоты колебаний стоячих волн. Такой вывод можно сделать из анализа результатов, приведенных в таблице. Результаты получены на испытательном стенде, устройство и принцип действия которого описаны в работах [3].

Параметры	Высота трубы, м			
	1,5		1,2	
Режим истечения газов, Гц	0	253	0	316
Скорость газа в трубке перед распылителем, м/с	2	1,13	2	1,9
Высота газового столба в трубке, м	0,2 5	0,1	0,21	0,14
Высота газопузырькового столба в трубке, м	1,5	1,5	1,2	1,2
Объемное содержание газа в газопузырьковой среде, %	17	6	18	12
Параметры	Высота трубы, м			
	0,9		0,6	
Режим истечения газов, Гц	0	548	0	636
Скорость газа в трубке перед распылителем, м/с	2	1,9	2	2
Высота газового столба в трубке, м	0,1 4	0,14	0,11	0,11
Высота газопузырькового столба в трубке, м	0,9	0,9	0,6	0,6
Объемное содержание газа в газопузырьковой среде, %	16	16	18	18

Библиографический список

1. Губайдуллин Д.А., Гафиятов Р.Н. Акустические волны в вязкоупругих пузырьковых средах / Теплофизика высоких температур, 2019. Том 57. № 1. С. 150-153.
2. Губайдуллин Д.А., Гафиятов Р.Н. Отражение и прохождение акустической волны через многофракционный пузырьковый слой / Теплофизика высоких температур, 2020. Том 58. № 1. С. 97-100.
3. Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Накоряков П.В., Ситников О.Р. Экспериментальное исследование колебательного процесса в

цилиндрических трубах заполненные газопузырьковой жидкостью. //Вестник Тюменского университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 20223, т.8,, № 4 (32), ст. 81-95

УДК 621.039

Зубков А.Г., Олексюк Д.А., Щербинин А.А., Вертиков Е.А.
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ
НА МНОГОСТЕРЖНЕВЫХ
МОДЕЛЯХ ТВС-КВАДРАТ**

Одним из важнейших факторов, определяющих обеспечение теплотехнической надёжности активной зоны ядерного реактора с водой под давлением, является отсутствие кризиса теплоотдачи. Математически это выражается в величине коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи (DNBR – departure from nucleate boiling ratio), который должен быть выше единицы в стационарных и переходных режимах нормальной эксплуатации реакторной установки.

Для определения величины DNBR необходимо знать величину критического теплового потока (КТП) q_{cr} в тепловыделяющих сборках (ТВС) активной зоны. Для определения величины q_{cr} в практике теплофизических расчётов активных зон водоохлаждаемых реакторов применяют расчётные коды, работающие в так называемом субканальном (ячейковом) приближении. Такие коды, разделяя ТВС на гидравлически связанные параллельные подканалы, а систему подканалов аксиальными слоями на элементарные объёмы, решают систему уравнений и находят основные параметры потока теплоносителя для элементарного объёма, такие как давление p , массовую скорость $\rho\omega$ и относительную энтальпию x . Далее эти параметры, по сути, локальные параметры потока, подставляются в выбранную корреляцию для КТП, которая, в свою очередь, зависит от этих трёх определяющих параметров, т.е. $q_{cr} = f(p, \rho\omega, x)$. По известной величине КТП для каждого элементарного объёма определяется величина DNBR.

Неопределённость величины КТП в таком случае складывается из двух факторов – неопределённости самой корреляции и неопределённости расчета субканальным кодом локальных параметров теплоносителя. Для определения локальных параметров теплоносителя, таких как скорость, температура, паросодержание, в субканальном коде имеется ряд замыкающих соотношений. Большинство из этих замыкающих соотношений получены для простых условий обогреваемых труб и содержат значительное число эмпирических коэффициентов. Таким образом, субканальный код требует валидации по локальным параметрам теплоносителя на экспериментальных данных, которые максималь-

но приближены к условиям в ТВС, чтобы как можно точнее настроить математические модели, и, в конечном итоге, повысить точность определения q_{cr} .

Наиболее приближенными к условиям реальных ТВС получаются эксперименты на многостержневых электрообогреваемых моделях ТВС, выполняемые на крупномасштабных теплофизических стендах. Однако выполнение таких экспериментов дорогостояще и представляет сложности при оснащении модели ТВС средствами измерения.

В НИЦ «Курчатовский институт» на теплофизическом стенде КС в рамках исследований КТП на 25-ти стержневых моделях ТВС-КВАДРАТ разработки АО «ОКБМ Африкантов» были выполнены исследования локальных параметров потока теплоносителя на выходе из зоны обогрева экспериментальных моделей. Исследовались поперечное распределение температуры и скорость теплоносителя в ячейках моделей.

Для исследования температуры применялись термопарные зонды, вводимые в поток теплоносителя, а для исследования скорости – трубки Пито. Эксперименты проведены в широком диапазоне режимных параметров: давлении теплоносителя от 90 до 170 бар, массовых скоростях от 1500 до 5000 кг/(м²·с). Исследования выполнены на двух моделях ТВС-КВАДРАТ, состоящих из 24 обогреваемых имитаторов твэлов и одного необогреваемого имитатора направляющего канала (НК) стержней СУЗ. Модели различаются между собой наличием перемешивающих решёток (ПР) в пролётах между пластинчатыми дистанционирующими решётками (ПДР).

После первичной обработки экспериментальные данные сравнивались с результатами расчёта температур и скоростей по субканальному коду SC-INT [1, 2]. Применялись различные способы систематизации и обобщения экспериментальных данных по температурам, а также сравнения с расчётом: сравнивались как локальная температура в месте установки термопар (т.е. по каждой ячейке), так и усреднённая по орбитам. При сопоставлении результата расчётов скоростей с экспериментальными данными, расчётные величины подвергались корректировке для учёта профиля скорости в подканале ТВС по различным методикам (т.к. трубки Пито измеряют локальную скорость, а результатом расчёта по субканальному коду является средняя по подканалу величина).

Показано, что в определенных диапазонах режимных параметров результаты расчётов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Библиографический список

1. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин «SC-INT», № 578 от 31.03.2023 г.;
2. Олексюк Д.А. Разработка и экспериментальное обоснование программы для поячейкового теплогидравлического расчета активных зон реакторов типа ВВЭР, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.03. – Москва, 2002. – 194 с.

Исламова А.Г., Кропотова С.С., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А.
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, г. Томск

СТОЛКНОВЕНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С ПИРОЛИЗИРУЮЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТЬЮ УГЛЯ

Изучением процессов взаимодействия капель жидкостей с твердыми поверхностями активно занимаются исследователи на протяжении последних десятилетий. Такие процессы находят широкое применение в различных практических приложениях [1–3]: дымоудаление, испарительные системы и теплообменники, камеры сгорания и др. Большое внимание уделяется исследованию взаимодействия капель с различными поверхностями металлов. Однако в отличие от последних при нагреве угля до температуры выше 450 °С интенсифицируется его пиролиз и соответствующий выход летучих. Пока не опубликованы результаты изучения влияния химических реакций (выход летучих), происходящих при термической обработке угля, на взаимодействие с каплями. Понимание таких процессов позволит прогнозировать характеристики процессов, происходящих при распылении суспензионного топлива в топке котла и его последующем сжигании. Цель работы – установление основных закономерностей и характеристик соударения капель суспензионного топлива с частицами угля, подвергнутыми термическому разложению.

Проведены экспериментальные исследования основных характеристик соударения капель водоугольных суспензий с пиролизирующимися частицами угля. Использовались образцы тощего угля, бурого угля и антрацита фракции 45 мкм. Массовая концентрация угля в составе суспензий 50 масс%. Температура поверхности угольных частиц составляла 700 °С. Температура суспензии была постоянной и составляла 60 °С. Объем генерированных капель составлял 10 мкл. Скорость движения капель перед столкновением находилась в диапазоне $U_d =$ от 0,5 до 4 м/с. Размер частиц (R_p), с которыми сталкивались капли суспензий, варьировался от 0,8 мм до 1,6 мм.

В результате проведения экспериментов установлены три режима взаимодействия: агломерация, разделение растяжением с образованием одной или нескольких вторичных капель и атомизация. Показано, что при начальной скорости взаимодействия капли с частицей менее 0,5 м/с жидкость растекается по поверхности частицы, обволакивая ее. При этом вторичных фрагментов за счет кинетической энергии не образуется. Наличие на нагретой поверхности угля мелких частиц пыли, а также в самой капле, усиливало сцепление жидкости с твердой поверхностью. При взаимодействии происходит вскипание капли суспензии с образованием вторичных фрагментов. Увеличение скорости взаимодействия свыше 0,5 м/с при столкновении капли суспензии с нагретой частицей

угля привело к разрушению капли с образованием вторичных фрагментов. При столкновении капля жидкости частично растекалась по поверхности частицы угля, и весь массив жидкости скапливался в нижней части частицы. Затем под действием массовых и инерционных сил образовывался жидкостный мостик. Силы инерции преобладали над силой поверхностного натяжения, что приводило к разрушению жидкостного мостика и образованию одной или несколько вторичных капель. Из-за высокой адгезии часть жидкости “прилипла” к нагретой поверхности угля. При этом при обволакивании частиц, как и в режиме агломерации, происходило частичное вскипание жидкости и отрыв мелких капель.

На рис. 1 представлена карта режимов взаимодействия капель подогретой суспензии с пиролизирующимися частицами угля различных марок в координатах линейного параметра взаимодействия (B) от числа Вебера (We).

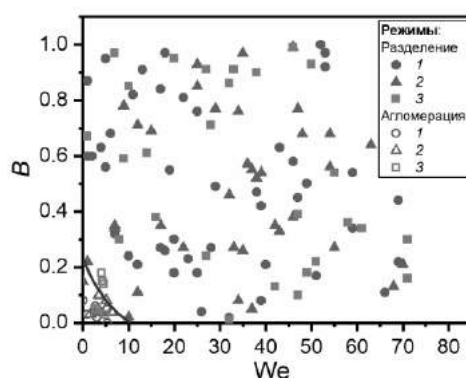


Рис. 1. Карта режимов соударения капель подогретой суспензий с частицами угля при варьировании температуры последних: 1 – бурый уголь; 2 – тощий уголь; 3 – антрацит

Анализ экспериментальных данных показал, что при идентичном размере частиц угля (45 мкм) различных марок в суспензии жидкости физические свойства последних не оказывают влияние на исход взаимодействия капель с частицами. Установлено, что режим агломерации реализуется в малом диапазоне чисел Вебера (от 0,1 до 10) и линейного безразмерного параметра (от 0 до 0,2). Это можно объяснить тем, что при взаимодействии капли жидкости с пиролизирующейся частицей жидкость мгновенно прогревается, уменьшается поверхностное натяжение и вязкость суспензии.

Библиографический список

1. Wang H. et al. An experimental comparison of the spray performance of typical water-based dust reduction media // Powder Technol. 2019. Vol. 345. P. 580–588.
2. Kunkel S. et al. Determination of heat transfer coefficients in direct contact latent heat storage systems // Appl. Therm. Eng. 2018. Vol. 145. P. 71–79.
3. Yang C. et al. Numerical simulation of a circulating fluidized bed combustor and evaluation of empirical models for estimating solids volume fraction // Powder Technol. 2021. Vol. 393. P. 786–795.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект № 23-71-10040, <https://rscf.ru/project/23-71-10040/>).

УДК 532.5

**Кабардин И.К., Правдина М.Х., Яворский Н.И. Меледин В.Г.,
Гордиенко М.Р., Зубанов К.С., Какаулин С.В., Полякова В.И.**
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТРУБАХ РАНКА КРУГЛОГО И КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Данная работа продолжает серию работ по исследованию эффекта Ранка-Хилша. Данный эффект, открытый в 1933 г., до сих пор не имеет общепризнанного научного обоснования. Это связано с тем, что труба Ранка чрезвычайно сложный объект исследования, как численного, так и экспериментального. Течение в ней является высокотурбулентным и сильнозакрученным. Также в потоке имеются и крупномасштабные структуры, которые трудно диагностировать и численно посчитать. Датчики, вносимые в поток, могут нарушать его и изменять показания терморазделения.

Цель данной работы – провести подробные измерения температуры на оси трубы. В поток на оси трубы помещено множество термопар, расположенных в трубочке. Также из-за того, что данная трубочка будет нарушать поток необходимо сравнить показания температуры и расхода на концах трубы Ранка с присутствием трубочки и без. Измерения проводились для труб ранка с квадратным и круглым поперечным сечением.

В наших работах использовалась труба Ранка квадратного поперечного сечения со стороной квадрата 34 мм. Такая труба используется для удобства оптической диагностики с помощью бесконтактных методов: лазерная доплеровская анемометрия, трассерная визуализация, визуализация с помощью скоростной камеры. Поэтому нам важно проводить измерения на этой трубе, потому, так как имеется обширная база экспериментальных данных, полученных на этой трубе. Также измерения проведены для трубы Ранка с круглым поперечным сечением. Диаметр круглой трубы 34 мм.

Измерения температуры в трубе Ранка проходят в рамках концепции выдвинутой нами в более ранних работах. В работе [1] течение в вихревой трубе с квадратным поперечным сечением было впервые проанализировано в рамках концепции кризиса течения во вращательно-поступательном потоке. В таком потоке пристенная струя, которая направляется к «горячему» выходу, граничит с циркуляционной зоной, представляющей собой тороидальный вихрь [2 4]. Оказалось, что заметный рост температуры вдоль пристенной струи происходит в области, где наблюдается кризис течения: отношение продольной скорости на границе пристенной струи к критической скорости «С» колеблется от-

носителем единичного значения. Критическая скорость – это скорость распространения длинных волн на границе пристенной струи с циркуляционной зоной [5].

В работе [6] были представлены и проанализированы новые подробные результаты измерений кинематических характеристик кризисного течения, в том числе пульсаций скорости. Выявлены признаки наличия гидравлического прыжка вблизи входа закрученного потока в рабочий канал вихревой трубы.

Подробные измерения температуры на стенке канала и на оси необходимы для точной оценки изменения градиента температуры для наших труб. Данные по температуре на трубе квадратного поперечного сечения будут соотноситься с ранее полученными данными с помощью лазерной доплеровской анемометрии.

Полученные экспериментальные данные по температурам помогут продвинуться в рамках выдвинутой концепции о природе нагрева периферийного потока в трубе Ранка.

Библиографический список

1. Правдина М.Х., Кабардин И.К., Полякова В.И., Куликов Д.В., Меледин В.Г., Павлов В.А., Гордиенко М.Р., Яворский Н.И. Гидравлическая неустойчивость потока в трубе Ранка // ПМТФ. 2020. Т. 61. № 3. С. 82-89.
2. Ahlborn B., Groves S. Secondary flow in a vortex tube // Fluid Dyn. Res. 1997. Vol. 21. No. 2. P. 73-86.
3. Ахметов Д. Г., Ахметов Т.Д., Павлов В.А. Структура потока в вихревой трубе Ранка-Хилша // Доклады академии наук, 2018. Т. 480. № 4. С. 422-425.
4. Akhmetov D.G., Akhmetov T.D. Flow structure and mechanism of heat transfer in a Ranque–Hilsch vortex tube // Experimental Thermal and Fluid Sci. 2020. Vol. 113. P. 110024
5. Bendjamine T.B., Barnard B.J.S. A study of the motion of a cavity of a rotating liquid // J. Fluid Mech. 1964. Vol. 19. P. 193–209.
6. Кабардин И.К. Экспериментальное исследование кризиса течения в вихревой трубе Ранка–Хилша методом ЛДА // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т.29. № 5. С. 709-717.
7. Давыдов Ю.И., Дзюбенко Б.В., Дрейцер Г.А. и др. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы // Под ред. Иевлева В.М. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
8. Kuznetsov V.V. Heat and mass transfer with phase change and chemical reactions in microscale // Proc. Int. Heat Trans. Conf. IHTC14. Washington, D.C., 2010. Paper 22570.
9. Kuznetsov V.V., Kozlov S.P. Modeling of methane steam reforming in a microchannel with a heat flow distributed in length // J. Eng. Therm. 2008. V. 17, No. 1. P. 53–59. 2.

10. Суржигов С.Т. Перенос излучением в неоднородном слое // ТВТ. 1997. Т. 35, № 3. С. 1–2.

Работа поддержана РФФ (грант № 22-29-01262)

УДК 621.9

Кайсенов Н.Э., Мелихов О.И.

АО «РЭИН», г.Москва, НИУ «МЭИ», г. Москва,

АО «Атомэнергопроект», г. Москва

**ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛОЩАДКИ
СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС «АККУЮ» И ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЙ
ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА НА БЕЗОПАСНОСТЬ
ЕГО ХРАНЕНИЯ**

Проекты хранилищ отработавшего ядерного топлива (далее – ХОЯТ) могут предусматривать использование специальных массивных зданий из тяжелого бетона с толщиной стен 1,8 м. Примером такого хранилища является ХОЯТ АЭС «Аккую», реализованного в рамках ВОО (Build-Own-Operate) контракта. Транспортные упаковочные комплекты (далее – ТУК) с отработавшим ядерным топливом (далее – ОЯТ), размещаемые в ХОЯТ имеют 3 категорию размещения в соответствии с ГОСТ – 15150-69, поэтому охлаждение топлива осуществляется естественной вентиляцией с использованием окружающего воздуха в качестве конечного поглотителя тепла.

В соответствии с требованиями НП-064-05 объекты использования атомной энергии 1 категории ответственности за ядерную и радиационную безопасность должны быть спроектированы на «экстремальные» значения температуры (1 раз в 10000 лет) окружающего воздуха в зоне размещения площадки АЭС.

Для ХОЯТ одним из критериев безопасности при хранении в нем ОЯТ является не превышение температуры оболочки ТВЭЛ ОТВС свыше установленных пределов. В соответствии с ОСТ 95 10585 значение критерия безопасности по температуре может приниматься 350 °С.

АЭС «Аккую» размещается на площадке со средиземноморским климатом. Максимально наблюдаемая температура воздуха с обеспеченностью 88 ч в год 32,9 °С, максимально наблюдаемая температура окружающего воздуха 44,2°С, «экстремальная» температура окружающего воздуха с обеспеченностью 1 раз в 10000 лет составляет 50,4 °С, среднегодовая скорость ветра 2,3 м/с.

Для анализа пределов и условий безопасности необходимо в качестве граничных условий расчетов использовать максимальное значение температуры окружающего воздуха – 50,4° С. При этом в случае превышения критерия безопасного хранения, граничное условие по температуре окружающего воздуха может квалифицироваться как исходное событие проектной аварии.

Другим фактором, влияющим на критерий безопасности по температуре оболочки ТВЭЛ, является глубина выгорания топлива.

Количество продуктов деления топлива приблизительно в два раза превышает количество разделившихся ядер, поэтому проектом АЭС определяется некоторое пороговое значение глубины выгорания, не приводящее к изменению свойств топлива и оболочки ТВЭЛ по причине «распухания» топлива. Это традиционный подход, предполагающий извлечение максимума теплотворности топлива. Наряду с ним современные рекомендации МАГАТЭ в части обращения с ОЯТ основываются на недопущении вреда будущим поколениям. Такой подход реализуем, если переработка ОЯТ экономически рентабельна. Очевидно, что рентабельность переработки может быть обеспечена благодаря высокой стоимости ядерного топлива на рынке, низкой стоимости переработки ОЯТ и благодаря большим объемам получаемых полезных нуклидов и изотопов после переработки. В настоящее время качественному анализу и оценке могут подлежать лишь последние два фактора, так как очевидна прямая зависимость между выработкой электроэнергии и объемом получаемых полезных элементов после переработки ОЯТ. В свою очередь переработка ОЯТ является операционным расходом и может расцениваться как рискованной фактор.

С учетом отмеченного выше, в качестве граничных условий расчетов, в соответствии с НП-001-97 консервативно следует принимать максимальное теоретическое остаточное тепловыделение от ОЯТ, соответствующее 18-месячному топливному циклу проекта АЭС «Аккую» – 21,6 кВт от 18 ОТВС, размещенных в одном транспортном упаковочном комплекте.

Также следует обеспечивать запас безопасности. После определения эксплуатационных режимов АЭС «Аккую» граничные условия расчетов могут быть изменены на более жесткие как по глубине выгорания (большее тепловыделение от ТУК), так и в случае изменения функциональных систем ХОЯТ (увеличение гидравлических сопротивлений проемов) по результату завершения строительства и передачи здания в эксплуатацию.

Для определения теплового баланса ХОЯТ в настоящее время широко используется CFD (Computational Fluid Dynamics) моделирование. Вычислительная область рассматриваемой задачи охватывает, как само ХОЯТ, так и окружающую ХОЯТ воздушную среду. Источники тепла распределены по площади, соответствующей габаритным размерам контейнера и их расположению в ХО-

ЯТ. В проемах здания установлены вентиляционные решетки и устройства перекрытия вентиляционных каналов – 125 шт. (2000x1000 мм, 1000x1000 мм). Суммарный гидравлический коэффициент сопротивления проемов $S_x = 6$. Количество ТУК в ХОЯТ – 40 шт. Расчетный анализ выполнялся консервативно в стационарном режиме без учета суточных колебаний. Консерватизм о солнечной инсоляции, соответствующей полуденному максимуму, не учитывался. Температура окружающего воздуха принималась равной $+50,4^\circ \text{C}$. Скорость ветра окружающего ХОЯТ, принималась равной 2,3 м/с. Направление ветра соответствует дневному бризу площадки АЭС «Аккую». Оптимальная расчетная сетка насчитывала 17 млн. ячеек. Результаты расчета зависимости расхода воздуха и температуры воздуха на отметке обслуживания контейнеров плюс 6 м от суммарных тепловыделений от ТУК приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

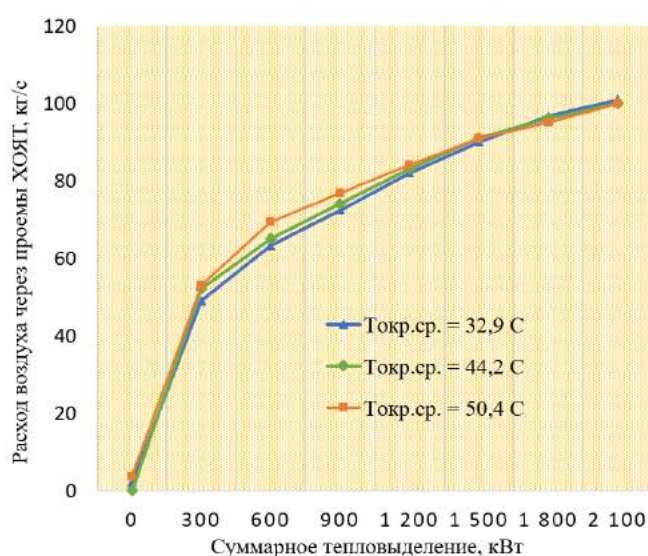


Рис. 1. График расхода через проемы ХОЯТ от суммарного тепловыделения контейнеров с ОЯТ

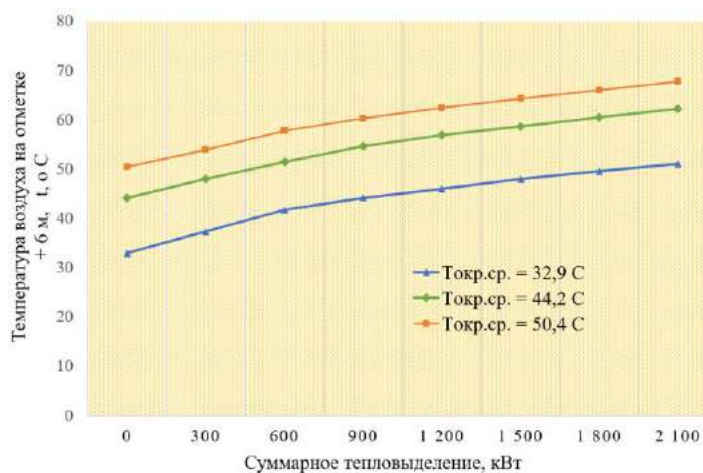


Рис. 2. График зависимости температуры воздуха на отметке обслуживания контейнеров +6 м от суммарного тепловыделения контейнеров с ОЯТ

Из результатов расчетов следует, что при суммарном тепловыделении 864 кВт (21,6 кВт от 1 ТУК – 1,2 кВт от 1 ОТВС при глубине выгорания 55 Мвт.сут/кгU – соответствует параметрам АЭС «Аккую») от 40 контейнеров расход воздуха в проемах составляет не более 76,9 кг/с, а температура воздуха на отметке обслуживания ТУК +6 м составляет не более 60,3° С.

При увеличении величины тепловыделения от контейнера более чем в 2,4 раза – до 2100 кВт (примерно 52,5 кВт от 1 контейнера) расход воздуха в проемах увеличивается до 100 кг/с, то есть на 23,1 %, а температура воздуха на отметке обслуживания ТУК +6 м увеличивается до 67,8 ° С, то есть на 11 %.

В соответствии с конструкторскими расчетами контейнера на соответствие требованиям транспортирования НП-053-05 для температуры воздуха 38° С без внешнего обтекания воздуха температура оболочки ТВЭЛ составляет 333° С.

Соответственно, в таких же условиях критерий безопасности по температуре оболочки ТВЭЛ в 350° С при компоновке в 40 контейнеров в ХОЯТ будет достигнут приблизительно при температуре 65° С, что соответствует суммарному тепловыделению от ТУК 1617 кВт - 40,4 кВт от 1 контейнера.

Исходя из ранее проведенных исследований [1] погрешность расчетов составляет приблизительно 5° С. Она состоит из погрешностей моделирования контейнера 3° С и погрешности моделирования ХОЯТ – 2° С.

В заключение следует отметить, что при 12-месячном топливном цикле, по примеру Нововоронежской АЭС - реалистичное тепловыделение от контейнера - 30 кВт. Следовательно, исходя из полученных результатов расчетов, проектные и конструкторские решения (ХОЯТ и ТУК) не обеспечивают неперевышение предела безопасности по температуре оболочки ТВЭЛ. Следовательно, для исключения рисков дефицита безопасности требуются изменения либо проектных решений ХОЯТ, либо конструктивных решений ТУК.

В настоящее время завершаются исследования по отказу от устройств перекрытия вентиляционных каналов (далее – УПК) ХОЯТ для снижения гидравлических сопротивлений проемов [2]. Отказ от УПК позволит уменьшить температуру воздуха в ХОЯТ приблизительно на 4-5° С.

Библиографический список

1. Математическое моделирование теплогидравлических процессов в хранилище отработавшего ядерного топлива сухого типа / Н. Э. Кайсенов, О. И. Мелихов, Е. Н. Казакова [и др.]. — Текст: непосредственный // Вестник МЭИ. — 2023. — № 5. — С — С. 25.
2. Кайсенов, Н. Э. Влияние гидравлических сопротивлений проемов здания хранилища отработавшего ядерного топлива на безопасность при размеще-

нии в нем транспортно-упаковочных комплектов с отработавшими ТЕПЛО-ВЫДЕЛЯЮЩИМИ СБОРКАМИ / Н. Э. Кайсенов, О. И. Мелихов. — Текст: непосредственный // Сборник тезисов научно-практической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда». — 2023. — № 10. — С. 135-137.

УДК 621.45.038.4

Колесова А.А., Веретенников С.В. Колесова Е.Г.

Рыбинский государственный авиационный технический институт
им. П.А. Соловьева, г. Рыбинск
ПАО «ОДК Сатурн», г. Рыбинск

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕЛЕНЫ ОХЛАДИТЕЛЯ ЗА ОТВЕРСТИЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Сопловые и рабочие лопатки газовых турбин являются наиболее теплонапряженными деталями ГТД. Для обеспечения их потребной температуры используется конвективно-пленочное охлаждение. При конвективном охлаждении холодный воздух циркулирует в полостях лопатки. Затем через специальные отверстия выдувается на внешние поверхности лопатки (входную кромку, спинку, корыто, выходную кромку) создавая защитную пелену и позволяя отеснить горячие газы от поверхности [1].

Пленочное охлаждение играет значительную роль в охлаждении лопаток газовых турбин. Работы по исследованию пленочного охлаждения, в основном, направлены на определение адиабатной эффективности пленочного охлаждения или коэффициента теплоотдачи [2]. Данные методы экспериментального исследования дают понимание только о тепловом состоянии объекта исследования. Однако, согласно исследованиям за местом вдува пелены охладителя образуется большое количество вихревых структур, негативно влияющих на формирование устойчивой газовой завесы.

Целью данной работы, является численное и экспериментальное исследование вихревой структуры за отверстием цилиндрической формы при изменении параметра вдува m от 0,5 до 1,5 (1).

$$m = \frac{\rho_c * V_c}{\rho_g * V_g}, \quad (1)$$

где ρ_c, ρ_g – плотности вторичного и основного потока; V_c, V_g - скорости вторичного и основного потока.

В обеспечении экспериментального исследования было выполнено численное моделирование с использованием SST модели турбулентности. В качестве граничных условий, на вход основного и вторичного потока задавались

полная температура и полное давление. Расход охладителя подбирался в зависимости от параметра вдува.

Экспериментальное исследование выполнено методом цифровой трассерной визуализации (PIV) в продольном и поперечном направлении истечения пелены охладителя на расстоянии одного калибра от места вдува. В ходе экспериментального исследования трассерами для визуализации засеивался только вторичный поток.

По результатам численного и экспериментального исследования было получено, что за отверстием цилиндрической формы отрыв защитной пелены от поверхности происходит при $m > 1$ (см. рис.1). Истечение пелены охладителя на всех режимах имеет нестационарный характер.

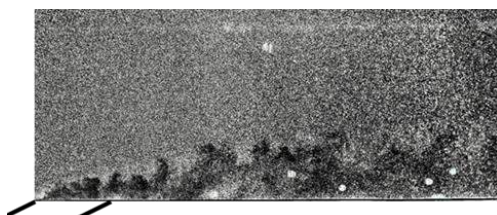


Рис.1. Визуализация истечения пелены при $m \approx 1$

На расстоянии одного калибра за местом вдува пелены охладителя на всех исследуемых режимах при параметре вдува m от 0,5 до 1,5 за отверстием цилиндрической формы наблюдаются почкообразные вихри, способствующие подмешиванию основного потока к защищаемой поверхности (см. рис. 2) и более быстрому снижению эффективности охлаждения.

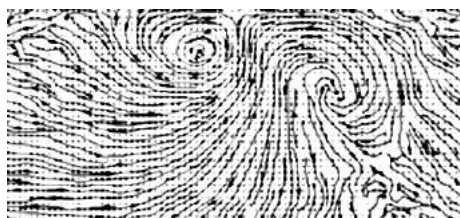


Рис.2. Структура течения на расстоянии 1 калибр от места вдува при $m \approx 1$ по результатам PIV эксперимента

Библиографический список

1. Локай, В.И. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов [Текст] / В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин. - М.; Машиностроение, 1985, -216с.
2. Saumweber, C. Effect of geometry variations on the cooling performance of fan shaped cooling holes/ C. Saumweber, A. Schulz// Proceedings of ASME Turbo Expo- 2008- Power for Land, Sea and Air. GT2008-51038.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00666

Коновалов И.А., Соколов А.Н., Щекин Д.В., Баринов А.А.
АО «ОКБМ Африкантов»

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА
ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ
И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА
НА ЗВУКОВОЕ ИСТЕЧЕНИЕ ВОДЯНОГО
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

На сегодняшний день во многих отраслях науки и техники широко известно явление критического истечения, при котором скорость потока достигает локальной скорости звука. В случае истечения двухфазной или недогретой до насыщения среды прогнозирование критического истечения существенно усложняется вследствие влияния наличия фазового перехода, возникновения метастабильности среды и быстротечности сопутствующих теплофизических процессов. В связи с этим, для нужд атомной энергетики в основном используются эмпирические и полуэмпирические корреляции, полученные на основе экспериментальных данных для некоторых наиболее распространенных типов каналов.

Вместе с тем, в опубликованных к настоящему моменту экспериментальных исследованиях не представлено количественных оценок того, насколько те или иные режимные и геометрические параметры влияют на критическое истечение. В связи с этим, данная работа посвящена выявлению статистических корреляций между режимными и геометрическими параметрами истечений, а также количественной оценке влияния этих параметров на критический массовый расход.

Для анализа были использованы экспериментальные данные, полученные в «ЭНИЦ» на стенде КС-1, которые включают в себя изучение истечения недогретой и насыщенной воды через каналы с различной геометрией входного участка [1], [2]. Для получения количественных оценок влияния режимных и геометрических характеристик исследуемых каналов (коэффициентов Соболя [3]), авторами настоящей работы были использованы методы корреляционного анализа и машинного обучения.

Проведенный анализ экспериментальных данных для каналов со скругленной входной кромкой показал сильное влияние геометрии входной кромки как на величину критической массовой скорости, так и на конечное давление в выходном сечении канала, которое устанавливается при критическом режиме истечения. С увеличением плавности входного участка происходит увеличение критической массовой скорости и снижение давления в выходном срезе канала. Дисперсия геометрических характеристик входного участка обуславливает приблизительно 32% общей дисперсии критической массовой скорости, в то

время как вклад дисперсий длины горловины находится на уровне 13% и 1% соответственно.

Сравнение результатов анализа экспериментальных данных для каналов с различной геометрией входа при одних и тех же режимных и геометрических параметрах показало, что для каналов со скругленной входной кромкой критическая массовая скорость приблизительно на 25% выше, чем для каналов с острой входной кромкой. С увеличением длины горловины эта разница асимптотически убывает.

Среди режимных параметров основной вклад в дисперсию критической массовой скорости вносится величиной недогрева среды на входе до температуры насыщения – 51 % от общего влияния режимных и геометрических параметров. Увеличение недогрева среды до температуры насыщения и уменьшение длины горловины канала приводит к тому, что противодавление, необходимое для установления критического режима истечения, снижается. В предельных случаях критическое отношение давлений может составлять 0.1, что значительно ниже общепринятого в инженерной практике отношения 0.5. Помимо этого, как и в работе [1], при анализе экспериментальных данных каналов с острой и скругленной входными кромками было обнаружено снижение критической массовой скорости при увеличении диаметра горловины канала.

Анализ экспериментальных данных показал, что использование параметра L/D в качестве масштабного фактора для описания каналов с критическим истечением, по-видимому, является несостоятельным в силу того, что для каналов со скругленной входной кромкой входящие в этот параметр величины оказывают на критическую массовую скорость меньшее влияние, чем другие режимные и геометрические характеристики. Аналогичный вывод был сделан в работе [3] для каналов с острой входной кромкой.

В заключение можно отметить, что для будущих экспериментальных исследований критического истечения через сопловидные и цилиндрические каналы, направленных как на расширение диапазона исследуемых режимных и геометрических параметров, так и уточнение уже имеющихся данных, исключительную важность имеет покрытие экспериментами условий, формируемых на входном участке.

Библиографический список

1. Кеворков Л.Р., Лутовинов С.З., Тихоненко Л.К. Влияние масштабных факторов на критический расход насыщенной воды из прямых труб с острой входной кромкой // Теплоэнергетика, № 7, 1977.
2. Тихоненко Л.К., Лобиков О.В., Дуполадова Н.Д., Самигуллина Р.А. Разработка и экспериментальное обоснование модернизации и совершенствования оборудования и оптимизации режимов работы АЭС с реакторами РБМК, ВВЭР и АСТ, ЭНИС, Электрогорск, Промежуточный отчет 1.375, 1990.

3. Сальтелли А., Соболев И.М. Анализ чувствительности нелинейных математических моделей // Математическое моделирование, Т. 7, № 11, 1995. С. 16-28.

УДК 621.039

**Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Курдюмов А.С., Чинак А.В.,
Светоносков А.И., Волков С.М., Евдокименко И.А.**

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, г.
Москва

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

ОСОБЕННОСТИ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ, СОСТОЯЩЕГО ИЗ ГАЗА И ТЯЖЕЛОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В отличие от хорошо изученных двухфазных течений воды и газа, газожидкостным течениям в жидких металлах ранее уделялось мало внимания. Для жидких металлов исследование процессов диспергирования газовой фазы производилось для процессов очистки металлов и сплавов, а также непрерывной выплавки стали. В связи с развитием реакторных установок со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями роль исследований совместного течения жидкого металла и газа существенно увеличилась. В РФ можно выделить ряд работ, проведенных в НГТУ им. Р.Е. Алексеева [1].

Большая разность плотностей между газом и жидким металлом создает большую плавучесть, действующую на газовую фазу и, соответственно, может повлиять на форму, размер и эволюцию пузырьков, движущихся в жидком металле, структуру и режимы газожидкостного течения. Для того, чтобы правильно уметь предсказывать поведение такой двухфазной среды, необходимо понять применимость существующих в настоящее время моделей двухфазного течения для описания поведения газовой фазы в жидком металле. Такое понимание, прежде всего, идет от постановки и проведения соответствующих экспериментальных исследований, результаты которых можно напрямую сравнивать с известными данными по течениям газа и жидкости.

Выполнены измерения двухфазного течения, состоящего из свинцового теплоносителя, находящегося при температуре 450 °С, и газовой фазы – аргона. Результаты измерений показали, что форма пузырей при движении в неподвижном жидком свинце соответствует формам пузырей, найденным ранее при их эволюции в свинцово-висмутовом теплоносителе с температурой 160 °С (см. Рисунок). Так, эволюция пузырей аргона в свинцовых теплоносителях при газосодержании менее 10 %, указывает на формирование в свинцовом теплоносителе эллиптических и пузырей газа в виде полусферических сегментов [2]. Увеличение локального газосодержания свыше некоторой пороговой величины,

вызываемое соответствующим увеличением расхода газа, приводит к формированию снарядной структуры течения, характеризующейся квазипериодическим движением достаточно длинных газовых образований в теплоносителе.

На основе анализа критериев подобия (чисел Рейнольдса, Этвеша и Мортонна [3]) установлено, что двухфазное течение в свинцовом теплоносителе подобно аналогичному течению в свинцово-висмутовом теплоносителе, что позволяет достоверно моделировать эволюцию газовых пузырей и структуру течения в жидком свинце, используя свинцово-висмутовый теплоноситель.

Выполнены исследования параметров восходящего двухфазного течения ТЖМТ – инертный газ в каналах различного диаметра с варьированием расходов газа и ТЖМТ. Получен массив данных по структуре двухфазного течения, гистограммам распределения скорости газовой фазы, размера пузырей газа в зависимости от расходов фаз, диаметра канала, объёмного газосодержания. Построена карта режимов двухфазного течения, состоящего из ТЖМТ и газовой фазы. Карта режимов построена по приведенным скоростям газовой и жидкой фаз. Определены границы существования пузырькового режима течения, снарядного режима течения и перехода течения в сильно неустойчивый пенный режим. Карта режимов является базой для анализа процесса миграции пузырьков в жидком металле.

Полученные данные обеспечивают подробной информацией разработчиков кодов о структуре и закономерностях двухфазного течения ТЖМТ + газовая фаза, режимам двухфазного течения и ходе процесса разогрева и плавления материала имитатора твэла в свинцовом теплоносителе.

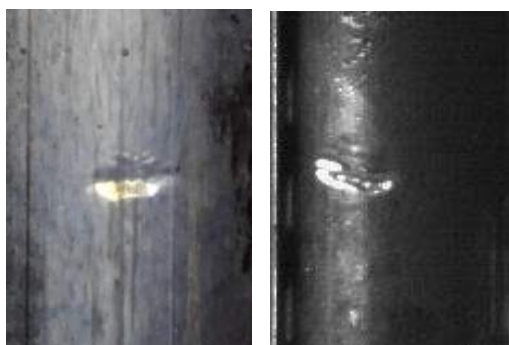


Рис. 1. Сравнение формы газового пузыря в жидком свинце (слева), $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в свинцово – висмутовом расплаве (справа), $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$

Библиографический список

1. Безносков А.В., Бокова Т.А., Новожилова О.О., Мелузов А.Г., Метринский Р.А., Новинский Э.Г. Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора в эксплуатационно-безопасных пределах в РУ с ТЖМТ // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2016. № 2. С. 154-162.

2. Mosunova, N.A., Alipchenkov, V.M., Pribaturin, N.A., Strizhov, V.F., Usov, E.V., Lobanov, P.D., Afremov, D.A., Semchenkov, A.A., Larin, I.A., Lead coolant modeling in system thermal-hydraulic code HYDRA-IBRAE/LM and some validation results // Nuclear Engineering and Design. 2020. Т. 359. С. 110463.
3. Mikityuk K., Coddington P., Chawla R. Development of a drift-flux model for heavy liquid metal/gas flow // J. Nucl. Sci. Technol. 2005. 42, P. 600–607

УДК 544.7

Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В., Дорожкин А.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА НА БИФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ НАГРЕВА

В связи с интенсивным развитием микроэлектронных устройств особенно остро стоит проблема отвода тепловых потоков высокой плотности от теплонагруженных элементов современных устройств и оборудования. Системы охлаждения могут базироваться на разных технологиях, например, однофазные или двухфазные. В последних теплообмен осуществляется в режимах кипения или испарения. Поэтому исследование процессов испарения «лежащих» капель особенно при высоких температурах поверхности актуально с точки зрения отвода тепловых потоков от современного микроэлектронного оборудования [1].

Известно, что свойства смачивания и шероховатость поверхности являются ключевыми факторами, влияющими на геометрическую форму и состояние капли, формирование и рост парового пузыря, а также на характеристики движения потоков в капле (конвекции). Гидрофильные участки способствуют интенсификации конвективных потоков, а гидрофобные являются центрами активного зарождения пузырьков [2]. Поэтому актуальным направлением является создание бифильных поверхностей, характеризующихся контрастным смачиванием.

В настоящей работе исследовано влияние свойств смачивания поверхностей нагрева на характеристики испарения капель жидкости.

Процедура изготовления бифильных поверхностей состояла из нескольких этапов. На первом этапе на полированных поверхностях алюминий-магниевого сплава формировалась многоуровневая иерархическая текстура системой на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера (IPG Photonics, Россия). На втором этапе текстурированные поверхности очищались в ультразвуковой ванне последовательно в изопропиловом спирте и дистиллированной сверхчистой воде. На третьем этапе выполнялась гидрофобизация поверхностей в условиях пиролиза углеводородсодержащей жидкости. На четвертом этапе на супергидрофобной поверхности лазерным излучением формировались

участки, характеризующиеся супергидрофильными свойствами. Конфигурации бифильных поверхностей представлены на рис. 1.

Процесс испарения капли на бифильной поверхности исследовался с использованием теневого оптического метода (сбоку) для регистрации изменения объема, контактного угла, диаметра и высоты капли. Верхняя оптическая система использовалась для исследования зарождения, роста и разрушения пузырей в капле. Micro-PIV метод использовался с целью получения конвективных потоков в испаряющейся капле. Кроме того, термопарой, вмонтированной в поверхность под местом размещения капли, регистрировалась температура охлаждения поверхности.

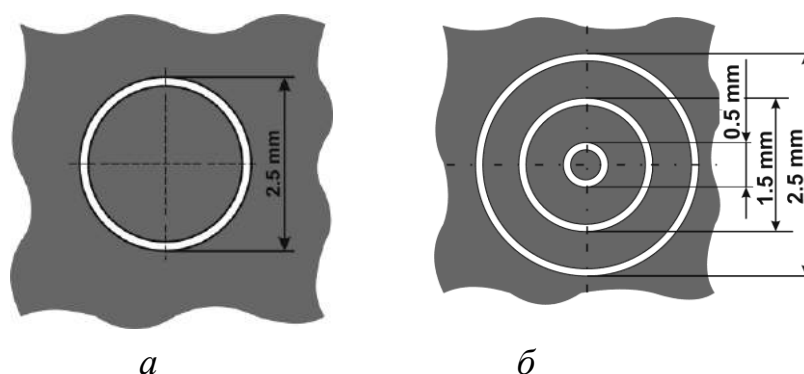


Рис. 1. Конфигурации бифильных поверхностей: (а) одно супергидрофильное кольцо; (б) три concentрических супергидрофильных кольца. Белым цветом обозначены участки с супергидрофильными свойствами, серым – с супергидрофобными.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что поверхность с бифильными свойствами охлаждается на $1,5 \pm 0,2^\circ \text{C}$ и $1,8 \pm 0,2^\circ \text{C}$ (с одним и тремя кольцами, соответственно) при испарении капли. На супергидрофильной поверхности температура снижается на 5°C . Однако, при дозировании капли воды на супергидрофильную поверхность жидкость полностью впитывается в микро- и нанотекстуру, размерами капли, в частности, площадью смачивания, невозможно управлять. Создание же различных конфигураций бифильных поверхностей позволяет управлять геометрическими характеристиками капель, изменять площадь смачивания, контактный угол в широких диапазонах.

Анализ полученных с помощью верхней оптической системы фотоснимков показал, что супергидрофильные области на бифильной поверхности являются центрами зарождения маленьких паровых пузырей. Крупные пузыри формируются преимущественно на супергидрофобных участках. Процессы испарения и кипения происходят интенсивнее на бифильной поверхности с тремя concentрическими кольцами. Сделан вывод о том, что разработанный способ получения поверхностей с контрастным смачиванием может быть использован для интенсификации процессов фазового перехода жидкостей, а также для управления движением (скорость и направление) жидкости.

Библиографический список

1. Chakraborty S., Rosen M.A., MacDonald B.D. Analysis and feasibility of an evaporative cooling system with diffusion-based sessile droplet evaporation for cooling microprocessors // Appl. Therm. Eng. 2017. V. 125. P. 104–110.
2. Xia Y., Gao X., Li R. Influence of Surface Wettability on Bubble Formation and Motion // Langmuir. 2021. V. 37. P. 14483–14490.

Исследование выполнено при поддержке программы развития ТПУ «Приоритет 2030» № 075-15-2023-375 (Приоритет-2030-НИП/ЭБ-114-375-2023).

УДК 532.517

Панкратов Е.В.

Северный (Арктический) федеральный университет
им. М. В. Ломоносова

ИССЛЕДОВАНИЯ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА И УГЛА ЗАКРУТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ВИХРЕЙ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ С НЕПОДВИЖНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

В кольцевых каналах около криволинейных поверхностей или при закрутке потока массовые силы в условиях неоднородности поля течения могут оказывать дестабилизирующее влияние, приводящее к возникновению вторичных вихрей [1]. При этом вторичные вихри позволяют существенно увеличить локальную интенсивность теплообмена за счет дополнительной диссипации тепловой энергии [2]. Это, в свою очередь, означает, что понимание и учет влияния вторичных вихрей имеют практическое значение при разработке более энергоэффективных теплообменных аппаратов.

В исследовании, изучающем неустойчивость потока, Игнатенко и др. [3] представили результаты моделирования течения в кольцевом канале возникающие при наличии осевого потока w_z и внутреннего вращения цилиндра ($\Omega_1 \neq 0$ и $\Omega_2 = 0$). В данной работе выделены следующие основные режимы течения потока: без ярко выраженных структур, с вихрями Тейлора, с непрерывными спиральными вихрями типа Гёртлера вблизи внутреннего цилиндра, с мелкомасштабными вихрями типа Гёртлера вблизи обеих стенок канала. При этом было показано, что жидкость, выбрасываемая центробежной силой с поверхности внутреннего цилиндра, образует навитые на цилиндр пары разнонаправленных вихревых ядер.

Попытка исследования вторичных вихрей в закрученном потоке с неподвижными поверхностями ($\Omega_1 = 0$ и $\Omega_2 = 0$) была предпринята Ким и Чой в работе [4]. В исследовании гидродинамическая неустойчивость в закрученном

потоке была вызвана импульсивным торможением вращающегося цилиндра. При этом показано, что при импульсном торможении в затухающем закрученном потоке развиваются вихри по типу Тейлора-Гёртлера.

Однако, несмотря на достаточно большой объем исследований, стоит отметить, что недостаточно изучено образование вторичных вихрей при неподвижных поверхностях кольцевого канала ($\Omega_1 = 0$ и $\Omega_2 = 0$) при постоянной начальной закрутке потока, что обуславливает актуальность данной работы.

Для изучения распределения компонентов скоростей и турбулентных пульсаций применялся лазерный доплеровский анемометр. Численное моделирование осуществлялось в трехмерной постановке с использованием программного комплекса ANSYS Fluent 15.0 с моделью турбулентности Shear Stress Transport $k-\omega$ и поправкой на кривизну линий тока.

Для случая, когда движение жидкости в кольцевом канале создается только вращением потока жидкости при неподвижных поверхностях кольцевого канала число Тейлора можно записать в следующем виде:

$$Ta = \frac{j \cdot \delta^3}{\nu^2} = \frac{w_\varphi \cdot \delta^3}{R_{cp} \cdot \nu^2}$$

где $\delta = R_1 - R_2$ – расстояние между цилиндрами, $R_{cp} = R_1 + R_2 / 2$ – средний радиус, $j = \omega^2 R_{cp}$ – центростремительное ускорение, $\omega = w_\varphi / R_{cp}$ – угловая скорость, w_φ – тангенциальная составляющая скорости, ν – кинематический коэффициент вязкости.

На рис.1 приведено распределение радиальной составляющей скорости при $Re_{вх} = 4 \cdot 10^3$ и $Ta_{вх} = 1,2 \cdot 10^6$ и λ_2 -критерия.

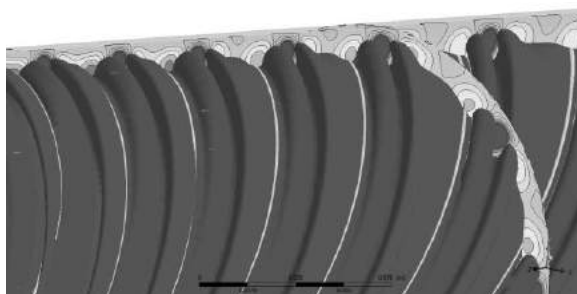


Рис. 1. Распределение радиальной составляющей скорости w_z и λ_2 -критерия

На начальном участке кольцевого канала происходит потеря устойчивости, которая приводит к образованию вторичных вихрей по типу вихрей Тейлора. Стоит отметить, что по мере продвижения потока к выходному сечению интенсивность вторичных течений снижается по длине за счет раскрутки потока и увеличения осевой составляющей скорости. При этом также снижается число Тейлора.

Из изложенного следует, что при определенных условиях в кольцевом канале с аксиально-лопаточным завихрителем могут образоваться тороидальные вторичные вихри, подобные вихрям Тейлора. При этом, как показано в преды-

дущих работах, вторичные вихри могут значительно влиять на интенсификацию теплообмена. Дальнейшие исследования позволят определить оптимальные параметры начальной закрутки для управления образованием вторичных течений в кольцевых каналах с неподвижными поверхностями.

Библиографический список

1. Щукин, В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. - 2-е изд., перераб. и доп. / В.К. Щукин. – М: Машиностроение, 1980.
2. Fénot, M. A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow / M. Fénot, Y. Bertin, E. Dorignac, G. Lalizel // International Journal of Thermal Sciences - INT J THERM SCI. – 2011. – Т. 50 – С. 1138–1155 – doi:10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.013.
3. Ignatenko, Y. On Spiral Turbulent Flow in an Annular Concentric Channel / Y. Ignatenko, A. Gavrilov, O. Bocharov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Т. 1867 – С. 012010 – doi:10.1088/1742-6596/1867/1/012010.
4. Kim, M.C. The onset of Taylor-Görtler vortices in impulsively decelerating swirl flow / M.C. Kim, C.K. Choi // Korean Journal of Chemical Engineering. – 2004. – Vol. 21 – № 4 – P. 767–772 – doi:10.1007/BF02705518.

УДК 62-144.3

Плотников Л.В., Шурупов В.А., Следнев В.А., Лаптев А.Д.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ СТАЦИОНАРНОГО ПОТОКА ВОЗДУХА В ЦИЛИНДРЕ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ЧЕРЕЗ ТАРЕЛЬЧАТЫЙ КЛАПАН

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС) остаются востребованными преобразователями энергии и используются практически во всех отраслях экономики от транспорта и энергетики до авиации. Повышение эффективности ПДВС связывают с совершенствованием газодинамики и теплообмена в цилиндре [1]. При этом, внутрицилиндровые процессы во многом определяются конструкцией системы газообмена и размерностью двигателя [2, 3].

Таким образом, цель данной работы заключалась в получении экспериментальных данных об уровне теплообмена в цилиндре ПДВС в процессе впуска

(заполнение цилиндра воздухом через тарельчатый клапан) при стационарном режиме течения для разных начальных условий.

Экспериментальный стенд для исследования локальной теплоотдачи состоял из впускной трубы, канала в головке цилиндра с тарельчатым клапаном и цилиндра. Для создания движения воздуха в рассматриваемой газодинамической системе использовался насос, откачивающий воздух, с возможностью регулирования расхода.

Локальный коэффициент теплоотдачи измерялся с помощью термоанемометра и теплового датчика [4]. Локальный коэффициент теплоотдачи измерялся в 4-х контрольных сечениях по высоте цилиндра H . В каждом контрольном сечении измерения проводились также в четырех точках, расположенных равномерно по диаметру цилиндра с углом 90° . Расход воздуха через систему контролировался датчиком термоанемометра во впускной системе. Также дополнительно измерялась скорость потока воздуха w в центре цилиндра в первом контрольном сечении на расстоянии $H = 11,5$ мм.

Изменение интенсивности теплоотдачи в цилиндре в 1-м контрольном сечении показано на рис. 1.

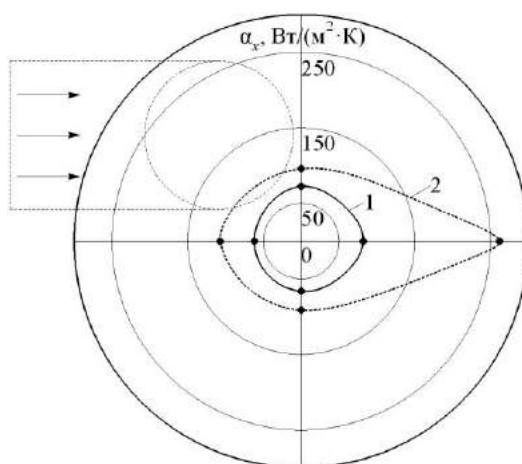


Рис. 1. Круговые диаграммы изменения локального коэффициента теплоотдачи α_x по диаметру цилиндра на высоте $H = 11,5$ м/с для процесса заполнения при разных скоростях потока воздуха w : 1 – $w = 12,8$ м/с; 2 – $w = 63,2$ м/с

Из рис. 1 видно, что по мере увеличения скорости круговая диаграмма коэффициента теплоотдачи становится неравномерной.

Следует отметить, что тарельчатый клапан расположен не в центре цилиндра, а со смещением (на рис. 1 впускная труба и клапан показаны пунктирными линиями). При этом ось клапана не является вертикальной, а имеет угол 11° . Такая конструкция системы газообмена свидетельствует о сложном, простран-

ственном течении потока воздуха в цилиндре после прохождения клапана и, соответственно, о неравномерном теплообмене.

В каждом контрольном сечении по высоте цилиндра осуществлялось осреднение локальных коэффициентов теплоотдачи для разных расходов через впускную систему (рис. 2).

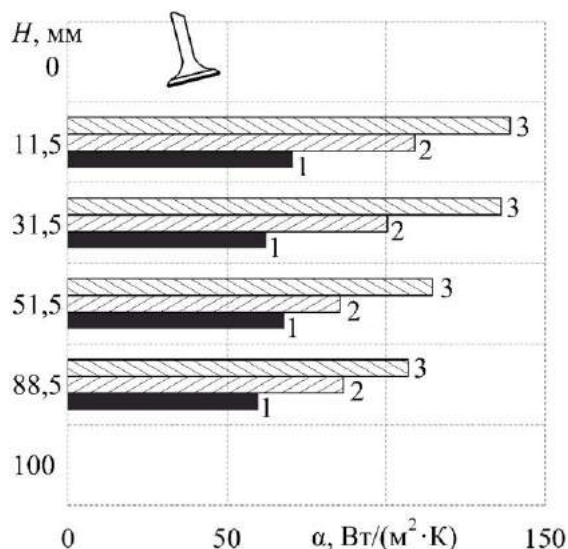


Рис. 2. Гистограммы изменения коэффициента теплоотдачи α по высоте цилиндра H для процесса заполнения при разных скоростях потока воздуха w : 1 – $w = 12,8$ м/с; 2 – $w = 38,2$ м/с; 3 – $w = 63,2$ м/с

Полученные данные расширяют базу знаний о теплообмене в цилиндре поршневых машин и создают основу для дальнейших исследований теплоотдачи в ПДВС с целью совершенствования внутрцилиндровых процессов.

Библиографический список

1. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 592 с.
2. Lee K., Bae C., Kang K. The effects of tumble and swirl flows on flame propagation in a four-valve S.I. engine // Applied Thermal Engineering. 2007. V. 27(11-12). P. 2122-2130.
3. Buschbeck M., Bittner N., Halfmann T., Arndt S. Dependence of combustion dynamics in a gasoline engine upon the in-cylinder flow field, determined by high-speed PIV // Experiments in Fluids. 2012. V. 53(6), P. 1701-1712.
4. Плотников Л.В. Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 204 с. 2020.

Работа выполнена при поддержке РФФ в рамках научного проекта 23-29-00022.

**Погорелов М.Д., Маров А.Р., Бокова Т.А., Волков Н.С., Сумин Р.В.,
Зырянова Т.К.**

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВИНЕЦ-ВИСМУТОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ОТНОСИТЕЛЬНО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ РАСПЛАВА

Для реакторных установок, использующих тяжёлые жидкометаллические теплоносители, одним из наиболее важных вопросов является поддержание в расплаве допустимого уровня концентрации растворённого кислорода, который существенным образом влияет на массоперенос вблизи границы раздела между тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем и конструкционным материалом и определяет протекание процессов кислородной коррозии и образования защитных оксидных плёнок на внутренних поверхностях оборудования и трубопроводов [1]. Обеспечение химического режима тяжёлого жидкометаллического теплоносителя в отношении растворённого кислорода играет особенно важную роль при обосновании безопасности и эксплуатационных режимов как исследовательских, так и промышленных реакторных установок, разрабатываемых в России и за рубежом. Для свинец-висмутowego теплоносителя, примерами таких установок могут быть СВБР, Myrrha, ALFRED и другие. Изучение возможностей применения свинец-висмутowego теплоносителя в различных диапазонах температур позволит расширить область его применения для различных промышленных и исследовательских систем в будущем.

В связи с этими положениями, были предложены и проведены первичные испытания на экспериментальном стенде ФТ-1 НГТУ, целью которых стало исследование особенностей технологии свинец-висмутowego теплоносителя при относительно низких температурах ($\sim 250^\circ\text{C}$).

Для свинец-висмутowego теплоносителя характерными процессами массообмена в пристенной области являются:

- 1) при низкой концентрации кислорода в расплаве, менее 10^{-10} для температуры 400°C – процесс растворения конструкционных материалов;
- 2) при средней концентрации кислорода в расплаве, порядка 10^{-7} – образование защитной оксидной плёнки;
- 3) при высокой концентрации кислорода в расплаве, более 10^{-4} – образование двухслойной оксидной плёнки, слабо выполняющей защитные функции [2].

Для низких температур расплава процесс коррозии, особую роль играет именно последний процесс, в свою очередь, коррозия, связанная с низкой концентрацией растворённого термодинамически активного кислорода в расплаве, практически исключается.

Исследования проводились в цикле испытаний подшипникового узла на экспериментальном стенде, при циркуляции теплоносителя в контуре с температурой 250° С под аргоновой газовой подушкой над теплоносителем без введения дополнительного водорода в контур.

Результаты проведённых в период испытаний измерений температуры свинец-висмутового теплоносителя и термодинамической активности кислорода в контуре представлены на графике (рис. 1).

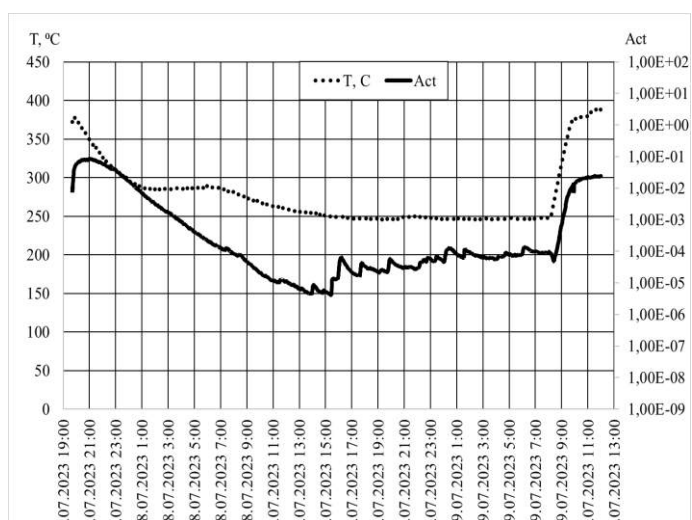


Рис. 1. Графики изменения температуры и активности ТЖМТ в период 07.07.2023 19:40 – 09.07.2023 12:00

Полученные таким образом результаты могут быть использованы для повышения эффективности алгоритмов контроля термодинамической активности для реакторных установок со свинец-висмутовым теплоносителем на быстрых нейтронах и субкритических реакторов, управляемых ускорителем при относительно низких температурах расплава во всех режимах эксплуатации.

Библиографический список

1. Лаврова О.В., Легких А.Ю., Термодинамика равновесных состояний и подходы к анализу массопереноса в металлооксидных системах // Известия вузов. Ядерная энергетика 2020. №2. С. 39–51
2. Безносков А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике. – М.: ИздАТ, 2007. – 432 с.

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2023-0005 «Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

УДК 536.24

Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А.
НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА СЖИМАЕМЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

Эффект энергоразделения Эккерта-Вайзе [1-4] заключается в значительном уменьшении температуры стенки в потоке сжимаемого газа при поперечном обтекании цилиндра в области задней критической точки, а также в следе за плохо обтекаемыми телами (цилиндр, ребро, ступенька, лопатки турбомашин) [3-7]. По-видимому, впервые данный результат был опубликован в работе Хилтона У.Ф. [1]. Было отмечено, что температура задней стенки цилиндра практически равняется статической температуре набегающего потока в то время, как в передней части температура близка к температуре торможения. Результат был подтвержден в ряде последующих работ, а также интенсифицирован за счет взаимного влияния пары круговых цилиндров [9,10].

В данной работе представлены результаты исследования поперечного обтекания цилиндра дозвуковым потоком воздуха, полученные методом PIV (система Полис) и инфракрасной термографии (ИК-камера InfraTEC IR8855). Исследование проведено на стационарном режиме при числе Маха набегающего потока 0.6, температуре торможения 15° С, давлении торможения 145 кПа.

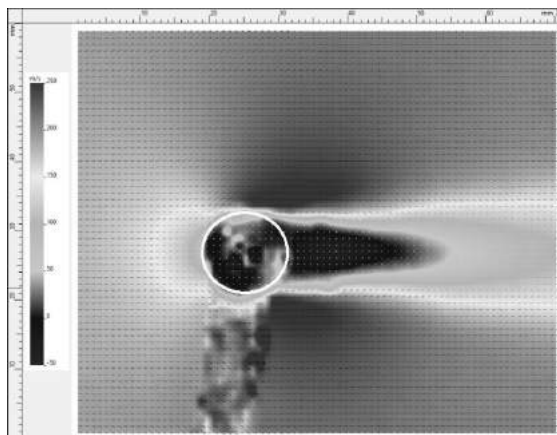


Рис. 1. PIV-визуализация обтекания цилиндра (поток слева направо, подсветка сверху)

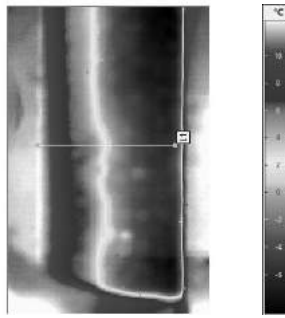


Рис. 2. Термографический снимок обтекания цилиндра (поток слева направо)

На рис. 1 представлено осредненное поле продольной компоненты скорости при обтекании цилиндра. Видна характерная область следа с зоной обратных токов. На рис. 2 представлен термографический снимок обтекаемого цилиндра. На визуализации выделяется область отрыва потока со сниженной температурой стенки в окрестности задней поверхности цилиндра.

Библиографический список

1. Давыдов Ю.И., Дзюбенко Б.В., Дрейцер Г.А. и др. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы // Под ред. Ивлева В.М. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
2. Kuznetsov V.V. Heat and mass transfer with phase change and chemical reactions in microscale // Proc. Int. Heat Trans. Conf. IHTC14. Washington, D.C., 2010. Paper 22570.
3. Kuznetsov V.V., Kozlov S.P. Modeling of methane steam reforming in a microchannel with a heat flow distributed in length // J. Eng. Therm. 2008. V. 17, No. 1. P. 53–59. 2.
4. Суржииков С.Т. Перенос излучением в неоднородном слое // ТВТ. 1997. Т. 35, № 3. С. 1–2.
5. Hilton W.F. Thermal effects on bodies in air streams // Proceedings of the Royal Society of London, series A. 1938. V. 168. P. 43-57.
6. Eckert E.R.G. Energy separation in fluid streams // Int. Commun. Heat Mass Transf., 1986. V. 13. No. 2. P. 127–143.
7. Ryan L.F. Experiments on aerodynamic cooling // PhD thesis. Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, 1951.
8. Sanitjai S., Goldstein R.J. Forced convection heat transfer from a circular cylinder in cross flow to air and liquids // Int. J. Heat Mass Transf., 2004. No. 47. P. 4795–4805.
9. Popovich S.S., Kiselev N.A., Zditovets A.G., Vinogradov Y.A. Experimental study of the adiabatic wall temperature of a cylinder in a supersonic cross flow // J. Phys.: Conf. Ser., 2021. V. 2039. No. 012029.

10. Popovich S.S. Aerodynamic cooling of the wall in the trace of a supersonic flow behind a backward-facing ledge // Fluid Dynamics, 2022. V. 57. N. 1. P. 57–64.
11. Попович С.С., Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С. Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое // Теплофиз. выс. темп., 2022. Т. 60. № 3. С. 455–480.
12. Aleksyuk A.I., Osiptsov A.N. Direct numerical simulation of energy separation effect in the near wake behind a circular cylinder // Int. J. Heat Mass Transf., 2018. V. 119. P. 665–677.
13. Aleksyuk A.I. Influence of vortex street structure on the efficiency of energy separation // Int. J. Heat Mass Transf., 2019. V. 135. P. 284–293.
14. Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Попович С.С. Экспериментальное исследование энергоразделения при поперечном обтекании пары круговых цилиндров сжимаемым потоком воздуха // Изв. РАН. МЖГ, 2023. № 2. С. 102–112.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-79-10213).

УДК 621.438

Пьянкова С.Ю.

ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБИНЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ГТД

Разработка высокотемпературных турбин, входящих в состав современных газотурбинных двигателей является не просто актуальной, а первостепенной задачей авиационной промышленности в современных условиях. Создание высокоэффективной системы охлаждения турбин и обеспечение заявленного ресурса основных деталей турбин - одна из основных задач проектирования ГТД.

Проверка работоспособности конструкции выполняется экспериментальным путем в составе газогенератора и полноразмерного двигателя. Но еще до проведения испытаний с использованием современных методов численного моделирования можно подобрать оптимальную конструкцию, обеспечивающую необходимые требования, предъявляемые к узлу турбины.

В работе представлена расчетная модель турбины низкого давления (ТНД) в трехмерной постановке для проведения расчетов методом сопряженного теплообмена.

Объектом исследования являются внутренние полости ТНД и детали ротора ТНД современного авиационного двигателя. В рамках проведения численного исследования были смоделированы:

1. Проточная часть ТНД (3 ступени), внутренние полости ротора ТНД, лабиринтные уплотнения с сотовыми вставками, детали турбины - диски, лопатки, кольца-лабиринты, конус, элементы крепления.

2. Детально смоделированы перетечки по замковым соединениям рабочих лопаток и дисков турбины. Подобная детализация модели позволяет с высокой точностью оценивать локальные эффекты течения газовой смеси в замковых соединениях и их тепловое состояние, для последующего создания высокоточных прочностных моделей.

3. В модели учтена возможность изменения величины радиального зазора лабиринтных уплотнений для каждого из рассчитываемых режимов. Для корректного расчета гидравлических характеристик лабиринтных уплотнений полностью смоделирована ячеистая структура сот, что в сочетании с использованием фактических величин радиальных перемещений ротора и статора по нестационарному полетному циклу из $2D$ термомеханической модели двигателя позволяет с максимальной точностью оценивать гидравлические характеристики лабиринтных уплотнений и системы охлаждения ТНД в целом. В первую очередь данный подход актуален для ЛУ под сопловыми аппаратами ТНД, определяющими величину перетечки газа вдоль роторных деталей, их тепловое состояние и ресурс.

Для выполнения $3D$ тепло-гидравлических расчетов методом сопряженного теплообмена для газовой среды построена неструктурированная тетраэдрическая сетка с призматическим подслоем, для металла - тетраэдрическая сетка в ПК ICEM CFD 18. Суммарная размерность сеточной модели расчетной области составляет ≈ 112 млн. узлов. Расчеты выполнялись в ПК Ansys CFX 19.2 в стационарной постановке с помощью SST модели турбулентности, адаптированной на ПАО «ОДК-Сатурн» для решения данного класса задач и по валидированной методике на основе имеющегося опыта создания авиационных ГТД в данном классе тяги.

В результате анализа выполненного $3D$ тепло-гидравлического расчета смоделированной турбины получено:

1. Детальное распределение параметров среды (давление и температура) в междисковых полостях и проточной части ТНД.

2. Структура течения в междисковых полостях, коэффициенты закрутки и теплоотдачи, которые необходимы для настройки $2D$ тепло-гидравлических моделей.

3. Концентрация газовой среды, для оценки затекания горячего газа из проточной части в полости турбины, и дальнейшее обеспечение однозначного наддува осевых зазоров на всех режимах двигателя.

4. Тепловое состояние и эффективность охлаждения дисков, замкового соединения рабочего колеса, сопловых и рабочих лопаток, которое необходимо для выполнения прочностных расчетов.

Анализ результатов данной работы дает возможность до проведения эксперимента выявить проблемные зоны конструкции и просчитать оптимальные

варианты конструкции, а также выполнять корректировку проектировочных $1D$ и $2D$ гидравлических и тепловых моделей. Разработанная численная модель является частью цифрового двойника перспективного авиационного двигателя и тесно взаимодействует с $2D$ термомеханической моделью двигателя.

Результаты расчетов тепло-гидравлических характеристик, полученные на данной модели, используются на предприятии ПАО «ОДК-Сатурн» при прочностном и ресурсном анализе конструкции деталей турбин, а так же при анализе эффективности системы охлаждения.

Библиографический список

1. Виноградов К.А., Добровольский И.С., Пятунин К.Р., Крупин В.П., Пиотух С.М.. Комплексная модель для расчетно-экспериментальной оценки теплового состояния РЛ 1ст. ГТД-110. // LXIII научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Фундаментальные проблемы локализации производства в России деталей горячего тракта ГТУ, использующихся в национальной экономике России». Сборник докладов, 2016г С. 42-43.
2. Виноградов К.А., Добровольский И.С., Пятунин К.Р., Крупин В.П., Пиотух С.М.. Комплексная модель для оценки теплового состояния первой ступени ГТД-110.// Турбины и Дизели 2017, № 4 (июль-август). С. 4–7.

УДК 536.248.2:532.5.013.12: 681.12

Серяков А.В., Конькин А.В., Алексеев А.П.
ООО РУДЕТРАНССЕРВИС, г. Великий Новгород

ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛЕНКИ КОНДЕНСАТА В КОРОТКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ ПРИ ЗАКРУЧИВАНИИ ПАРОВОГО ПОТОКА

Закручивание парового потока в выполненном в виде сопла Лавалья паровом канале коротких тепловых труб (ТТ), снабженных датчиками для измерения толщины и температуры пленки жидкого конденсата при больших температурных напорах на испаритель, приводит к интенсификации конденсации пара на плоской поверхности верхней крышки ТТ, и увеличению коэффициента теплопередачи $K_{ТТ}$. Частичная азимутальная закрутка струйного парового потока создается с помощью наклонных инжекторных каналов диаметром 1 mm в плоском многослойном сеточном испарителе, с углом наклона φ относительно продольной оси в азимутальном направлении, в диапазоне $0^\circ < \varphi < 60^\circ$. Без закрутки потока пара пульсации толщины и температуры пленки конденсата не превышают уровня шума.

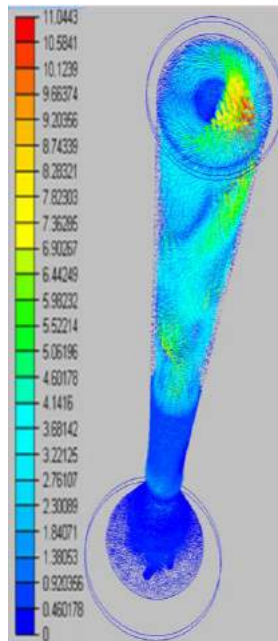


Рис. 1. Закрученный режим течения влажного пара в *ТТ*. Угол наклона инжекторных паровых каналов к продольной оси в азимутальном направлении $\varphi = 30^\circ$. Перегрев испарителя относительно температуры кипения диэтилового эфира задан равным $\delta T = T_{ev} - T_B = 15\text{K}$, скорость пара в m/s

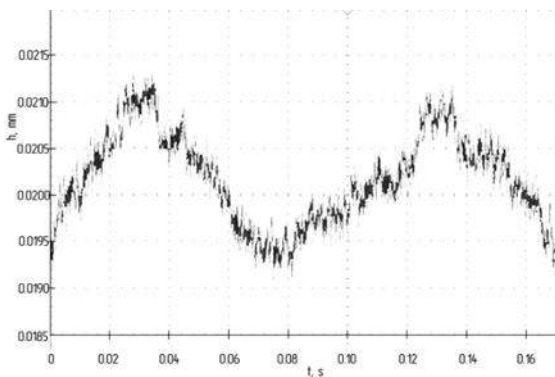


Рис. 2. Осциллограммы измеренных пульсаций толщины пленки диэтилового эфира: $h \sim 0.02 \text{ mm}$ на поверхности измерительного емкостного датчика, совпадающей с гладкой поверхностью конденсации *ТТ* [1]. Перегрев испарителя относительно температуры кипения диэтилового эфира $\delta T = 15.45 \pm 0.01\text{K}$

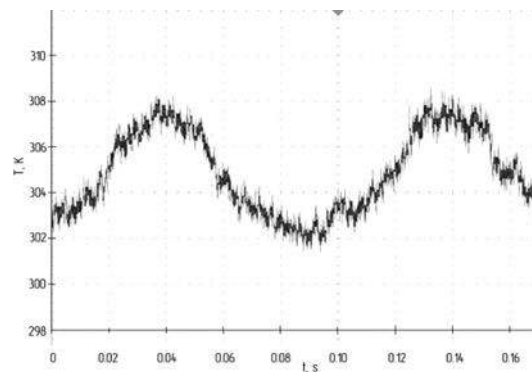


Рис. 3. Осциллограммы измеренных с помощью микротермистора пульсаций температуры пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации внутри *ТТ*. Перегрев испарителя по отношению к температуре кипения диэтилового эфира составляет $\delta T = 15.45 \pm 0.01\text{K}$. Частота пульсаций $\text{fpuls} \sim 10.34 \text{ Hz}$

1. Seryakov AV The study of condensation processes in short heat pipes// ENGINEERING 2017, N 9, pp. 190-240.

Стрижак П.А., Высокоморная О.В., Антонов Д.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МИКРО-ВЗРЫВА КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ

Для интенсификации тепломассообмена капель в газопарожидкостных потоках необходимо реализовать их интенсивное измельчение. Системы первичного распыления жидкостей позволяют получить размеры капель, как правило, недостаточные для их полного испарения в рамках одного технологического цикла. Требуется доизмельчение в объеме камер сгорания, реакторах, смесительных установках и др. К числу перспективных технологий вторичного доизмельчения капель относится базирующаяся на микро-взрыве и паффинге. В статье выполнен анализ критических (необходимых и достаточных) условий реализации эффекта микро-взрывного измельчения двухкомпонентных капель, содержащих воду и жидкий горючий компонент [1-3].

Обосновано, что определяющее значение имеет достигаемая скорость перегрева воды в объеме исходной капли. Приведены оценки критических (минимальных) значений входных параметров для стабильной микро-взрывной фрагментации капель жидкостей. Применены малоинерционные системы регистрации температуры на границе раздела жидкость-топливо на базе высокочувствительных термопар и оптического программного-аппаратного комплекса, реализующего метод Planar Laser Induced Fluorescence. Получены значения безразмерных критериев, соответствующие микро-взрывному распаду капель. Данные критерии определяют условия перегрева области контакта жидкостей, баланс сил внутреннего давления и поверхностного натяжения, увеличение объема капли вследствие интенсивного парообразования.

Представленные результаты безразмерной критериальной оценки условий микро-взрывного дробления бинарных капель позволяют обобщить данные об условиях распада капель разного состава. Применены числа Онезорге, Бонда, Кутателадзе, Лапласа, Шиллера, Вебера. Вычислены значения безразмерного критерия микро-взрыва. Выделено раздельное и совместное влияние сил инерции, вязкости, поверхностного натяжения, теплового, геометрического, деформационного и других факторов на критические условия паффинга и микро-взрыва капель. С применением полученных карт режимов и выражений для описания границ переходов между ними можно достоверно прогнозировать

условия стабильной реализации фрагментации капель для использования во многих технических приложениях.

Критерии микро-взрыва

Критерий 1. Перегрев границы «вода/топливо» базируется на превышении температуры в зоне соприкосновения двух компонентов капли значения, соответствующего состоянию насыщения воды. Большинство современных моделей микро-взрывного распада основаны на предположении, что микро-взрыв инициируется, когда температура на границе раздела «вода/топливо» превышает температуру кипения воды (т.е. наступают условия метастабильного состояния) [4, 5].

Критерий 2. Изменение баланса сил на поверхности капли. Считается, что до момента микро-взрывного распада силы внешнего давления и поверхностного натяжения внешней оболочки капли превышают давление водяного пара в ее центральной части.

Критерий 3. Критические размеры капли вследствие ее наполнения пузырями пара. При численном моделировании нагрева перед микро-взрывным распадом с использованием этого критерия необходимо задавать скорость межфазного переноса, значение которой обычно получают экспериментально.

Для объединения двух, основанных на схожем подходе к идентификации микро-взрыва, критериев в один результирующий, проведена оценка независимости параметров, входящих в выражения для Ku и ΔP . С использованием Питеоремы выполнен анализ размерностей, в результате которого переменными комплексами, определяющими критические условия возникновения микро-взрывного распада, являются: $(\Delta P/P_{sat})$, $(R_d \cdot P_{sat}/\sigma_f)$, (P_{atm}/P_{sat}) . Таким образом, в качестве объединенного критерия микро-взрывного распада двухкомпонентных капель, основанного на учете степени перегрева границы раздела компонентов, может быть предложен критерий $ME = F(\Delta P/P_{sat}, R_d \cdot P_{sat}/\sigma_f, P_{atm}/P_{sat})$.

$$ME = \frac{R_d (P_{sat})^3}{(2\sigma_f P_{atm}) / R_d + \sigma_f (P_{atm})^2}, \quad (1)$$

где R_d – радиус капли, м; P_{sat} – давление насыщенного пара, Па; σ_f – коэффициент поверхностного натяжения топлива, Н/м; P_{atm} – атмосферное давление, Па.

Библиографический список

1. Antonov D.V., Shlegel N.E., Strizhak P.A., Tarlet D., Bellettre J. Energy analysis of secondary droplet atomization schemes // Int. Commun. Heat Mass Transf. 2020. V. 117. 104666.
2. Zhou Z.F., Li W.Y., Chen B., Wang G.X. A 3rd-order polynomial temperature profile model for the heating and evaporation of moving droplets. Appl. Therm. Eng. 2017. V. 110. P. 162–170.

3. Yadav A., Chowdhury A., Srivastava A. Gas-phase thermography of droplet combustion and its application to characterize nanofuels. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2021. V. 120. 105054.
4. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The micro-explosive fragmentation criteria of two-liquid droplets. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2022. V. 196. 123293.
5. Fu W.B., Hou L.Y., Wang L., Ma F.H. A unified model for the micro-explosion of emulsified droplets of oil and water. *Fuel Process. Technol.* 2022.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 23-69-10006).

УДК 620.962.91

Суворин И.Д., Ершов М.И., Тупоногов В.Г., Рыжков А.Ф.

Уральский Федеральный университет

Лаборатория новых энергетических технологий

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВИТАНИЯ ЧАСТИЦ НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ

На примере опила сосны и его огарка выполнено экспериментальное исследование поведения частиц разной геометрии, плотности и шероховатости, применительно к условиям в поточном газогенераторе с уносом.

Полученные данные сопоставлены с известными корреляциями, применяемыми при проектировании установок пневмотранспорта и кипящего слоя.

Эксперимент проводился в стеклянной трубке внутренним диаметром 12,3 мм. Расход воздуха в трубке регулировался шаровым краном. Для опилок интервал числа Рейнольдса по полученным скоростям составил 130-910. Для огарков – 85-440.

Характеристики опилок представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики опила сосны

Номер частицы	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Эквивалентный диаметр, мм
1	1,046	0,763	0,225	0,700
2	1,188	0,61	0,545	0,910
3	0,972	0,909	0,595	1,001
7	2,705	0,903	0,341	1,167
5	1,707	0,897	0,453	1,098
4	1,931	0,724	0,716	1,241
6	4,011	0,42	0,34	1,030
8	3,042	0,685	0,552	1,300
9	3,623	0,831	0,491	1,413

На основании упомянутых характеристик частиц были рассчитаны их теоретические скорости витания по формулам Тодеса, Святкова, Успенского и Гансера (табл. 2).

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные скорости витания опила сосны

Номер частицы	Экспериментальная скорость витания, м/с	Скорость витания по Тодесу, м/с	Скорость витания по Святкову, м/с	Скорость витания по Успенскому, м/с	Скорость витания по Гансеру, м/с
1	1,098	1,035	1,209	1,564	1,693
2	0,618	0,968	1,876	2,231	2,285
3	0,755	1,054	1,959	2,509	2,111
7	0,549	1,700	1,487	1,789	2,805
5	1,235	1,364	1,712	2,520	2,612
4	1,098	1,268	2,146	3,131	2,980
6	0,961	1,448	1,485	2,030	3,106
8	0,824	1,530	1,888	2,576	3,289
9	0,824	0,824	1,781	2,456	3,389

Характеристики огарков опилок представлены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики огарков опила сосны

Номер частицы	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Эквивалентный диаметр, мм
1	2,055	0,796	0,725	1,313
2	1,707	0,903	0,348	1,008
3	1,302	1,074	0,276	0,903
4	1,548	1,008	0,337	1,001
5	0,948	0,828	0,391	0,837
6	1,311	0,738	0,453	0,942
7	1,368	1,026	0,478	1,086
8	1,044	0,843	0,606	1,006
9	1,194	0,936	0,362	0,918

Результаты расчетов для огарков представлены в табл. 4.

Таблица 4. Экспериментальные и расчетные скорости витания огарков опиала сосны

Номер частицы	Экспериментальная скорость витания, м/с	Скорость витания по Тодесу, м/с	Скорость витания по Святкову, м/с	Скорость витания по Успенскому, м/с	Скорость витания по Гансеру, м/с
1	0,895	1,527	1,876	2,433	0,480
2	0,899	1,062	1,283	1,889	0,618
3	0,861	0,947	1,082	1,347	0,618
4	0,905	1,045	1,299	1,777	0,686
5	0,645	1,125	1,310	1,46	0,618
6	0,715	1,210	1,445	1,81	0,686
7	0,852	1,243	1,421	1,866	0,549
8	0,679	1,398	1,693	1,701	0,618
9	0,769	1,083	1,285	1,614	0,686

На расчетные скорости наибольшее влияние оказывают длина и толщина частиц. Полученные расхождения экспериментальных и расчетных значений показывают, что приведенные зависимости Тодеса, Святкова, Успенского и Гансера требуют уточнений для более полного учета параметров опилок.

В дальнейшем планируется уточнить влияние размеров на расчетные скорости, а также проверить зависимость расчетной скорости от шероховатости частиц. Кроме того, планируется выполнить эксперименты для сферических частиц различных материалов и также сравнить полученные результаты с вышеупомянутыми формулами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

УДК 621.039

**Сумин Р.В., Бокова Т.А., Мелузов А.Г., Волков Н.С., Маров А.Р.,
Зырянова Т.К., Погорелов М.Д.**

**ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА УЧАСТКАХ ТРАСС С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ В СРЕДЕ ТЯЖЕЛОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

На данный момент расчетные методики основаны на формулах для водяного теплоносителя, что неприемлемо из-за специфики ТЖМТ. Для создания

адекватных методов необходимо создать базу данных коэффициентов гидравлических сопротивлений для потока ТЖМТ. Для проведения исследований характеристик гидравлических трасс с использованием ТЖМТ требуются разработка и монтаж соответствующих стендов.

В пристенной области «ТЖМТ-конструкционный материал» (см. рис. 1) протекают процессы, которые оказывают существенное влияние на гидродинамику ТЖМТ [1].

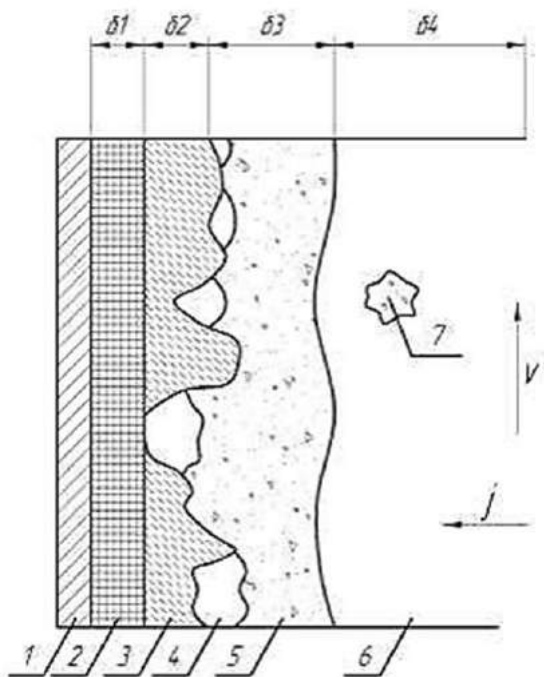


Рис. 1. Схема пристенной области контакта твердого и жидкого металла:

1 – сталь; 2 – оксидное покрытие; 3 – слой рыхлых отложений, слабо сцепленных с оксидным покрытием; 4 – газовая фаза (вследствие несмачивания теплоносителем оксидной поверхности); 5 – диффузионный слой пограничного турбулентного слоя, обогащенный примесями; 6 – пограничный турбулентный слой; 7 – частицы примесей, находящиеся в потоке теплоносителя вблизи пристенной области 5

К таким процессам можно отнести:

- 1) формирование оксидных покрытий на поверхностях конструкционных материалов, которые не смачиваются теплоносителем;
- 2) концентрирование частиц соединений компонентов сталей и теплоносителя, в пристенной области, поступающих в теплоноситель и контур из различных источников;
- 3) формирование полостей между конструкционным материалом и теплоносителем, заполненных защитным газом.

Большое влияние на структуру потока ТЖМТ оказывают значительно более высокая плотность и малая кинематическая вязкость по сравнению с традиционными теплоносителями. На данный момент подтверждена применимость стенда ФТ-5 (см. рис. 2) для определения гидравлических потерь на водяном теплоносителе.

В ходе дальнейших экспериментальных исследований гидравлики на свинцовом теплоносителе планируется получить массив данных, который необходим для создания адекватных расчетных методик для ТЖМТ.

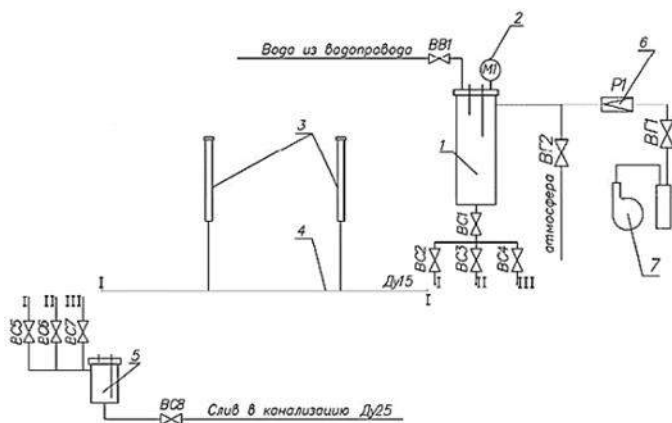


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда ФТ-5 на этапе подтверждения применимости стенда: 1 – напорная емкость; 2 – манометр; 3 – отжимные бачки; 4 – экспериментальный участок; 5 – расходомерная емкость; 6 – редуктор газовый; 7 – компрессор; (I, II, III) – Движение теплоносителя в зависимости от исследуемых участков.

1. Безносков, А.В. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике/ А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков М.: ИзДАТ, 2007 г. - 434 с.

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE–2023–0005 «Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

УДК 53.096

**Павлов Г.И., Ваньков Ю.В., Теляшов Д.А., Мукаддаров А. А.,
Зайнутдинова Д. А.**

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ РЕЗИНЫ В ИНЕРТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

При утилизации шин наиболее широко распространен метод пиролиза. Пиролиз может быть высокотемпературным и низкотемпературным. В плане практического применения в экологии наиболее предпочтительным является низкотемпературный пиролиз, который можно реализовать на простых и недорогих установках-ретортах. Установки низкотемпературного пиролиза имеют два существенных недостатка: низкую производительность; цикличность про-

цесса. Низкая производительность обусловлена тем, что, нагрев отходов происходит в замкнутом объеме через стенки реторты. При таких условиях время нагрева перерабатываемого материала до температуры разложения может достигать от 5 до 12 часов. Прямая передача тепла от нагретых газов нагреваемым отходам – инертными газами (продуктами сгорания, азотом, диоксидом углерода и т. д.), с регулируемыми параметрами, является более выигрышным, чем через стенку. Несмотря на это, установки пиролиза ретортного типа используются чаще. По данным литературного анализа сдерживающим фактором развития безретортных технологий является отсутствие научной базы [1,2]. Известно, что в составе пиролизных газов и жидкостей, получаемых из резины, может присутствовать сера и ее производные. В работе [3] авторы теоретически обосновали, что оптимальным температурным уровнем для скорости протекания пиролиза резины является 430°C , при котором содержание серы в продуктах минимально. Цель работы заключалась в получении новых данных по низкотемпературному пиролизу резины инертными газами, в качестве которых использовались продукты сгорания пропана. При проведении исследований решались следующие научные задачи: установление зависимости уменьшения массы резины от времени воздействия инертных газов с разными значениями температур; определение влияния температуры инертных газов на содержание серы в твердом остатке.

Исследование проводилось на резине одного и того же типа и при начальных параметрах близких друг к другу (начальная масса, температура, влажность). Метод исследований – экспериментальный. По экспериментальным данным была построена зависимость уменьшения массы резины от полного времени протекания процесса пиролиза для заданных температур инертных газов (рис.1.)

Концентрация элементной серы в твердых остатках определялась на абсолютно сухую навеску (% масс.) на элементном анализаторе SKIC 5E - CHN2200 с инфракрасным модулем SE-IRSII (рис. 2).

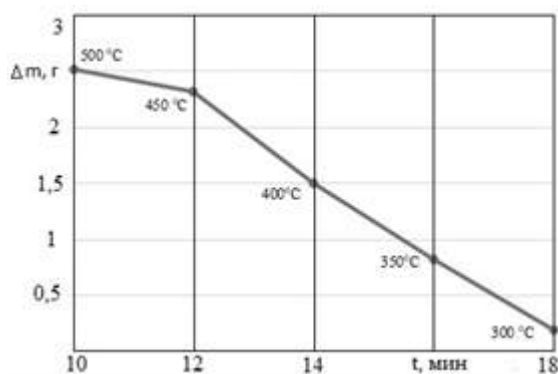


Рис.1. График зависимости уменьшения массы резины от полного времени протекания процесса пиролиза для заданной температуры инертного газа

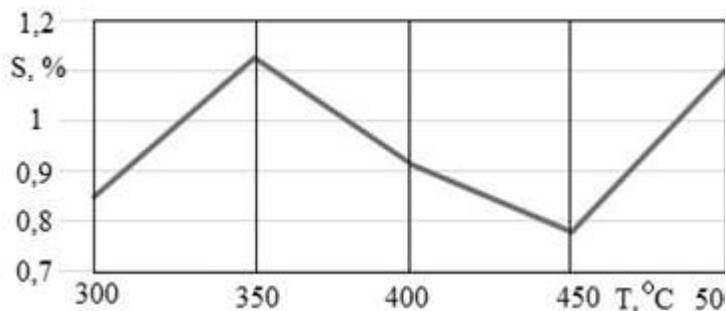


Рис.2. График зависимости содержания элементной серы в твердом остатке от температуры инертного газа

Выводы: наиболее благоприятными температурными режимами по скорости протекания пиролиза в нагретой инертной среде являются 450 и 500 °С. Средняя скорость протекания пиролиза на стенде равнялась 0,02 кг/ч, что в 6 раз больше скорости пиролиза в реторте (0,003 кг/ч). Следует отметить важный факт, что при таких температурах элементной серы в твёрдом остатке практически остается неизменным. Независимо от температуры инертного газа при взаимодействии нагретых газов с резиной существует время выхода пиролитического процесса на регулярный режим. Это время зависит от температуры инертного газа.

Библиографический список

1. Deinma T. Dick., Oluranti Agboola., Augustine O. Ayeny. Pyrolysis of waste tyre for high-quality fuel products: A review // AIMS Energy. 2020. V. 8(5). P. 869-895.
2. Макаров А.В. Некоторые аспекты рециклинга изношенных автомобильных покрышек методом пиролиза // Вестник ТОГУ. 2008. № 1(8). С. 247-258
3. Boris Samarskiy. Analysis of modernization of tire recycling machine for improvement of environmental sustainability and feasibility // Degree Program in Environmental Engineering. 2014. P. 1-70.

Работа поддержана РФФ (грант №075-03-2023-291/1).

УДК 621.9

Терехов В.И., Терехов В.В., Филиппов М.В., Чохар И.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

БИ-СТАБИЛЬНОСТЬ КОЛЬЦЕВЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУЙ. ФИЗИКА ЯВЛЕНИЯ И ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Гидродинамическая би-стабильность, наблюдаются в закрученных струях [1], при взаимодействии вихря с плоскостью [2,3], а также в кольцевых импактных струях [4,5]. В этих случаях при одних и тех же исходных параметрах могут существовать два режима течения, со структурами, сильно отличающимися друг от друга. Причиной би-стабильности является, как правило, неустойчивость возвратных течений в окрестности оси струи, в результате чего может реализовываться «сомкнутый», либо «разомкнутый» режимы. В первом случае возвратное течение направлено от периферии к центру, тогда как во втором, наоборот, от центра к периферии. Эти режимы могут существовать достаточно долго и затем спонтанно переходить от одного к другому. При этом данный переход имеет гистерезисный характер, поскольку параметры течения, например

давление на стенке или теплоотдача отличаются в зависимости от направления перехода [3,5].

Одним из наиболее перспективных вариантов с точки зрения интенсификации тепломассообмена – использование кольцевых струй [6,7], которые оказываются довольно эффективными, при этом зона высокой теплоотдачи значительно шире, чем для круглой струи. Неустойчивость струйных течений может значительно повлиять на интенсивность теплоотдачи, однако практическое использование би-стабильности в теплообменных устройствах потребует детального и глубокого изучения.

Работа посвящена обзору современного состояния исследований, посвященных изучению би-стабильности струйных течений. Кроме того, представлены новые данные по аэродинамике течения и тепловым измерениям, полученным в ИТ СО РАН. Исследование аэродинамики проводилось при помощи комплекса PIV. Температура поверхности измерялась тепловизором Testo с разрешением матрицы 1280x960 пикселей.

Импактная поверхность была изготовлена из титановой фольги с размерами в плане 382x520 мм и толщиной 0.1 мм. Поверхность равномерно нагревалась регулируемым электрическим источником. Внешний диаметр кольцевого сопла составлял $D = 22$ мм, а ширина кольца b варьировалась от 0.6 до 4.4 мм. Расстояние от среза сопла до подложки регулировалось с помощью ручного однокомпонентного координатного устройства с шагом перемещения 0.2 мм (h – расстояние от струй до поверхности) и h/D варьировалось от 0 до 2.

Численное моделирование в настоящей работе осуществлялось на основе метода крупных вихрей (LES) с моделью подсеточных напряжений Смагоринского. Количество ячеек сетки в исследуемых задачах составляло 4-5 млн. Верификация результатов численного моделирования на ряде задач газодинамики и теплообмена струйных течений.

Были получены новые данные по аэродинамике и теплообмену в кольцевой струе при вариации расходных и геометрических характеристик. Рассмотрены два режима течения – разомкнутый и сомкнутый. Первый режим характеризуется прилипанием вихрей, к поверхности, а второй режим смыканием струи. В экспериментах, подобно работе [5] наблюдался гистерезисный характер смены режимов, при этом, каждый из режимов был нестабилен в области гистерезиса. Отношение коэффициентов давления для сомкнутого и разомкнутого режимов составляло около 2 – 3. Показано, что переключение режимов оказывает существенное влияние на коэффициент теплопередачи. Более того, распределение коэффициента теплоотдачи после переключения режимов близко к однородному при $x/D < 1$. При увеличении ширины щели и сохранении расхода, наблюдаются более низкие значения коэффициента теплоотдачи.

Результаты моделирования показали, что при отношениях расстояния до преграды к внешнему диаметру сопла $h/D = 1.1$ и числе Рейнольдса $Re = 5000$ и отношении внешнего диаметра к внутреннему $Di/D = 0.947$ можно наблюдать два режима течения. Характер распределения турбулентных пульсаций также

весьма отличается друг от друга. В тоже время, абсолютные значения максимального уровня пульсаций отличаются незначительно. Можно отметить, что максимальной величины нормальные к стенке пульсации достигают в слое смещения кольцевой струи, а продольная компонента пульсаций максимальна в пограничном слое около поверхности. Определены границы проявления режимов би-стабильности кольцевых импактных струй.

Библиографический список

1. Гольдштик М.А. О закрученных струях. МЖГ, 1979, 1, 26-35.
2. Спотарь С.Ю., Терехов В.И. Два спонтанно меняющихся режима течения вихря над плоскостью. ПМТФ, 1987, 2, 68-71
3. Shtern V.N., Hussain F. Hysteresis in swirling jets. J. Fluid Mech. (1996), vol. 309, pp. 1-44.
4. Trávníček, Z. and Maršík, F. Visualization and Mass Transfer with a Bistable Two-Slot Impinging Jet. J. of Visualization, Vol. 6, No. 4 (2003) 417-421
5. Travnicek Z., Tesar V. Hysteresis in Annular Impinging Jets // Exp. Thermal and Fluid Science. – 2013. – V. 44. – P. 565-570.
6. Terekhov V.I., Kalinina S.V., Sharov K.A. An experimental investigation of flow structure and heat transfer in an impinging annular jet. Int. Comm. Heat Mass Transfer 79, 2016, C. 89–97.
7. Musika W., Wae-Hayee M., Vessakosol P., Niyomwas B. and Nuntadusit C. Investigation of flow and heat transfer characteristics of annular impinging jet. Advanced Materials Research Vols. 931-932 (2014) pp 1223-1227 (2014)

Работа поддержана Минобрнауки (Соглашение № 075-15-2021-575) - эксперимент и РФФИ (20-58-26003) - численное моделирование.

СЕКЦИЯ 2. ГОРЕНИЕ НАТУРАЛЬНЫХ ТОПЛИВ

УДК 622.74

Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Пурин М.В., Саломатов В.В.,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, г. Новосибирск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЕЛЛЕТЫ

В последние десятилетия (20-30 лет) опубликовано достаточно много работ с анализом процессов зажигания и горения частиц угольного топлива. При этом математическому описанию процессов зажигания уделено достаточно много работ (например, [1, 2]). При этом большая часть этих статей посвящена экспериментальным исследованиям закономерностей горения таких топлив. Но одной из нерешенных пока задач теории зажигания и горения частиц угольных топлив является анализ возможности твердофазного воспламенения угля в результате термохимического реагирования кислорода, выделяющегося в результате его термического разложения, с углеродом кокса. Аналогичные задачи встречаются при моделировании процессов зажигания древесных частиц и древесно-угольных композитов. Мотивация этой работы обусловлена необходимостью проведения анализа возможности твердофазного зажигания угля вследствие взаимодействия адсорбционно-связанного кислорода угля в исходном состоянии, выделяющегося при пиролизе с углеродом кокса, образующемся в результате пиролиза. Анализ возможности процессов твердофазного зажигания угля по результатам экспериментальных исследований на текущем уровне метрологического обеспечения невозможен. В этой связи основным методом проверки гипотезы о возможности твердофазного зажигания угля является математическое моделирование. Поэтому целью работы являлась разработка математической модели процесса зажигания и горения пеллетизированного угля, описывающая полный комплекс теплофизических и термохимических процессов, протекающих совместно в условиях высокотемпературного воздействия на угольную пеллету.

При постановке задачи рассматривался достаточно типичный для практики вариант расположения топливных угольных пеллет в топочном пространстве (рис. 1). Принятая физическая модель процесса зажигания предполагает, что в начальный момент времени пеллетизированная топливная частица попадает в высокотемпературную среду и нагревается за счет конвекции и излучения. Инертный нагрев приводит к термическому разложению основных компонентов топлива и испарению адсорбционно-связанной и внутриспоровой влаги. В результате термического разложения в малой окрестности пеллеты формирует-

ся стехиометрическая смесь горючего и окислителя. При достижении критических значений температур и концентраций происходит воспламенение. При этом предполагается, что зажигание может происходить во внутрислоевом пространстве топлива в результате взаимодействия горючего (газообразных и твердых продуктов пиролиза) и окислителя (кислорода, образующегося при пиролизе угля).

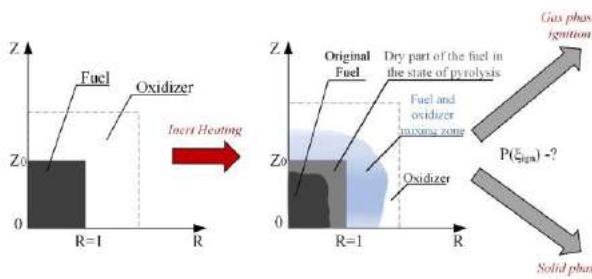


Рис. 1. Область решения

На рис. 2 приведены зависимости теоретических и экспериментальных значений t_{ign} топливной пеллеты от температуры внешней среды. Анализ зависимостей показывает хорошее соотношение теории и эксперимента, что говорит о высоком уровне прогностического потенциала разработанной математической модели. При этом значения времен t_{ign} монотонно убывают с увеличением температуры в соответствии с законом экспоненциального распада. Это обусловлено значительным влиянием комплекса процессов тепло и массопереноса, протекающих при существенных фазовых и термохимических превращениях.

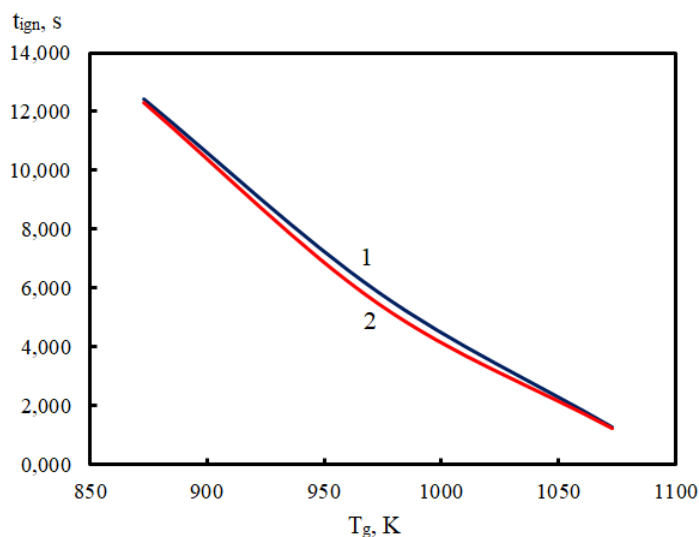


Рис. 2. Зависимость времен задержки зажигания угольной пеллеты:
 1 – результаты экспериментальных исследований.
 2 – результаты математического моделирования.

Библиографический список

1. Jun Li, Manosh C. Paul, Krzysztof M. Czajka. Studies of Ignition Behavior of Biomass Particles in a Down-Fire Reactor for Improving Co-firing Performance// Energy and Fuels. 2016. V.5. I.30. 5870–5877
2. Hesameddin Fatehi, Wubin Weng, Mário Costac, Zhongshan Li, Miriam Rabaçal, Marcus Aldénb , Xue-Song Bai. Numerical simulation of ignition mode and ignition delay time of pulverized biomass particles. Combustion and Flame. 2019. V. 206 400 – 410

Работа поддержана РНФ (грант № 23-79-10092).

УДК 621.4

Шлегель Н.Е., Стрижак П.А., Клименко А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЕЛЬ ВОДОМАЗУТНОЙ ЭМУЛЬСИИ С ПРИСАДКАМИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Мазут является одним из основных видов топлива на морских и энергетических установках из-за его низкой стоимости и высокой теплотворной способности [1]. Как правило, мазут получают при сероочистки нефти на нефтеперерабатывающих заводах. Основной проблемой сжигания мазутного топлива является образование различных загрязняющих веществ: остаточных зол, ценосфер, сажи и серной кислоты. Мазутное топливо (НФО) характеризуется высоким содержанием серы до 4.5%. Кроме того, НФО содержит различные количества микроэлементов тяжелых металлов, таких как ванадий, никель, свинец, медь и т.д., которые создают дополнительные проблемы, включая высокотемпературную коррозию и загрязнения [2–4]. В следствие этого, снижение спроса на мазутное топливо вызвано переходом к использованию более низкосернистого топлива (ЕСА, MARPOL). В настоящее время существует высокая потребность к мазутному топливу: для морских перевозок, выработки тепловой и электрической энергии [5]. В связи с этим для снижения вредных выбросов и улучшение характеристик горения топлива используют дополнительные специализированные присадки. Присадки к мазутным топливам позволяют снизить стоимость тепловой энергии, как с технической, так и с финансовой стороны. Добавления присадок к топливу обладает рядом преимуществ, таких как повышение эксплуатационных характеристик котла, снижение расхода топлива [6,7]. Производство эффективных присадок включает смешивание, перемешивание ингредиентов в течение 5-10 мин и фильтрование. Как правило, в присадку до-

бавляют катализаторы горения, износостойкие, дымоудаляющие и энергосберегающие средства, а также регуляторы октанового числа.

Настоящее исследование направлено на определение оптимальной присадки к мазутному топливу для снижения антропогенных выбросов, времени задержки зажигания, а также увеличения площади свободной поверхности реагирования топлива при вторичном измельчении капель. Мазут является одним из перспективных жидких топлив для использования на морских и энергетических установках из-за его экономической составляющей и теплотворной способности. В связи ужесточением требований к антропогенным выбросам применение водомазутных топлив становится более актуальными. В настоящее время при использовании мазутного топлива существует ряд не решенных проблем. А именно не полное сгорание такого топлива и большие антропогенные выбросы. Один из способов решения таких проблем является использование специальных присадок в мазутное топливо. Результаты проведенных исследований показали, что применение такой присадки как ИОН М позволяет снизить времена задержки зажигания капель топлива на 10-20%, уменьшить антропогенные выбросы на 10-15%, а также увеличить реакционную площадь горения практически на 20%. Результаты настоящей работы показали, что при использовании присадки «ИОН М» улучшают характеристики вторичного измельчения капель при соударении о твердую поверхность, а также позволяет реализовать эффективное микро-взрывное измельчение. Проведенный анализ экспериментальных данных при соударении капли топлива с твердой поверхностью позволил получить аппроксимационные уравнения для реализации устойчивого режима фрагментации капель. Проведенные исследования позволили сформулировать рекомендации по применению полученных результатов в котельных установках.

Библиографический список

1. Darbandi M., Fatin A., Bordbar H. Numerical study on NO_x reduction in a large-scale heavy fuel oil-fired boiler using suitable burner adjustments // *Energy*. 2020. Vol. 199. P. 117371.
2. Abdul Jameel A.G. et al. Calculation of Average Molecular Parameters, Functional Groups, and a Surrogate Molecule for Heavy Fuel Oils Using ¹H and ¹³C Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy // *Energy & Fuels*. American Chemical Society, 2016. Vol. 30, № 5. P. 3894–3905.
3. Goldstein H.L., Siegmund C.W. Influence of heavy fuel oil composition and boiler combustion conditions on particulate emissions // *Environ. Sci. Technol.* American Chemical Society, 1976. Vol. 10, № 12. P. 1109–1114.
4. Sippula O. et al. Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers // *Atmos. Environ.* 2009. Vol. 43, № 32. P. 4855–4864.
5. Minzyak M. V. Contradictions in the implementation of the new provisions of the MARPOL and UNCCD conventions in international maritime practice // *Ocean*

Manag. Limited Liability Company {\guillemotleft} maritime law agency {\guillemotright}, 2022. № 4 (18). P. 17–20.

6. Poullikkas A. Cost-benefit analysis for the use of additives in heavy fuel oil fired boilers // Energy Convers. Manag. 2004. Vol. 45, № 11. P. 1725–1734.

7. Saha D., Roy B. Influence of areca nut husk nano-additive on combustion, performance, and emission characteristics of compression ignition engine fuelled with plastic-grocery-bag derived oil-water-diesel emulsion // Energy. 2023. Vol. 268. P. 126682.

Работа поддержана РФФ (грант № 22-79-00197).

УДК 621.4

Стрижак П.А., Шлегель Н.Е.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОГИДРАТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРЕНИЯ НИЗКОСОРТНЫХ ТОПЛИВ

Несмотря на активное развитие систем получения энергии из возобновляемых источников, потребление ископаемых ресурсов составляет более 80% [1,2]. Так, на долю угля приходится 26.9% производства энергии, нефтепродуктов – 31.6 %, природного газа – 22.8% [3]. Добыча, транспорт и использование ископаемых топлив наносят серьезной урон окружающей среде. Одними из наиболее вредных факторов использования ископаемых топлив являются выбросы парниковых газов, которые влекут за собой увеличение темпов глобального потепления. При сжигании ископаемых топлив в атмосферу поступают оксиды серы и азота, впоследствии являющиеся причинами выпадения кислотных дождей и респираторных заболеваний у населения и животных [4].

Использование композиционных жидких топлив на основе промышленных и коммунальных отходов не только позволяет утилизировать последние, но и является одним из способов решения проблемы исчерпаемости традиционных природных энергоресурсов. К преимуществам таких топлив относятся разнообразный компонентный состав, адаптированный под сырьевые возможности любого региона мира, и утилизация накопившихся отходов с разной пропорцией относительно традиционных топлив. Известна проблема, связанная с высокой инерционностью зажигания композиционных жидких топлив, особенно при использовании последних с значительным содержанием воды или высоковлажных отходов.

В природе чаще всего газовые гидраты встречаются в условиях вечной мерзлоты и под поверхностью дна Мирового океана. Поскольку добыча и использование природных газовых гидратов на данный момент представляются

крайне сложными и дорогостоящими процессами, все больше исследований направлено на изучение процессов гидратообразования и разработку технологий по их эффективному производству (синтезу). Газогидратные технологии предлагаются в качестве альтернативы сжижению природного газа для его транспортировки, поскольку производство и транспортировка сжиженного природного газа (СПГ) является крайне затратным, с финансовой точки зрения, процессом [5].

Основываясь на изложенных выше эффектах и заключениях, в настоящей работе предложена схема совместного сжигания композиционного жидкого топлива на основе отходов углеобогащения и гидрата метана. Полученную в процессе диссоциации очищенную воду можно использовать в системе топливоприготовления для подпитки котлоагрегата, а также для собственных нужд персонала на объекте энергогенерации, тем самым снижая затраты на водоподготовку в цикле работы ТЭС. Целью данной работы являлось определение оптимальных условий применения метана, диссоциирующего с поверхности газового гидрата, для интенсификации горения композиционного жидкого топлива из промышленных отходов.

Для решения выделенной проблемы в данной работе предлагается интенсифицировать зажигание композиционного жидкого топлива за счет подачи метана, диссоциирующего с поверхности газовых гидратов. Применение последних совместно с композиционными жидкими топливами актуально в связи с тем, что в составе гидратов имеется большой объем воды, который позволяет снизить концентрации оксидов серы, азота и углерода в составе дымовых газов. Результаты проведенных экспериментов показали, что при использовании газового гидрата удается снизить время задержки зажигания капли композиционного жидкого топлива более чем в 4 раза. Добавление газового гидрата способствует увеличению температуры горения и полноте выгорания топлива. На основе полученных результатов предложена схема совместного использования композиционных жидких топлив и газовых гидратов на объектах энергогенерации.

Библиографический список

1. Nikitin A.D. et al. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels // *Sci. Total Environ.* Elsevier, 2021. Vol. 772. P. 144909.
2. Zakari A., Adedoyin F.F., Bekun F.V. The effect of energy consumption on the environment in the OECD countries: economic policy uncertainty perspectives // *Environ. Sci. Pollut. Res.* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. Vol. 28, № 37. P. 52295–52305.
3. Coal – World Energy Outlook 2019 – Analysis - IEA [Electronic resource].
4. Liu T. et al. Solid fuel use for heating and risks of breast and cervical cancer mortality in China // *Environ. Res.* Academic Press, 2020. Vol. 186. P. 109578.
5. Carroll J. Chapter 11 - Additional topics / ed. Carroll J.B.T.-N.G.H. (Fourth E.

Boston: Gulf Professional Publishing, 2020. P. 347–360.

Исследование выполнено при поддержке программы Национального исследовательского Томского политехнического университета (проект № Приоритет-2030-НИИ/ЭБ-006-375-2023).

СЕКЦИЯ 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕПЛОФИЗИКЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ

УДК 621.039.524.4

**Базюк С.С., Киселев Д.С., Полунин К.К., Солдаткин Д.М.,
Стойков К.В.**

АО «Научно-исследовательский институт
Научно-производственное объединение «ЛУЧ», г. Подольск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ОБОЛОЧЕК ТОЛЕРАНТНЫХ ТВЭЛОВ ВВЭР-1000 ПРИ АВАРИИ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В настоящее время материалом оболочек твэлов легководных энергетических реакторов (РУ) являются циркониевые сплавы, что обусловлено лучшим сочетанием ядерных (НФ), теплофизических (ТФ) и физико-механических (ФМ) свойств *Zr*. Основными механизмами деградации, лимитирующими работоспособность оболочки в условиях максимальной проектной (МПА) и запроектной (ЗПА) аварий с потерей теплоносителя (ЛОСА), являются термомеханические напряжения, вызванные ростом давления *He* и газовых продуктов деления, и высокотемпературное (ВТ) окисление. Экзотермическое взаимодействие циркония с паром $Zr + 2H_2O = ZrO_2 + 2H_2 + 6,24 \text{ МДж/кг } Zr$ совместно с остаточным тепловыделением приводит к росту температуры и охрупчиванию оболочек, что затрудняет или исключает извлечение твэлов из активной зоны РУ. При недостаточности и/или несвоевременности принятия мер по предотвращению деградационных процессов авария переходит в тяжелую стадию.

Разработка материала и конструкции оболочки толерантного твэла (ТТ), инертной по отношению к окислительной среде и обладающей повышенными НФ, ТФ и ФМ свойствами при нормальных условиях эксплуатации, МПА и ЗПА ЛОСА, а также оптимальной технологичностью и стоимостью производства является актуальной научно-технической задачей. В качестве перспективных материалов рассматриваются *Zr* сплавы с защитными покрытиями (Cr, NiCr, FeCrAl, МАХ-фазы и др.), SiC композиты, сплавы Mo, Nb. Подход к решению вышеуказанной задачи включал экспериментальное исследование на стенде ГАЗПАР поведения кольцевых образцов оболочек ТТ и герметичных ампул в условиях, имитирующих МПА и ЗПА ЛОСА реакторной установки ВВЭР-1000 при температурах до 1500 °С.

В докладе представлены результаты исследования ВТ окисления образцов оболочек ТТ в водяном паре из циркониевого сплава Э110 с хромовым покрытием (Э110+Cr), хромоникелевого сплава 42ХНМ и вакуум-плавленного молибдена с хромовым покрытием (Mo+Cr). Исследование, основанное на термогравиметрическом методе измерений (рис. 1-2), проведено в диапазонах температур 800 – 1470

°С, времен выдержки в паре – 150-28800 с при толщине покрытия 4-18 мкм. Термомеханика Э110+Cr оболочек исследована при раздутии и разгерметизации ампул с исходным давлением (0,1 – 10) МПа (рис. 3). При пост-тестовых испытаниях изучено влияние способа расхолаживания на остаточную пластичность и микротвердость. Наряду с обширными экспериментальными данными представлены результаты моделирования ВТ окисления образцов оболочек ТТ с применением метода конечных элементов.

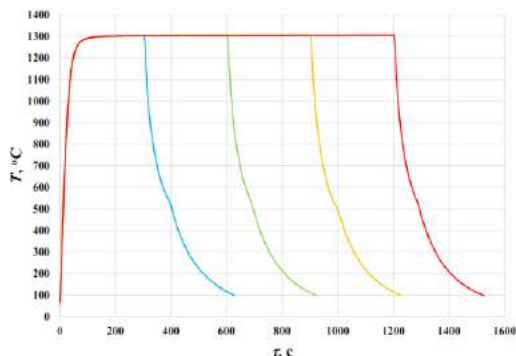


Рис. 1. Термограммы Э110+Cr ампул, окисленных в паре при 1300 °С и выдержке 300-1200 секунд

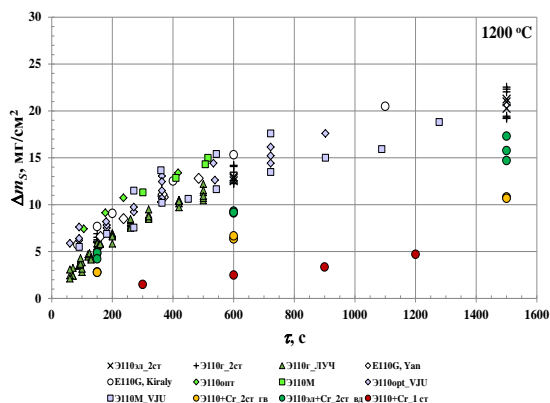


Рис. 2. Кинетика окисления образцов Э110 и Э110+Cr оболочек и ампул при 1200 °С



Рис. 3. Внешний вид Э110+Cr ампулы, испытанной в паре при 1100 °С, 10 МПа

Библиографический список

1. Полунин К.К., Мокрушин А.А. Базюк С.С. и др. Исследование оболочек твэлов из сплава Э110 с хромовым покрытием в условиях ЛОСА // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 9. С. 62-71.
2. Расчетное прогнозирование теплогидравлических характеристик модельных ТВС легководного реактора при имитации аварии ЛОСА. Базюк С.С., Паршин Н.Я., Попов Е.Б. и др. Труды 7 Росс. нац. конф. по теплообмену. В 3-х томах. 2018. С. 147-151.
3. Numerical and experimental investigation of high temperature steam oxidation of molybdenum cladding specimens applied to accident tolerant fuel. Bazyuk S.S., Polunin K.K. et al. Journ. of Phys.: Conf. series. 11. "All-Russ. Sci. Conf. with Inter. Particip. "Thermophys. & Power Eng.in Acad. Cent.", ТРЕАС 2019" 2020. С. 012098.

УДК 620.9

Божеева Д.М., Кузнецов В.А, Дектерев А.А.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ ВУТ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В ДУТЬЕ

Одной из основных проблем использования водоугольного топлива (ВУТ) при сжигании является его трудно воспламеняемость и нестабильное горение. Известно, что наличие высокой доли влаги в составе ВУТ приводит к его низкой реакционной способности при зажигании. Этот эффект является сдерживающим фактором и влечет за собой применения особых конструкторских и технологических решений.

Одним из таких решений может стать технология кислородного сжигания или сжигание в среде с повышенной концентрацией кислорода. Из литературных данных известно, что повышение объемной концентрации кислорода в дутье способствует снижению периода индукции воспламенения углеводородных топлив (газовых, жидких и твердых), а также отмечается более интенсивное выгорание топлива и снижение NO_x . Установлено, что повышение концентрации кислорода в дутье позволяет избежать ингибирующих эффектов при воспламенении топлива, например, при высоких концентрациях углекислого газа.

Целью данной работы является разработка численной методики описания процессов воспламенения и горения водоугольного топлива в среде с повы-

шенной концентрацией кислорода; изучение зависимости физико-химических процессов сжигания ВУТ от концентрации кислорода в дутье для условий топочной камеры.

В качестве объекта исследования была выбрана топочная камера размером 1.25×1.25×4.5 м [1]. Распыл ВУТ осуществлялся форсуночным устройством (рис. 1).

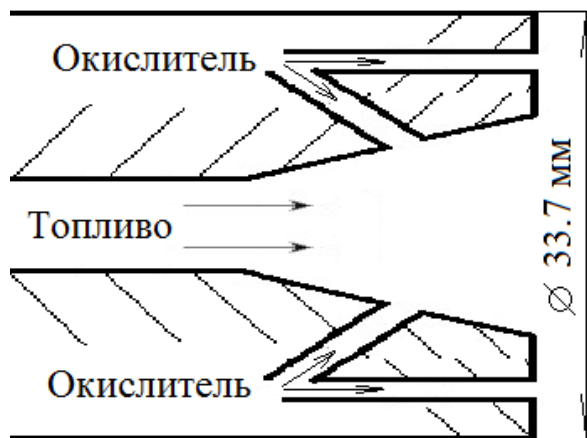


Рис. 1. Схема форсунки

Для описания процессов горения ВУТ в среде с повышенной концентрацией кислорода предложена комплексная математическая модель, включающая в себя: модель движения многокомпонентной неизоэтермической газовой среды (несущей фазы) на основе RANS подхода; модель переноса излучения на основе метода дискретных ординат; модель движения капель/частиц на основе подхода Лагранжа; EDC модель горения газовой фазы; диффузионно-кинетическая модель выгорания коксового остатка. Подаваемое в топку распыленное форсункой водоугольное топливо представляется дискретным набором капель/частиц, которые состоят из комплекса воды и угольных частиц. Под водой подразумевается внешняя влага, которая добавляется при изготовлении ВУТ. В модели процесс воспламенения и горения частицы происходит стадийно. Вначале происходит испарение влаги (воды), для описания этого процесса используется модель испарения капли и модель испарение влаги на поверхности частицы. Далее происходит прогрев частицы, выход и воспламенение летучих компонент топлива, горение коксового остатка.

На рис. 2,3 представлены результаты расчета капельно-факельного сжигания ВУТ в камере сгорания. В качестве дутья используется чистый кислород.

Разработана численная методика расчёта процессов воспламенения и горения водоугольного топлива в среде с повышенной концентрацией кислорода. Результаты расчета были сопоставлены с данными опытного кислородного сжигания ВУТ в топочной камере. Проведено численное исследования зависи-

мости физико-химических процессов сжигания ВУТ от концентрации кислорода в дутье для условий топочной камеры.

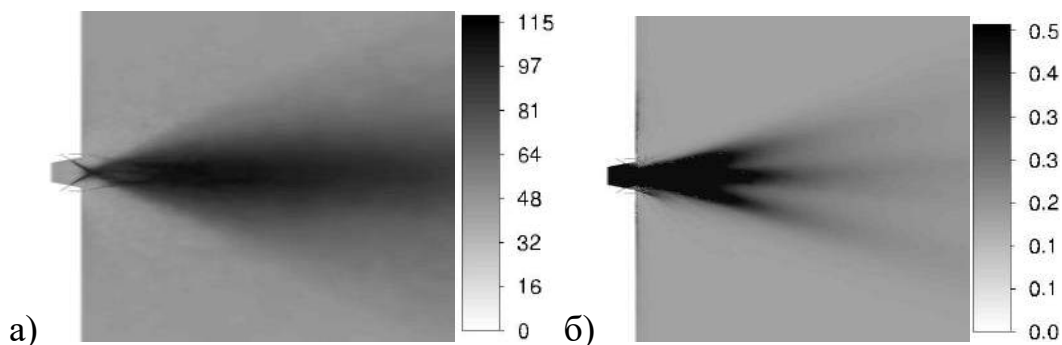


Рис. 2. Распыл ВУТ:

а) магнитуа скорости частиц (м/с), б) концентрация частиц (кг/м³)

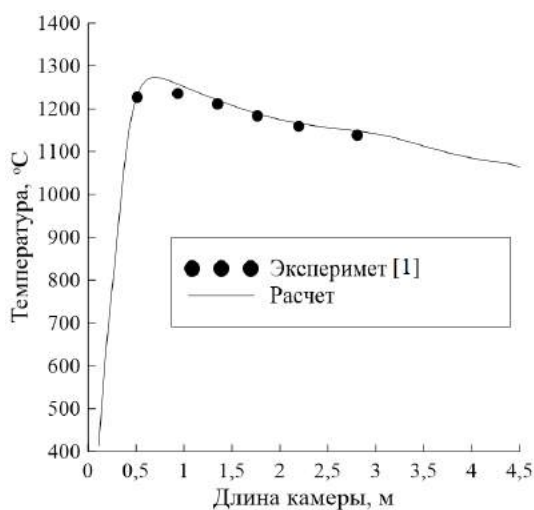


Рис. 3. Температура на оси топочной камеры

Библиографический список

1. Gaber C, Wachter P, Demuth M, Hochenaue C. Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen.
2. Fuel 2020;282:118692. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118692>.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01267, <https://rscf.ru/project/23-79-01267/>»

Вертиков Е.А., Олексюк Д.А., Малютин М.А., Зубков А.Г.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
г. Москва

ВАЛИДАЦИЯ СУБКАНАЛЬНОГО ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО КОДА SC-INT ПО ЛОКАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Значительный объем материалов, обосновывающих безопасность реакторных установок, занимают теплогидравлические расчеты. Одним из способов проведения теплогидравлических расчетов активных зон является субканальный (ячейковый) метод, при котором исследуемая область пространства разбивается на множество параллельных подканалов, взаимодействующих между собой посредством турбулентного и конвективного поперечного перемешивания теплоносителя. Программные средства, использующие данный метод, широко распространены в России и за рубежом и применяются для обоснования теплотехнической надежности активных зон ядерных реакторов, так как с одной стороны они позволяют учитывать неоднородность параметров теплоносителя в пределах поперечного сечения тепловыделяющих сборок (ТВС) в отличие от одномерных «системных» кодов, а с другой стороны обладают приемлемым, по сравнению с CFD-кодами, временем счета.

При проведении подобного рода обоснования одной из определяющих величин является запас до кризиса теплоотдачи. Большинство применяемых на текущий день корреляций для расчета критического теплового потока (КТП) основываются на так называемом локальном подходе. В данном подходе в соответствующую корреляцию подставляются локальные параметры двухфазного теплоносителя: массовая скорость и относительная энтальпия. Таким образом, корректность расчета величины КТП во многом определяется корректностью расчета программным средством соответствующих локальных параметров теплоносителя.

Программа SC-INT, являющаяся модернизацией программы SC-1 [1], создана сотрудниками отдела теплофизических исследований НИЦ «Курчатовский институт» для проведения стационарных теплогидравлических расчетов тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых ядерных реакторов в субканальном приближении. В программе SC-INT реализована модель одножидкостного двухфазного потока с учетом неравновесного пара, образующегося за счет поверхностного кипения воды и проскальзывания пара относительно жидкой фазы. Программа имеет аттестационный паспорт № 578 от 31.03.2023 г. [2], в котором указаны погрешности расчета перепада давления теплоносителя по высоте ТВС, температуры некипящего теплоносителя в подканалах ТВС, температуры внешней поверхности оболочек тепловыделяющих элементов и величины

критического теплового потока [3]. В настоящем докладе приводится описание дополнительной валидации программы SC-INT по локальным параметрам двухфазного теплоносителя: массовой скорости, относительной энтальпии и объемному паросодержанию. Валидация по локальным массовой скорости и относительной энтальпии теплоносителя осуществляется на данных, полученных на экспериментальных моделях НИКИЭТ [4] (треугольная упаковка имитаторов) и GE-3x3 [5] (квадратная упаковка имитаторов). Валидация по объемному паросодержанию осуществляется на международном бенчмарке BFBT, включающем в себя эксперименты на полноразмерной модели тепловыделяющей сборки реактора BWR [6]. Стоит отметить, что в перспективе для валидации программы SC-INT будут использованы экспериментальные данные, полученные на отечественном теплофизическом стенде КС НИЦ «Курчатовский институт» на многостержневых полновысотных электрообогреваемых моделях ТВС ядерных реакторов с водой под давлением.

Результаты выполненного в ходе настоящей работы расчетного исследования позволят расширить область применения программы SC-INT.

Библиографический список

1. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин «SC-INT», № 578 от 31.03.2023 г.
2. Олексюк Д.А. Разработка и экспериментальное обоснование программы для поочередного теплогидравлического расчета активных зон реакторов типа ВВЭР, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.03. – Москва, 2002. – 194 с.
3. Вертиков Е.А., Олексюк Д.А. Разработка и валидация субканального теплогидравлического кода для расчета активных зон реакторов типа ВВЭР: сборник тезисов XXII научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. – Москва: ИБРАЭ РАН, 2023. – 84 с.
4. Поляков В.К., Поляков Р.Е., Смолин В.Н., Шпанский С.В. и др. Измерение расходов и теплосодержаний теплоносителя в ячейках стержневой сборки: сборник докладов семинара СЭВ «Теплофизика-86. Теплотехническая безопасность ядерных реакторов ВВЭР». – Ростов, 1986.
5. Lahey, R. T., Jr., Shiralkar, B. S., and Radcliffe, D. W. Mass Flux and Enthalpy Distribution in a Rod Bundle for Single- and Two-Phase Flow Conditions. – ASME. J. Heat Transfer. – May 1971; 93(2): 197–206. – <https://doi.org/10.1115/1.3449786>.
6. NUPEC BWR Full-size Fine-mesh Bundle Test BFBT Benchmark. Volume III: Results of phase I on Void Distributions. / Nuclear Energy Agency, – 2021.

Богомолов А.Р., Гардер А.Д.

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва,
г. Кемерово

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИРОЛИЗА В РЕАКТОРЕ С НЕПОДВИЖНЫМ СЛОЕМ

В данной работе представлено численное моделирование пиролиза резиновой крошки с неподвижным, плотным слоем без присутствия кислорода выполненного в программе Ansys Fluent. Реактор с неподвижным слоем представляет собой цилиндрический сосуд, заполненный твердым гранулированным материалом в виде резиновой крошки. Понимание физических и химических явлений, процессов происходящих в подобных реакторах при воздействии тепловых потоков с повышением температуры и их представление с помощью математических моделей является актуальной задачей, так как позволяет получить необходимые результаты в кратчайшие сроки и с минимальными затратами.

Процессы протекающие при нагреве и дальнейшем термическом превращении исследуемого материала в реакторе без доступа кислорода проводились в диапазоне температур 550-700° С со скоростью разогрева от 7 до 12° С в минуту. Во время этого процесса углеродные цепи разрываются и образуются твердые и газообразные продукты, содержащие кроме насыщенных и ненасыщенных углеводородов, неорганические соединения (H_2 , N_2 , H_2O , CO , CO_2), которые затем могут быть подвергнуты дальнейшей обработке.

Цель работы – разработка математической модели отражающей зависимость выхода летучих веществ от температуры.

Представленная задача решалась с использованием метода прямого численного моделирования (DNS: Direct Numerical Simulation). Данный подход позволяет находить поля скоростей движения летучих веществ и распределение давления в каждой точке пространства и времени, без каких-либо приближений, в результате прямого решения системы уравнения Навье-Стокса. Для описания движения и реагирования пористых частиц была предусмотрена модель Лагранжа основанная на подходе Эйлера – Лагранжа. Текучая среда рассматривается как непрерывная, и для нее решаются уравнения Навье – Стокса, тогда как решение для дисперсной фазы получается путем моделирования траекторий движения большого количества частиц через вычисленное поле потока. Дисперсная фаза может обмениваться с текучей средой импульсом, массой и энергией. [1].

Результаты моделирования представляют собой профили температур, давлений и других параметров внутри пористой фракции, например, химический состав газообразной фазы, состоящей из летучих веществ, которые стремятся к согласованию с экспериментальными данными.

1. Левицкий, И. А. Применение современных программно- вычислительных комплексов для решения задач тепломассообмена в промышленных агрегатах. Модели физических процессов в Ansys Fluent: учебник / И. А. Левицкий. — Москва: МИСИС, 2022. — 500 с.

УДК 621.039

Гуров Е.Н., Айвазьян Т.В., Мохина Т.А., Макаров О.В.
АО «ОКБМ Африкантов»

ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ ЗАТРАТ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Для выполнения теплового расчета изделий в АО «ОКБМ Африкантов» используется ANSYS/Thermal программный комплекс (ПК) «ANSYS». Данная программа позволяет проводить стационарный, нестационарный, линейный или нелинейный тепловой расчет конструкции произвольной геометрии методом конечных элементов. С целью снижения временных затрат при проведении расчетов температурного состояния (РТС) оборудования на предприятии был разработан целый ряд вспомогательных программных модулей (ПМ).

Для адаптации ANSYS/Thermal к учету специфики разрабатываемого на предприятии оборудования (высокие значения рабочих температур, высокие градиенты температур, нестационарные процессы, сопровождающиеся фазовыми переходами) освоена технология пользовательского программирования. Технология позволяет создавать ANSYS расширенной функциональности с различными ПМ, реализующими математические модели пользователей. Одним из них является ПМ расчета граничных условий третьего рода. Данный ПМ позволяет рассчитать коэффициент теплоотдачи и температуру в каждый момент времени для процессов вынужденной или естественной конвекции, конденсации пара и кипения воды. Также проведено расширение функциональности ПМ на описание процессов теплообмена в ограниченном пространстве – зазорах. Это позволяет по известным параметрам среды и геометрии автоматически определять нагрузки для каждого момента времени в каждом узле нагружаемой поверхности каналов и щелевых зазоров, что вручную привело бы к снижению точности расчета и значительным потерям времени на расчет нагрузок исполнителем.

При обосновании работоспособности конструкции теплообменного оборудования, как правило, возникает необходимость расчетов сварных соединений трубных досок с пучком теплообменных труб. Для сокращения

затрат вычислительных ресурсов при проведении расчетного обоснования оборудования реализован дополнительный ПМ для ANSYS расширенной функциональности, позволяющий копировать граничные условия третьего рода, полученные в результате расчета теплообмена в зазоре между трубкой и трубной доской в одной области трубной доски, на все идентичные области, имеющие аналогичные температурные условия. Данный инструмент существенно упрощает процесс задания граничных условий и снижает вероятность допущения ошибок, а также позволяет исключить из расчетной модели построение повторяющихся конструктивных узлов, за счет чего значительно снижается размерность задачи, а, следовательно, и время счета.

При расчете корпусов теплообменного оборудования, часто теплообмен идет от среды к корпусу не напрямую, а через стенки и прослойки, что не позволяло воспользоваться разработанными пользовательскими блоками без добавления дополнительной геометрии в расчетную модель. В рамках продолжения работ по оптимизации затрат при проведении РТС оборудования был разработан ПМ расчета теплопередачи через плоские стенки и прослойки для моделирования влияния многослойной среды не входящей в расчетную модель. Данный ПМ позволяет исключить построение в расчетной модели излишней геометрии, упрощает процесс задания нагрузок, снижает погрешность расчета, а также автоматизирует расчет теплопередачи от среды к корпусу, который ранее производился исполнителями в несколько итераций, что приводило к большим временным потерям, особенно в тех случаях, когда расчетное обоснование оборудования необходимо для нескольких режимов эксплуатации.

При проведении РТС с использованием вычислительного кластера зачастую анализу подвергаются последовательности режимов, когда результаты расчета одного режима являются исходными данными для последующего. Для автоматизации этого процесса разработан сценарий командной строки для запуска «цепочки» расчетных режимов на вычислительных ресурсах, осуществляющий последовательную постановку в очередь расчетных режимов, что позволяет избежать временных потерь в результате простоя в случае, когда расчет режима завершается ночью или в выходные дни.

При помощи технологии доступа к двоичным файлам результатов ПК «ANSYS» в обход постпроцессора и разработанного алгоритма обработки данных расчета создано программное средство (ПС) АНСАЛЬТ-Т. Данное ПС применяется для сокращения количества результирующих записей, полученных в ANSYS/Thermal ПК «ANSYS» после проведения РТС, и для исключения из рассмотрения тех записей, в которых наблюдается незначительное изменение температуры во всех узлах конструкции, не превышающих заданного

пользователем критерия. Это позволяет в разы снизить занимаемое файлом результата места для хранения.

Все перечисленные ПМ позволяют оптимизировать временные затраты и затраты вычислительных ресурсов при проведении расчетного обоснования оборудования, а также в перспективе могут быть реализованы в ПК «Логос».

УДК 532.5.032

Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Сентябов А.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАВИТАЦИИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОДА SIGMAFLOW

Кавитация (разрыв сплошности жидкости в виде парогазовых полостей) наблюдается в высокоскоростных потоках жидкости в различных технических системах и установках. Среди таких систем можно назвать судовые винты, центробежные насосы, гидравлические турбины и др. Как правило, кавитация оказывает серьезное негативное влияние на работу таких систем, ухудшая характеристики работы оборудования и повышая износ конструкций в результате кавитационной эрозии.

Работа посвящена демонстрации возможностей универсальной CFD программы SigmaFlow, разработанной сотрудниками Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и кафедры теплофизики Сибирского федерального университета для решения задач моделирования кавитационных течений.

В ходе исследований выполнены расчеты в стационарной и нестационарной постановках для моделирования обтекания канонических тел. Рассмотрены задачи кавитационного обтекания: тела цилиндрической формы (вдоль оси); симметричных и несимметричных крыловых профилей. Использовались URANS и DES модели турбулентности.

Расчеты по методу DES показали, что его использование позволяет на сетках, имеющих порядка полумиллиона ячеек, разрешить большое число вихревых структур, образующихся в ближнем следе кавитирующего гидрокрыла. Использование URANS подхода позволяет уменьшить вычислительные затраты при сохранении предсказания основных частот периодического процесса. Но для этого подхода характерно некоторое завышение размеров кавитирующих областей и интенсивности крупномасштабных вихрей и, соответственно, пульсаций интегральных сил, действующих на гидрокрыло.

На основе моделирования сделан вывод, что основное отличие 3D моделирования от 2D состоит в физически адекватном описании эволюции вихревой структуры (каскадный механизм), определяющей не только гидродинамику течения, но и развитие, перенос и диссипацию кавитационных областей.

На примере моделирования обтекания симметричного гидрокрыла NACA661-012 в различных кавитационных режимах ($\sigma = 0.2 \div 3.0$) выполнено сравнение с данными лабораторных экспериментов [1] и результатами расчета с использованием сторонних CFD кодов. Сравнение с данными экспериментов показывает хорошее соответствие как по интегральным, так и по локальным характеристикам (рис.1). Из графиков видно, что результаты расчетов в программном комплексе SigmaFlow по точности моделирования кавитационных течений не уступают или превосходят результаты, полученные с использованием коммерческих CFD кодов.

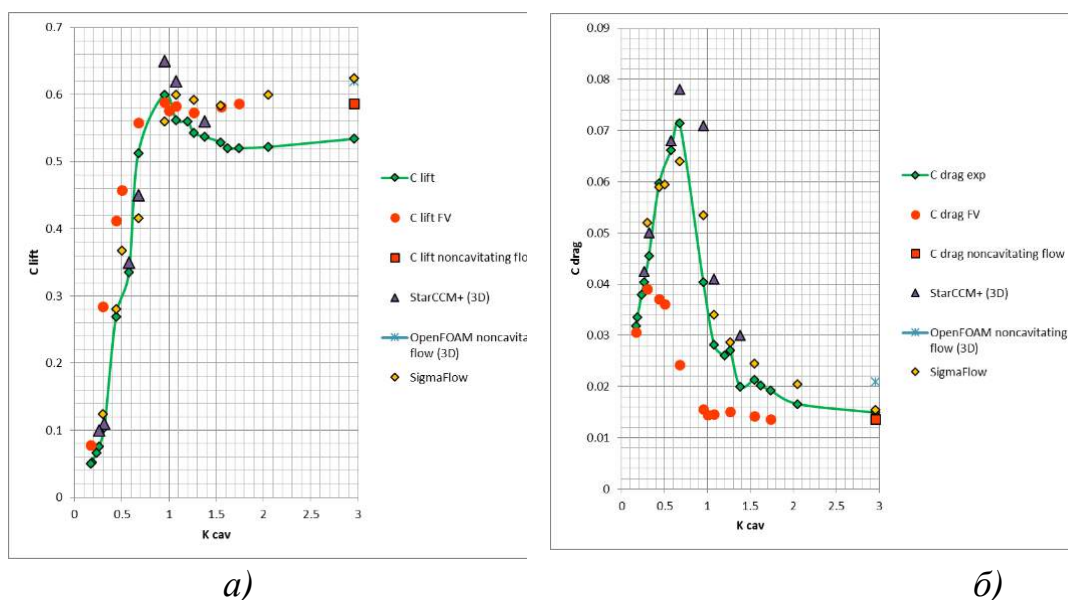


Рис. 1. Коэффициент подъемной силы (а) и коэффициент сопротивления (б) в зависимости от режима (зеленые точки – эксперимент, красные – FlowVision, фиолетовые – StarCCM+, синие – OpenFoam, желтые - SigmaFlow)

1. The NACA66(1)-012 hydrofoil in noncavitating and cavitating flows. R.W. Kermeen. Report No. 47-7. Hydrodynamics Laboratory California Institute of Technology, Pasadena, California, 1956.

Исследование выполнено по контракту с Санкт-Петербургским государственным морским техническим университетом в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет–2030» (Гидродинамика подводных аппаратов, влияние кавитации).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВЗРЫВА КОМПОЗИТНЫХ КАПЕЛЬ
УГЛЕВОДОРОД – ВОДА**

Использование композитного органического топлива с водой открывает новые перспективы по снижению вредных выбросов в атмосферу и увеличивает степень сжигания жидкого органического топлива. Для тепловых станций готовится суспензия капель органического топлива, внутри которых находятся капли воды (рис. 1, *а*). По мере прогрева композитных капель температура микрокапель воды достигает температуры кипения и может произойти микровзрыв (рис. 1, *б*). Для моделирования процесса прогрева привлекаются как численные методы, так и аналитические подходы. Аналитическое решение, предложенное в [1, 2] обладает рядом принципиальных неточностей с точки зрения курса уравнений математической физики [3].

Решается сферически симметричная задача о прогреве композитной капли. На поверхности капли задается условие теплообмена в соответствии гипотезой Ньютона. Внутри капли выставляется начальное распределение температуры. Задача приводится к безразмерному виду, что позволяет выделить определяющие параметры, управляющей динамикой прогрева.

Решение нестационарной задачи ищется в виде разложения по системе сферических функций Бесселя [3]. Причем в углеводороде в решение включаются сферические функции Бесселя первого и второго рода. В микрокапле воды используются только сферические функции первого рода, не имеющие особенности в нуле. На основе решения задачи Штурма – Лиувилля осуществлен расчет собственных функций и собственных значений. Используется условие сопряжения на межфазной границе, отражающее непрерывность температуры и теплового потока. Характеристическое уравнение для нахождения собственных значений решается численно.

Выведено условие ортогональности собственных функций. На основе разложения произвольной функции в ряд по системе собственных функций иллюстрируется корректность найденного функционального базиса для рассматриваемой задачи. Записано общее решение нестационарной задачи о распределении температуры в композитной капле, что дает возможность в любой момент времени вывести на экран распределение температуры в микрокапле воды и сферической оболочке углеводорода. Представлен прямой численный расчет корректности выполнения граничного условия на поверхности капли и на межфазной границе. Исследовано влияние начальных распределений, коэффициента теплоотдачи, объемной доли воды на динамику прогрева.

Представлены результаты численного моделирования параметров композитной капли. Проведено сопоставление с экспериментальными данными из

литературы (рис. 2). С ростом температуры воздуха, в который подается композитная капля время прогрева существенно сокращается. Представлено решение модельных задач с неравномерным начальным распределением температуры в объеме композитной капли.

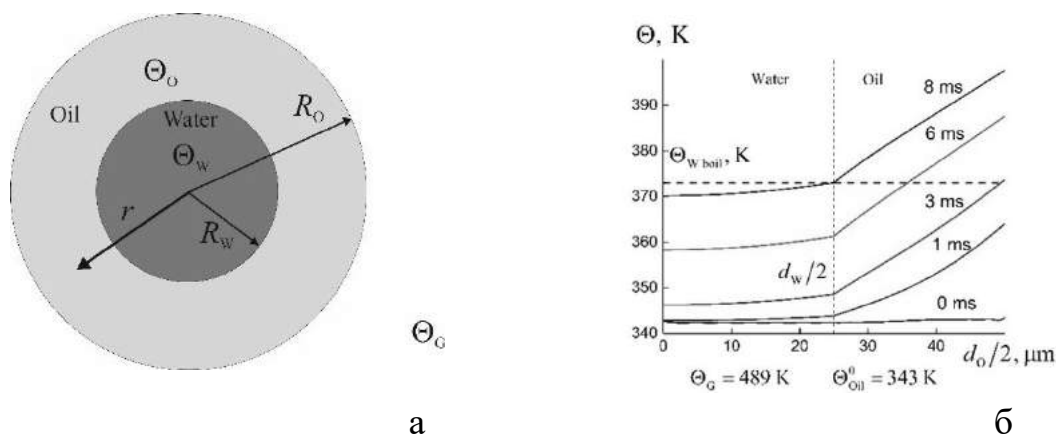


Рис. 1. Эскиз задачи о прогреве капли (а) и пример расчета динамики температуры внутри композитной капли (б). При достижении поверхности капли воды температуры кипения происходит микровзрыв и фрагментация капель органического топлива

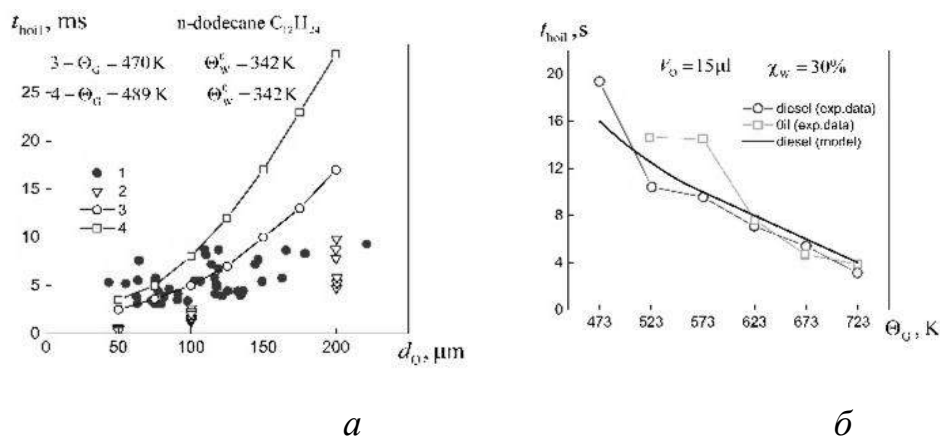


Рис. 2. Сопоставление результатов расчета времени вскипания микрокапли воды (кривые 3, 4) (а) от диаметра композитной капли. Экспериментальные данные (точки 1 из [2]), точки 2 расчет из [1, 2]. Зависимость времени вскипания от температуры газа (б). Кривая – расчет, точки – экспериментальные данные [4]

Библиографический список

1. Sazhin S.S., Rybdylova O., Crua C., et al. A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. V.131. P. 815–821.

2. Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z. et al. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2020. V. 161. 120238.
3. Практикум по уравнениям математической физики. Учебное пособие/ Деревич И.В. СПб.: Лань, 2018. 428 с. ISBN 978-5-8114-2601-0.
4. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // Int. J. Thermal Sciences. 2019. V.142. P. 30–41.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00243

УДК 532.5, 622.24

Жигарев В.А., Минаков А.В., Лысакова Е.И.

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ШЛАМА РАСТВОРАМИ С ДОБАВКОЙ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

При росте спроса на углеводородное сырье возникает необходимость вовлечения в добычу новых углеводородных месторождений или интенсификации разработки уже осваиваемых. Большая часть простых для разработки месторождений исчерпала свой потенциал, из-за чего нефтегазовым компаниям приходится заниматься разведкой новых месторождений, искать способы интенсификации на старых и возвращаться к ранее открытым, но не используемым по причинам нерентабельности или технической невозможности освоения. Одним из направлений совершенствования добычи углеводородов является совершенствование технологий бурения скважин. Неэффективный транспорт частиц выбуренной породы (шлама) в скважине является одной из основных причин низкой эффективности процесса бурения..

Одним из способов повышения эффективности очистки скважины от выбуренной породы является использование буровых растворов с улучшенными реологическими свойствами. Для улучшения свойств буровых растворов в последнее время стали активно применяться добавки различных наночастиц. Данные исследования в настоящее время активно развиваются [1-2]. Несмотря на достаточно большое количество известных исследований модификации свойств буровых растворов с помощью добавок различных наноматериалов, большинство из них посвящены растворам на водной основе. Между тем для бурения в сложных горно-геологических условиях лучше подходят растворы на углеводородной основе.

В связи с этим в нашей работе впервые проведено систематическое расчётное исследование влияния добавок различных наноматериалов на характеристики транспорта частиц шлама в горизонтальном и вертикальном участках скважины буровыми растворами на углеводородной основе.

Базовый буровой раствор на углеводородной основе представляет собой обратную эмульсию типа «вода в масле». В работе исследовано следующее соотношение УВ/вода: 65/35. В заранее приготовленную эмульсию вводили углеродные нанотрубки.

Для моделирования выноса шлама из скважины использовалась разработанная нами ранее модель, основанная на эйлеровом подходе гранулированной среды. Буровой раствор рассматривается как неньютоновская жидкость, для описания реологии которой использовалась модель Гершеля-Балкли. В общем случае рассматривалось турбулентное течение бурового раствора. Для моделирования турбулентности использовалась двухпараметрическая $k-\omega$ SST модель. Этот подход был ранее успешно апробирован нами на задачах моделирования выноса шлама буровыми растворами на водной основе [3]. Детали численного алгоритма и результаты его успешного тестирования на большом количестве тестовых задач неньютоновских течений и транспорта частиц в кольцевых каналах описаны в наших работах [4].

Расчётная область представляет собой кольцевой канал, образованный двумя гладкими прямыми трубами круглого сечения. Внутренняя труба вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью. Для расчёта течений в скважине при прокачивании модифицированного бурового раствора выбраны типичные параметры процесса бурения наклонно-направленных скважин (расход бурового раствора, вращение бурильной трубы и размеры бурильного инструмента).

Получены зависимости эффективности выноса шлама, средней скорости проскальзывания частиц шлама и потерь давления от концентрации нанотрубок, используемых в качестве добавок. Показано, что эффективность выноса шлама во всех рассмотренных случаях растёт с увеличением концентрации добавок. Максимальное относительное приращение коэффициента эффективности выноса шлама на уровне 60%, по сравнению с базовым буровым раствором, было получено при использовании одностенных нанотрубок. Для получения такого приращения эффективности достаточно добавления всего лишь 0,1 масс.% одностенных углеродных нанотрубок.

Библиографический список

1. Ahasan M.H., Alahi Alvi M.F., Ahmed N., Alam M.S. An investigation of the effects of synthesized zinc oxide nanoparticles on the properties of water-based drilling fluid // Petr. Res.. 2022. V. 7, No. 1. P. 131–137.
2. Bardhan A., Khan F., Kesarwani H., Vats S., Sharma S., Kumar S. Synthesis and identification of ZnTiO₃ nanoparticles as a rheology modifier additive in wa-

ter-based drilling mu // Int. Pet. Tech. Conf., Bangkok, Thailand, 2023. IPTC-22878-MS

3. Gavrilov A.A., Dekterev A.A., Minakov A.V., Rudyak V.Y. A numerical algorithm for modeling laminar flows in an annular channel with eccentricity // J. App. Ind. Math. 2011. V. 5, No. 4. P. 559–568.

4. Minakov A.V., Zhigarev V.A., Mikhienkova E.I., Neverov A.L., Buryukin F.A., Guzei D.V. The effect of nanoparticles additives in the drilling fluid on pressure loss and cutting transport efficiency in the vertical boreholes // J. Pet. Sci. Eng. 2018. V. 171, P. 1149–1158.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>.

УДК 532.5, 622.24

Жигарев В.А., Минаков А.В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ ММП

На сегодняшний день более 70 % российских запасов нефти и газа сосредоточено на территориях, расположенных в районах вечной мерзлоты (ММП).

Породы вечной мерзлоты – это породы, которые постоянно находятся в условиях низких температур. Большое количество проблем возникает при разработке нефтяных и газоконденсатных месторождений в зоне вечной мерзлоты. Строительство и эксплуатация объектов нефтегазодобычи, содержащих вечную мерзлоту, осложняется проблемой частичного или полного оттаивания почв вблизи продуктивных объектов, являющихся источником тепла. Основной причиной таких осложнений является нарушение температурного режима скважины при строительстве и эксплуатации. [1-2] Это связано с использованием технических и технологических средств без учёта теплофизических процессов между буровым раствором и породой в скважине.

Цель работы усовершенствования технологии бурения скважины при бурении с промывкой пеной в многолетнемерзлых породах.

Одним из средств для проведения исследований, связанных с изучением процесса растепления многолетнемерзлых пород, является математическое моделирование, которое при многообразии и сложности теплофизических процессов, происходящих в скважине, позволяет, в отличие от инструментальных методов и средств, ускорить процесс выполнения исследований, снизить трудовые и финансовые затраты, оценить успешность применения предлагаемых технико-технологических решений, направленных на предотвращение негативного

влияния ММП на строительство и эксплуатацию скважин уже на стадиях их разработки и внедрения, а при использовании численных методов решения получить необходимые количественные зависимости.

При моделировании задавались геометрические параметры скважины близкие к типичным конструкциям, применяемым при бурении. Расчёт проводился в осесимметричной постановке. Радиус расчётной области 100 м, глубина расчётной области 600 м. Для расчёта использовалась сетка, состоящей из 600000 ячеек. Сетка была сгущена к стенкам буровой трубы и скважины. Методические расчёты показали, что такие размеры расчётной области и детализация сетки не влияют на результаты моделирования.

Максимальная длительность процесса бурения в расчёте была принята равной 5 суток. При этом использовалось приближение, что буровой раствор подавался в скважину постоянно и бурение не останавливалось. Нагрев бурового раствора из-за трения об стенки скважины и долоте не учитывался. На входе в скважину в качестве граничного условия задавалось постоянное значение расхода бурового. Температура раствора задавалась постоянной. Пройдя по буровой трубе до конца скважины, буровой раствор разворачивается и поднимается наверх по кольцевому зазору. На выходе из скважины задавались условия Неймана.

Проведены систематические расчётные исследования влияния свойств, разработанных газожидкостных буровых растворов на скорость процесса растепления ММП при бурении скважины. Исследовано влияние температуры бурового раствора на входе в скважину на скорость растепления в процессе бурения. Исследовано влияние плотности (газосодержания) пены на процесс растепления ММП.

Разработаны практические рекомендации и выбор оптимальных буровых растворов для уменьшения скорости растепления ММП в процессе бурения скважин.

Библиографический список

1. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в мерзлых породах// М.: Недра, 1983. 286 с.
2. Зверев Г.В., Тарасов А.Ю. Расчет и анализ воздействия многолетне-мерзлых пород на крепление скважины №338 Ванкорского месторождения в период эксплуатации// Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2013, Т.8, С.41–51

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRZ-2020-0012)

Иванов Ф.С., Макаров О.В., Марков А.С., Переведенцева И.В.
АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени Африкантова»

СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПГ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РУ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОЛОГИИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В АО «ОКБМ Африкантов» были выполнены ускоренные ресурсные термоциклические испытания моделей РПС кассеты ПГ для РУ стационарного и транспортного назначений. Целью испытаний являлось подтверждение проектного ресурса РПС, предназначенного для герметичного соединения элементов конструкции ПГ состоящих из разных материалов (сталь и титан).

Необходимость проведения ресурсных испытаний РПС вызвана использованием нового типоразмера соединения в отличие от ранее используемых, а также отсутствием верифицированных расчётных методик, позволяющих представительно провести расчёт НДС и циклической прочности данного конструктивного элемента ПГ. Ранее при испытаниях аналогичных узлов продолжительность проведения цикла нагружения определялась исходя из времени прогрева и охлаждения всей конструкции до полной стабилизации ее температурного состояния, что требовало значительных затрат времени и как следствие энергоресурсов для питания стенда.

С учётом развития расчётных методик и кодов был применён современный подход для оптимизации временных затрат и сокращения потребления всех сопутствующих ресурсов. Методология подхода заключалась в проведении следующей цепочки процессов.

1. Претестовые расчёты температурного состояния и НДС опытной модели для предварительной оценки продолжительности исследовательского этапа испытаний.

2. Исследовательский этап испытаний, сопоставление значений параметров нагружения модели и температур, полученных в результате расчета на первом этапе и по показаниям термопар.

3. Верификация и валидация методики расчёта температур по результатам исследовательских испытаний.

4. Посттестовые оптимизационные расчёты для определения возможности сокращения времени цикла нагружения модели.

Применение данного подхода позволило сократить время проведения испытаний на 33% для стационарной РУ и на 62% для РУ транспортного назначения. Разница возможности сокращения времени обуславливается конструктивными отличиями штатных изделий и опытных моделей, оптимизацией параметров термоциклического нагружения, и как следствие различными характе-

рами зависимостей изменения температур и временами прогрева элементов конструкций.

На этапе претестовых расчётов были определены реперные конструктивные элементы и узлы опытной модели, определен облик расчетной модели и назначены параметры нагружения для дальнейшего анализа. В качестве расчетной модели в силу симметрии достаточно было рассмотреть 1/6 часть конструкции, а анализ проводить по среднеинтегральной температуре трубной доски и НДС в узле сварного соединения переходника РПС с трубной доской как наиболее инертного с точки зрения стабилизации нагруженности. Данный подход позволяет экономить вычислительные ресурсы и сокращать время машинного счёта. Граничные условия температурного нагружения моделей задавались с использованием специально разработанных пользовательских блоков, которые позволяют производить пересчёт коэффициента теплоотдачи на каждом расчётном шаге. Применение пользовательских блоков позволяет упростить препроцессинг, а также исключить ошибки в зоне задания, обусловленные человеческим фактором. На четвертом этапе процесса были проведены варианты расчёты температурного состояния, расчёты НДС и циклической прочности опытных моделей при разных временах термоцикла нагружения.

По результатам совместных расчетов были определены временные интервалы термоцикла при котором минимальное время нагружения модели определялось, исходя из стабилизации среднеинтегральной температуры основных элементов конструкции, а максимальное – исходя из условия, при котором дальнейшее увеличение продолжительности нагружения модели не приводило бы к существенным изменениям амплитуды напряжений в конструкции. Характер изменения приведенных напряжений в определяемом анализируемом расчётном узле приведено на рисунке, из которого видно, что экстремумы напряжений, определяющие амплитуду и циклическую прочность, реализуются в начальные моменты подачи сред.

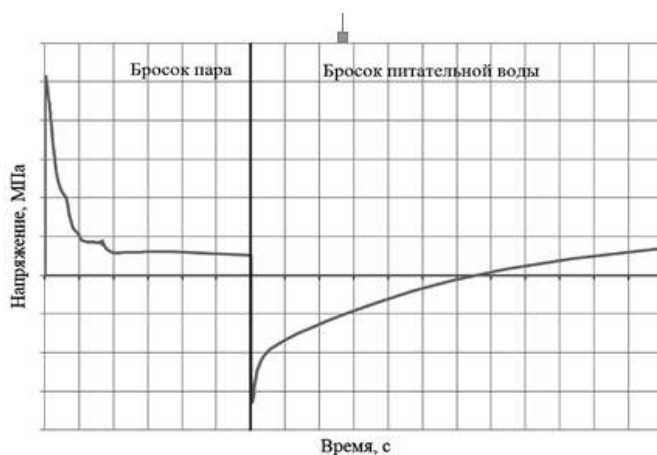


Рис.1. Изменение приведенных напряжений в расчетном узле

В совокупности ранее изложенного по результатам серии расчетов температурного состояния, НДС и циклической прочности при различных временах подачи сред была определена оптимальная продолжительность термоцикла нагружения опытной модели, позволившая сократить временные и сопутствующие затраты на испытания с обеспечением их представительности.

УДК 536.2

**Борисов Б.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А.,
Салагаев С.О.**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ВОЗДУХООБМЕНА НА КОНЦЕНТРАЦИЮ CO₂ В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ В ПОМЕЩЕНИИ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

Создание локальных рабочих зон в крупногабаритных производственных помещениях с использованием газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) светлого (открытого) типа имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными системами отопления [1, 2]. Но работа излучателей такого типа приводит к загрязнению помещения выбросами продуктов сгорания газа (в основном CO₂). Поэтому для обеспечения регламентных условий (температура и концентрация CO₂) в локальной рабочей зоне в помещении с ГИИ необходима работа системы воздухообмена.

Целью работы является оценка влияния месторасположения и режимов работы областей притока и оттока воздуха системы воздухообмена на тепловые и концентрационные поля локальной рабочей зоны при использовании ГИИ светлого типа.

Математическое моделирование конвективно-кондуктивного переноса теплоты в области решения задачи проведено с использованием пакета COMSOL Multiphysics – модули «The Heat Transfer in Fluids Interface», «The Turbulent Flow, k-ε Interface», переноса CO₂ – модуль «Transport of Concentrated Species». Параметры радиационного теплового потока вычислялись в модуле «Surface-to-Surface Radiation» в рамках зонной модели с учетом средних угловых коэффициентов [2].

Задача решена в плоской постановке. Рассматривается прямоугольная область с излучателем, областями притока и оттока воздуха и горизонтальной панелью, имитирующей оборудование.

Исходные данные: начальная температура в помещении и на входе притока воздуха 7° С; начальная концентрация CO₂ в помещении и на входе притока воздуха 400 ppm, температура нагретой поверхности ГИИ 800° С; массовый расход воздуха системы воздухообмена от $4,22 \cdot 10^{-4}$ до $4,55 \cdot 10^{-5}$ кг/(с·м³).

Анализировались результаты моделирования полей температур, скоростей и концентраций CO_2 , формирующихся к 60 минуте работы ГИИ. К данному моменту заканчивался период интенсивного изменения параметров нагрева [2]. Варьировались массовый поток и тип принудительного воздухообмена (приточного или вытяжного), а также положение элементов воздухообменного оборудования.

На рис. 1-2 представлены, соответственно, поле концентраций и распределение концентраций по высоте вблизи горизонтальной панели (20 см слева и справа от панели, где предположительно находится работающий). Система воздухообмена работает в «вытяжном» режиме, массовый расход $4,55 \cdot 10^{-5}$ кг/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$), области оттока и притока воздуха находятся справа и слева от ГИИ, соответственно. Нагретый и загрязненный углекислым газом от работающего ГИИ воздух находится в верхней части помещения, где в основном удаляется через вытяжной канал системы воздухообмена. В эту же область поступает и «свежий» воздух из приточного канала где, смешиваясь с загрязненным, снижает концентрацию CO_2 в воздухе, а затем поступает в локальную рабочую зону (рис. 1).

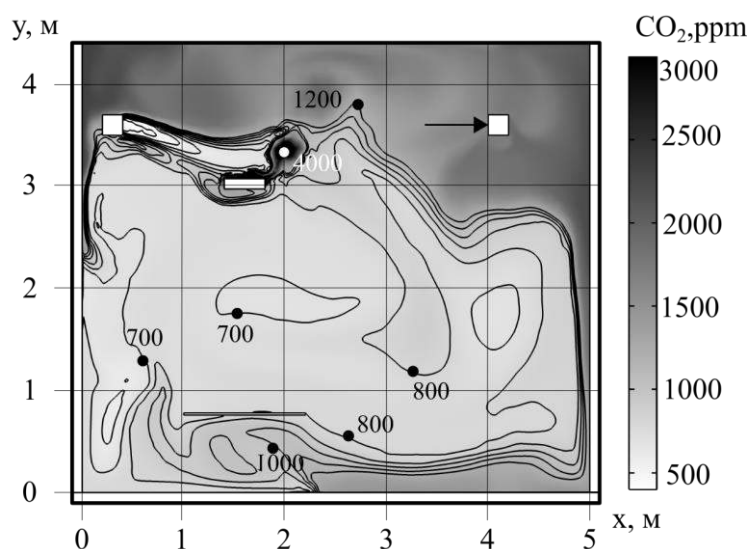


Рис. 1. Поле концентраций CO_2 , установившиеся к 60 минуте работы ГИИ при вытяжном режиме работы системы воздухообмена.

В зоне предположительного расположения органов дыхания работающего формируется сравнительно небольшое превышение концентраций CO_2 (до 700-800 ppm) над естественным фоном (400 ppm) (рис. 2).

Установлено, что обеспечение регламентной температуры и концентрации CO_2 в локальной рабочей зоне можно добиться не только изменением расхода, расположением областей притока и оттока воздуха, но и режимом работы системы воздухообмена (приточный или вытяжной).

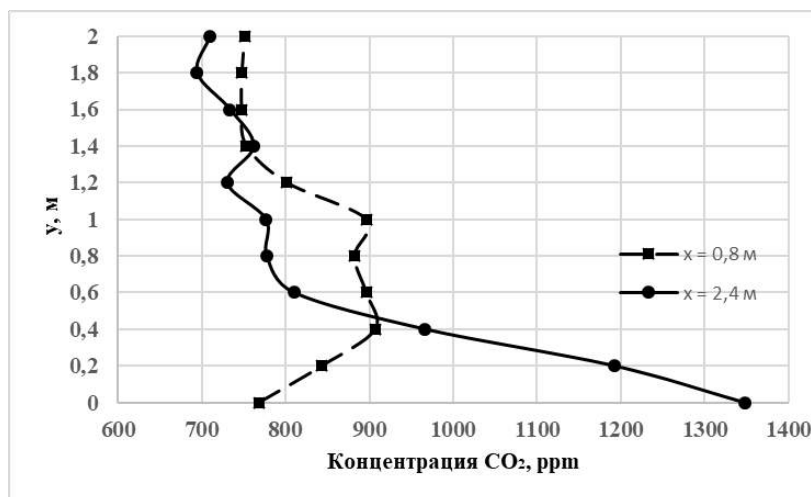


Рис.2. Расчетное распределение концентраций CO₂, к 60 минуте работы ГИИ слева (x=0,8 м) и справа (x=2,4 м) от горизонтальной панели

Библиографический список

1. Борисов Б.В., Вяткин А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А. Математическое моделирование теплопереноса в помещении с газовым инфракрасным излучателем, системой воздухообмена и локальным ограждением рабочей зоны // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 26. № 1. С. 20–32.
2. Borisov B.V., Vyatkin A.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Analysis of the Influence of the Gas Infrared Heater and Equipment Element Relative Positions on Industrial Premises Thermal Conditions // Energies. 2022. V. 15. Article number 8749.

Работа поддержана РФФ (грант № 20-19-00226).

УДК 532, 537.84

Окатыев Р.С., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь
Пермский государственный национальный исследовательский университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕПАРАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ ПРИМЕСИ В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯХ

Жидкие металлы находят широкое применение в различных областях промышленности. В частности, они используются в качестве теплоносителей на атомных электростанциях. Одним из факторов, потенциально влияющих на работу жидкометаллических технологических устройств, является то, что все

жидкие металлы содержат примеси (оксиды, кристаллиты и др.). Очистка жидких металлов от примесей является важной технологической задачей.

Экспериментальные исследования процессов, протекающих в жидких металлах, осложняются их высокой химической агрессивностью и оптической непрозрачностью. Альтернативой натурным экспериментам может служить математическое моделирование, позволяющее детально исследовать отдельные характеристики соответствующих процессов.

При моделировании частиц примеси как отдельной дисперсной фазы возможны два принципиально разных подхода. Первый подход основан на модели многоскоростного континуума [1]. В рамках моделей такого типа двухфазная среда представляет собой совокупность взаимопроникающих жидкостей, каждая из которых занимает весь объем и характеризуется объемной долей. Гидродинамическое взаимодействие фаз описывается силовым слагаемым, пропорциональным разности скоростей фаз. Основным недостатком моделей данного класса является сложность при идентификации параметров. В общем случае, параметры, характеризующие свойства дисперсной фазы не только являются материальными параметрами, но и каким-то функциональным образом зависят от характеристик процесса (например, от скорости течения). Для определения соответствующих параметров необходимо проводить эксперименты, результаты которых едва ли можно считать универсальными. Ситуация еще сильнее осложняется в случае магнитной гидродинамики.

Другой подход связан с рассмотрением динамики отдельных частиц примеси (комбинированная лагранжева-эйлерова модель). Для каждой из частиц решается уравнение движения с учетом различных сил, таких как подъемная сила, сила трения, электромагнитная сила и т.д. Несмотря на то, что трудности при идентификации параметров подмоделей остаются примерно теми же, что и в случае моделей многоскоростных континуумов, ситуация несколько облегчается тем, что при построении моделей можно использовать решения модельных задач на мезо- и микромасштабах (для отдельных частиц). Примером такого решения является выражение для электромагнитной силы, действующей на частицу, проводимость которой отличается от проводимости несущей жидкости [2].

В рамках данной работы рассмотрена задача о моделировании процесса сепарации непроводящей примеси при течении двухфазной среды по цилиндрическому каналу. Использована комбинированная лагранжева-эйлерова модель. Предполагалось, что на отдельную частицу действуют сила гидродинамического сопротивления, подъемная сила Саффмана, сила присоединенных масс и электромагнитная сила, посчитанная по модели Леенова-Колина. Электромагнитная сила, действующая на несущую фазу, полагалась радиально направленной с экспоненциальным затуханием вглубь образца. Параметризация электромагнитной силы была выбрана так, чтобы при увеличении частоты индуцированного магнитного поля сила возрастала по абсолютному значению, однако область ее действия смещалась к границе канала. В качестве величины, опреде-

ляющей эффективность сепарационного процесса, введен коэффициент сепарации, выражающий отношение числа частиц, достигнувших стенки канала к общему числу запущенных частиц. Определены зависимости коэффициента сепарации от частоты магнитного поля, расхода жидкости и радиуса канала.

Библиографический список

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Часть I. М.: Наука. 1987. 464 с.
2. Leenov D., Kolin A. Theory of electromagnetophoresis. I. Magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles // The Journal of Chemical Physics. 1954. 22. № 4. P. 683–688.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106/>.

УДК 536.2, 699.86

Парфенов Г.И., Смирнов Н.Н., Тютиков В.В.

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина

ИМИТАЦИОННОЕ ДВУХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ ОКОННЫЙ БЛОК С ТЕПЛОТРАЖАЮЩИМИ ЭКРАНАМИ

Светопрозрачные ограждающие конструкции (далее СПК) являются "слабым звеном" в тепловой защите зданий. На данные элементы приходятся самые большие удельные трансмиссионные потери среди всех ограждающих конструкций. На современном рынке технологий по повышению тепловой защиты СПК предлагается целый спектр решений [1], среди которых необходимо особо выделить использование мобильных (перемещаемых) теплоотражающих экранов [2, 3]. Были проведены экспериментальные исследования [3] в климатической камере АНО "Ивановостройиспытания", подтвердившие высокую энергоэффективность применения экранов в окнах. Численное моделирование в диссертационной работе [3] было выполнено только для светопрозрачной части окна в одномерной постановке с помощью эмпирических зависимостей в программе Matlab, в трехмерной постановке – в Phoenix с помощью метода конечных элементов. К сожалению, в моделях было принято допущение об адиабатности в зоне контакта стеклопакета с дистанционной рамкой.

В продолжении исследований с помощью метода конечных элементов была разработана двухмерная имитационная модель процесса теплопередачи через оконный блок с экранами, установленный в перегородке, разделяющей теплое и холодное отделения климатической камеры (см. рис. 1).

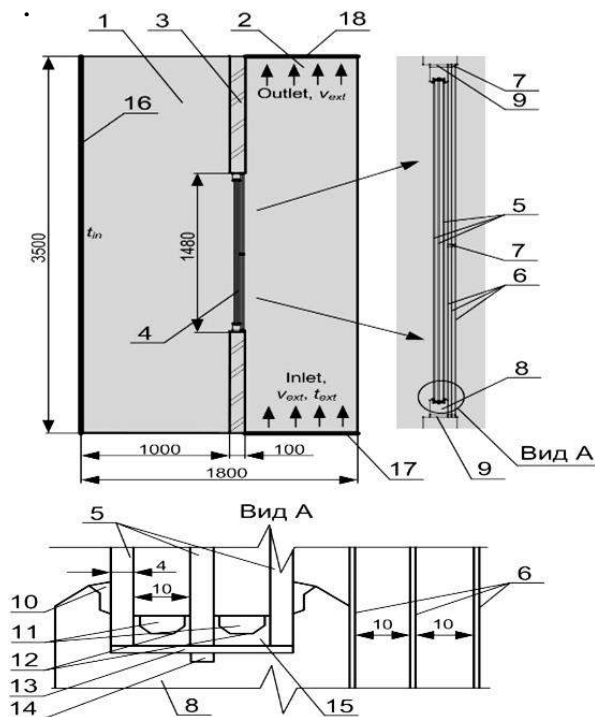


Рис. 1. Расчетная схема модели: 1, 2 – теплое и холодное отделения климатической камеры; 3 – кирпичная перегородка; 4 – испытуемый оконный блок; 5 – стекла; 6 – металлические экраны; 7 – разделительная пластиковая планка; 8 – деревянная рама; 9 – теплоизоляция из пенополиуретана; 10 – силиконовый герметик; 11 – осушитель; 12 – дистанционная рамка; 13 – пластиковая проставка; 14 – паз для вентиляции; 15 – герметик; 16 – "теплая" стена; 17, 18 – подача, отвод воздуха в отделение

В результате проведения многовариантного имитационного моделирования были определены локальные значения таких параметров как температура, скорость воздуха, удельный тепловой поток и сопротивление теплопередаче конструкции R_0 (рис. 2), построены параметрические поля.

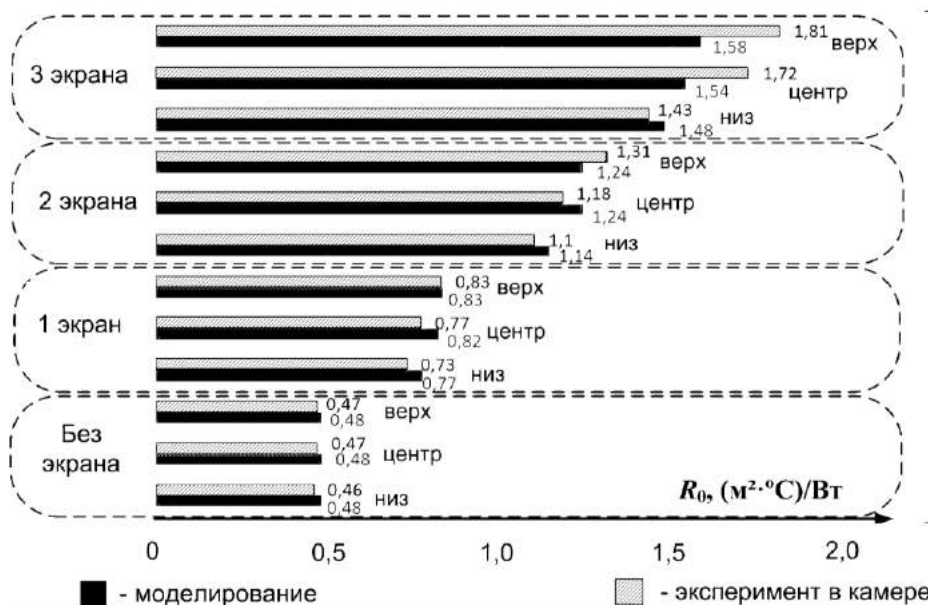


Рис. 2. Сравнение значений приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока R_0 в нижней, центральной и верхней точках замера при различном количестве экранов со стороны холодного отделения, полученных в ходе имитационного моделирования и физического эксперимента в климатической камере

Относительная погрешность для приведенного сопротивления R_0 между результатами имитационного моделирования и экспериментально полученными данными не превысила 4,3 % для стеклопакета (СПД), 6,5 % – для СПД и 1 экрана, 5,6 % – для СПД и 2 экранов, 14,6 % – для СПД и 3 экранов.

Было установлено, что применение теплоотражающих экранов в оконном блоке позволило увеличить приведенное сопротивление теплопередаче в 1,6-3,7 раза в зависимости от их количества. Было выявлено значительное снижение температуры в краевых зонах стеклопакета. Использование разработанной имитационной модели позволит более точно определить потенциал применения теплоотражающих экранов в окнах для систем прерывистого отопления зданий.

Библиографический список

1. Ахмяров Т.А., Спиридонов А.В., Шубин И.Л. Новое поколение энергоэффективных вентилируемых светопрозрачных и фасадных конструкций с активной рекуперацией теплового потока // Жилищное строительство. 2015. № 1. С. 18-23
2. Низовцев М.И., Терехов В.И. Светопрозрачные конструкции с регулируемыми тепловыми характеристиками // Проблемы региональной энергетики. 2011. № 1. С. 60-76.
3. Смирнов Н.Н. Совершенствование систем по созданию динамического микроклимата для помещений с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями: дис. канд. техн. наук: 05.14.04. Иваново, 2022. 333 с.

УДК 620.9: 697.341

Постников И.В., Медникова Е.Е.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ПОДСИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ПРОСЬЮМЕРА В ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ

Представлены основные результаты практического применения разработанного авторами методического обеспечения для решения задач эффективного развития теплоснабжающих систем (ТСС) с учетом их трансформации к системам централизованно-распределенного типа (ЦРТСС). Основные задачи заключались в определении зон эффективности централизованного теплоснабжения на основе критерия радиуса эффективного теплоснабжения (РЭТ), технико-экономической оценке имплементации распределенных источников тепловой энергии (ИТ) просьюмеров на границах РЭТ, анализе и обеспечении надежности функционирования формируемого сектора распределенного теплоснабжения (РТ).

Исследуемая ТСС функционирует в административном районе г. Иркутска, обеспечивая тепловой энергией потребителей с суммарной нагрузкой 219 Гкал/ч. Централизованным ИТ является котельная установленной мощностью 257 Гкал/ч. Приблизительная конфигурация исследуемой системы на карте местности показана на рис. 1. Для исследуемой ТСС проведена оценка границ РЭТ в соответствии с заданной нормативной величиной удельных эксплуатационных затрат. Определено, что за границами эффективности централизованного теплоснабжения (границами РЭТ) расположено 14 ответвлений (секторов) сети с суммарной протяженностью 14,8 км (38%) и 42 (46%) узла расчетной схемы с суммарной нагрузкой 85,3 Гкал/ч (39%).

Далее для оценки эффективности внедрения просьюмера с собственным ИТ (сектора РТ) выбрано одно из ответвлений, обобщенный потребитель которого становится активным, оставаясь фактически подключенным к централизованной системе, обладая при этом собственной генерацией. Расчет эксплуатационных затрат в пределах исследуемой подсистемы просьюмера показал, что в зоне РЭТ расположено 69% узлов системы с нагрузкой 7,78 Гкал/ч (88%) и 3734 м сети (83%), а максимальное смещение границ РЭТ составило 2978 м. При этом стоимость ТЭ для всех узлов значительно снижена по сравнению с исходной схемой теплоснабжения от централизованного источника: среднее снижение стоимости составило 548 руб./Гкал (25%). Предполагается, что часть схемы, не входящая в границы РЭТ (12% по нагрузке), предназначена для внедрения второго уровня РТ.

В результате проведенного анализа надежности исследуемого сектора РТ получены значения узлового показателя вероятности безотказной работы (ВБР). Уровень надежности локализованной системы при подключении просьюмера значительно повышается по сравнению с исходной схемой: рост составляет 44% (по количеству узлов). Соответственно, снижается и ожидаемый недоотпуск тепловой энергии.



Рис. 1. Исследуемая ТСС на карте местности (приблизительная конфигурация): КСПУ – котельная, АП – активный потребитель (просьюмер)

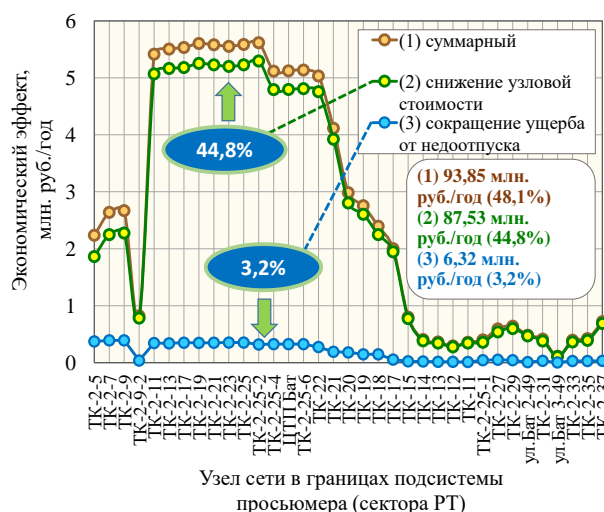


Рис. 2. Распределение экономического эффекта по узлам подсистемы просьюмера

Суммарный экономический эффект внедрения сектора РТ с просьюмером оценивается на уровне 93,85 млн руб./год, что составляет 48,1% от эксплуатационных затрат, соответствующих исходной схеме (рис. 2). Основная часть экономии связана со снижением стоимости тепловой энергии и составляет 87,53 млн руб./год (44,8%) и лишь 6,32 млн руб./год (3,2%) – с сокращением ожидаемого ущерба от недоотпуска тепловой энергии потребителям.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ №22-29-01252

УДК 620.9: 697.341

Постников И.В., Медникова Е.Е.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ СИСТЕМ С ПРОСЬЮМЕРАМИ

Сектор распределенного теплоснабжения в централизованно-распределенных теплоснабжающих системах (ЦРТСС) формируется, главным образом, на уровне активных потребителей или просьюмеров (prosumer: professional consumer или producer & consumer). Внедрение просьюмеров с собственными источниками тепловой энергии (ИТ) определяет новые свойства исследуемых систем, что требует разработки методического обеспечения для решения задач их функционирования, управления и развития.

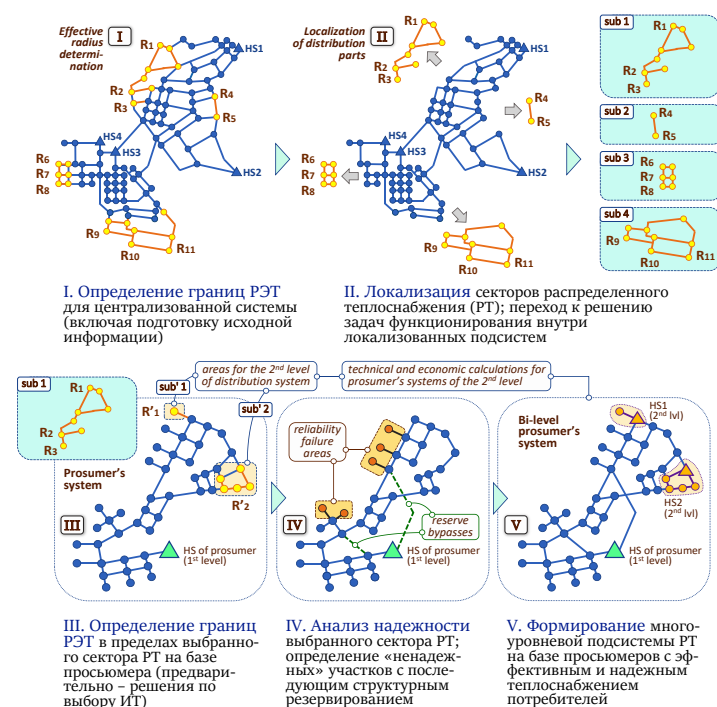


Рис. 1. Этапы формирования централизованно-распределенных ТСС с определяющими критериями экономической эффективности и надежности теплоснабжения

Для решения ключевых научно-методических задач функционирования ЦРТСС с проьюмерами предложен ряд методов, основанных предыдущих разработках авторов по решению задач обеспечения эффективности и надежности теплоснабжения с применением критерия *радиуса эффективного теплоснабжения (РЭТ)* и *комплексно-иерархического анализа надежности ТСС*. При решении рассматриваемых задач (обеспечения эффективности и надежности) применяется узловой подход, позволяющий получать детализированные результаты, максимально адаптированные к реальным условиям функционирования исследуемых систем.

Предложенные методы и модели легли в основу алгоритма трансформации существующих ТСС в централизованно-распределенные системы с имплементацией проьюмеров для покрытия нагрузки, выходящей за границы эффективности централизованного теплоснабжения. Основные этапы формирования ЦРТСС приведены на рис. 1. На этапе I определяются границы эффективности централизованного теплоснабжения исходной схемы ТСС на основе критерия РЭТ. Далее, на этапе II производится локализация секторов РТ с переходом к решению задач функционирования внутри локализованных подсистем проьюмеров. Этап III соответствует определению границ РЭТ в пределах выбранного сектора РТ на базе проьюмера. При наличии потребителей, находящихся за этими границами, предполагается их подключение к источнику *второго уровня* РТ: таким образом формируется двухуровневая (в общем случае – многоуровневая) иерархическая структура со своими проьюмерами на каждом уровне

генерации. На этапе IV решается задача анализа надежности в полученных границах эффективности выбранного сектора РТ с определением «ненадежных» узлов и последующим их структурным резервированием. На этапе V формируется итоговая многоуровневая подсистема РТ на базе просьюмеров с эффективным и надежным теплоснабжением потребителей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ №22-29-01252.

УДК 621.9

Терешкин В.С., Левашов В.Ю.

Институт Механики МГУ им. М.В. Ломоносова
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Представлен подход, позволяющий определять количество и размеры кластеров в пересыщенном паре, базирующийся на методах молекулярно-динамического моделирования [1]. С использованием данного подхода рассмотрены две задачи: а) конденсация пересыщенного пара в замкнутом объеме; б) конденсация пара вблизи поверхности пленки жидкости в задаче о перекоонденсации. При рассмотрении процесса конденсации в замкнутом объеме (задача а)) система первоначально приводится к равновесному состоянию с параметрами (температурой и давлением) на бинодали пара. Для этих целей используется термостат с заданными параметрами – этап предварительной термостабилизации. После завершения этапа термостабилизации продолжается наблюдение за системой при «отключенном» термостате в течении нескольких временных шагов. Затем «включается» новый термостат, который охлаждает равновесный пар за короткий промежуток времени до достижения необходимой степени пересыщения (отношению парциального давления пара к давлению насыщения).

При молекулярно-динамическом моделировании задачи перекоонденсации (задача б)) необходимы две поверхности конденсированной фазы, находящиеся при различных температурах. Для этих целей пленка жидкости, расположенная в центре расчетной области, подвергается воздействию термостата температура которого зависит от координаты. В результате такого воздействия внутри пленки жидкости возникает градиент температур, приводящий к испарению жидкости с одной поверхности и конденсации на другой. Периодические граничные условия накладываются на все три измерения расчетной области. Более подробно постановка задачи описана в работе [2].

В обеих задачах рассматривался одноатомный модельный аргон со сглаженным потенциалом Леннард-Джонса.

Для рассмотрения процесса гомогенной конденсации в методах молекулярной динамики важно определить кластеры. Некоторые подходы к определению кластеров представлены в работе [3].

В данной работе под кластером понимается устойчивое объединение однотипных элементов, каждый из которых находится в связанном состоянии хотя бы с одним другим элементом, принадлежащим этому кластеру.

Для определения связанности используется два критерия:

- 1) критерий близости, согласно которому частицы находятся в связанном состоянии, если расстояние между ними меньше заданного, называемого радиусом связанности;
- 2) критерий минимума суммы потенциальной и кинетической энергии частицы, согласно которому частица не может находиться в связанном состоянии, если сумма энергий не отрицательна.

Пример кластера, полученного с использованием данного подхода, представлен на рис. 1. На рисунке цветом выделен уровень кинетической энергии частицы – чем темнее цвет, тем меньше кинетическая энергия.

Результатом моделирования является функция распределения кластеров по размерам для различных степеней пересыщения. Примеры функций распределения для начальных степеней пересыщения $S=6$ и $S=1$ представлен на рис. 2.



Рис. 1. Пример кластера. Чем темнее частица, тем меньше ее кинетическая энергия

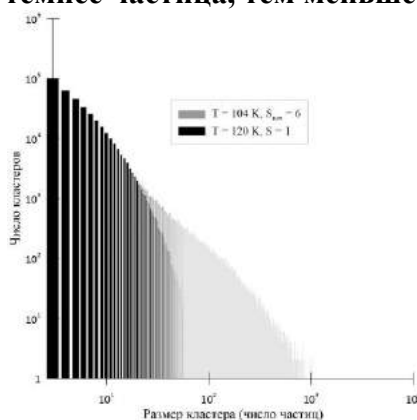


Рис. 2. Пример функции распределения кластеров по размерам для пара на бинодали (черный цвет) и для пересыщенного пара (серый цвет)

Библиографический список

1. Rapaport D.C. The art of molecular dynamics simulation. Second Edition, Cambridge University Press, 2004
2. Vasily V. Zhakhovsky, Alexei P. Kryukov, Vladimir Yu Levashov, Irina N. Shishkova, and Sergey I. Anisimov. Mass and heat transfer between evaporation and condensation surfaces: Atomistic simulation and solution of boltzmann kinetic equation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 116(37):18209–18217, 2019. DOI: 10.1073/pnas.1714503115
3. Sator N. Clusters in simple fluids // Physics Reports 2003, 376 (1), 1 – 39.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 22-19-00044).

УДК 532.5

Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ ПРИ МИКРО-ВЗРЫВНОМ РАСПАДЕ ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ

Вторичное измельчение многокомпонентных капель жидкостей считается одним из наиболее актуальных направлений развития топливных технологий. Среди известных способов вторичного измельчения микро-взрывной распад считается наиболее продуктивным вследствие существенно большего роста площади поверхности жидкости в единицу времени [1]. Определение условий, необходимых для образования вторичных фрагментов определенных размеров и скоростей движения, позволит достичь оптимальных режимов работы технологического оборудования.

Большинство существующих моделей микро-взрывного распада позволяют с высокой степенью точности прогнозировать время задержки микро-взрывного распада, но в то же самое время не дают представлений о количестве и средних размерах вторичных фрагментов, по причине отсутствия адекватных экспериментальных сведений и сложностей вычислений. В настоящей работе разработана математическая модель образования вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель.

Методика проведения экспериментов по регистрации характеристик и последствий микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель аналогична использованной в работе [2]. Основное внимание уделено регистрации количества и размеров вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде. Характе-

ристики вторичных капель представлены в виде распределений $N(r_{cd})$, а также в виде отношения площадей после и до распада S_1/S_0 . При проведении экспериментов в качестве компонентов капель использовались вода, керосин, дизельное топливо и рапсовое масло.

Для моделирования распада двухжидкостной капли применялся метод VOF (Volume of Fluid) [3]. В данном подходе жидкая и газовая фазы рассматриваются в качестве единой многокомпонентной среды, при этом распределение фаз в расчетной области определяется с помощью специальной функции маркера $F(x,y,z,t)$. Объемная доля фазы в расчетной ячейке принимается равной $F(x,y,z,t) = 0$, в случае если ячейка пустая, $F(x,y,z,t) = 1$, в случае если ячейка полностью заполнена фазой, и $0 < F(x,y,z,t) < 1$, в случае, если через ячейку проходит граница раздела фаз. В каждой ячейке сумма объемных долей всех фаз равная 1. Отслеживание перемещения свободной границы жидкости в пространстве осуществляется путем решения уравнения переноса объемной доли фазы в ячейке. При моделировании распада двухжидкостной капли предполагалось, что вода внутри капли достигла состояния перегрева, т.е. условий микро-взрывного распада [4], в результате чего вблизи границы «вода/топливо» образовалась паровая прослойка. Увеличение размеров капли происходило за счет постоянного притока паров с границы «вода/топливо», давление паров задавалось в качестве постоянной величины. При рассмотрении задачи микро-взрывного распада двухжидкостной капли предполагалось, что в формировании вторичных фрагментов участвует только топливная оболочка, т.е. в настоящем исследовании не учитывается фрагментация водяного ядра. Как показали ранние исследования, вторичные фрагменты воды, образующиеся в результате микро-взрывного распада, составляют не более 10% от общего объема вторичных фрагментов и представляют собой крупные жидкостные фрагменты с размерами 0,15 мм и более.

По результатам работы была разработана математическая модель для прогнозирования последствий микро-взрывного распада двухжидкостных капель. При сравнении с экспериментальными данными модель демонстрирует хорошее соответствие. Настоящая модель может быть использована для создания новых комплексных подходов к моделированию микро-взрывного распада, позволяющих прогнозировать не только время задержки распада, но также его последствия в виде характеристик вторичных фрагментов.

Библиографический список

1. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Appl. Therm. Eng. 2020. V. 164. 114501.
2. Antonov D.V., Volkov R.S., Fedorenko R.M., Strizhak P.A., Castanet G., Sazhin S.S. Temperature measurements in a string of three closely spaced droplets

before the start of puffing/micro-explosion: Experimental results and modelling // Int. J. Heat Mass Transf. 2021. V. 181. 121837.

3. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comp. Phys. 1981. V. 39. P. 201–225.

4. Fedorenko R.M., Antonov D.V., Strizhak P.A., Sazhin S.S. Time evolution of composite fuel/water droplet radii before the start of puffing/micro-explosion // Int. J. Heat Mass Transf. 2022. V. 191. 122838.

*Экспериментальные исследования выполнены при поддержке гранта РНФ (проект 21-71-10008, <https://rscf.ru/project/21-71-10008/>),
Разработка математической модели выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2020-806 (грант № 13.1902.21.0014).*

УДК 51-72

Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю., Чебакова Е.В.

Казанский федеральный университет, г. Казань

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ РАСТВОРА КОН

В настоящее время во всем мире происходит поиск технологий, позволяющих использовать альтернативные (возобновляемые) источники энергии, что связано как с ухудшением экологической обстановки, так и с возрастающими потребностями в электроэнергии. В современных условиях при переходе к альтернативным источникам энергии актуальное значение придается водородной энергетике. Одним из наиболее распространенных способов получения водорода является электролиз.

Несмотря на большое количество работ, посвященных моделированию процессов электролиза, в силу сильного различия процессов, проходящих в разных расплавах и растворах с разным водородным показателем, математические модели, существующие в настоящее время, нуждаются в адаптации под каждый конкретный электролит и состав электродов. Так на примере водных растворов можно показать, что чистая вода является слабым электролитом и в результате реакции автопротолиза диссоциирует с образованием ионов гидратированного протона – гидрооксония и ионов гидроксида, в щелочных средах концентрация гидрооксония чрезвычайно мала и вода диссоциирует на ион водорода и гидроксид.

В данной работе предложена математическая модель процесса электролиза гидроксида калия с инертными электродами, которая позволяет рассчитать пространственные распределения электрического поля и водородного показателя.

Математическая модель процесса электролиза раствора построена при следующих предположениях:

- Гидроксид калия является сильным основанием, поэтому, пренебрегая неидеальностью растворов, можно считать, что КОН полностью диссоциирует на ионы.

- Ионное произведение мало и концентрацию воды можно считать постоянной.

- Ионы натрия K^+ на электродах не разряжаются, накапливая с течением времени концентрацию в катодном пространстве и уменьшая ее в анодном.

- При постановке граничных условий будем считать, что электрод инертен.

В растворах КОН при умеренных плотностях тока реагентом является вода, так как активность ионов гидроксония чрезвычайно мала, поэтому электрохимическая стадия состоит в восстановлении молекул воды, концентрация которых у поверхности электрода всегда велика.

С учетом данных предположений математическая модель включает в себя:

- уравнения Нернста–Планка для заряженных частиц;

- уравнение для потенциала электрического поля;

При постановке граничных условий необходимы знания о процессах, происходящих на поверхности электродов, в нашем случае будем считать электроды инертными.

При электролизе в щелочной среде раствора КОН на катоде протекают следующие стадийные электрохимические реакции $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$, $H^+ + OH^- \rightarrow H_2O$, $H^+ + e \rightarrow H$, $H + H \rightarrow H_2$. На аноде происходит выделение водорода $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$, $H^+ + OH^- \rightarrow H_2O$, $2OH^- + 2e \rightarrow O + H_2O$, $O + O \rightarrow O_2$. Таким образом, для нахождения граничных условий для уравнений переноса реагирующих на электродах частиц необходимо знать скорости стадийных процессов, влияющих на их концентрацию. Так как концентрация частиц на поверхности определяется суммарным результатом стадийных процессов.

Константы стадийных электрохимических реакций находятся с помощью алгоритма описанного в работах [1,2]. Данный численный алгоритм позволяет находить скорости констант в приэлектродных процессах в соответствии с заданными экспериментальными данными по выходу, а также рассчитывать концентрации веществ, участвующих в приэлектродных процессах на конкретные моменты времени. Алгоритм строится на модифицированном методе прямого поиска (метод Хука-Дживса) с дополнительной проверкой условий. Данный вычислительный алгоритм верифицирован на натурном эксперименте описанном в [3].

Для решения рассматриваемой задачи предложен численный алгоритм, основанный на конечномерной аппроксимации задачи с помощью разностных схем с последующим применением для ее реализации итерационного процесса, предложенный в работе [4].

Результаты численных расчетов не противоречат физики процесса. Полученное пространственное распределение характеристик имеет области больших градиентов в приэлектродной области, что объясняется тем что электролиз относится к гетерогенным процессам и протекает на поверхности электродов.

Библиографический список

1. Кашапов Р.Н., Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю.. Кинетика двухфазных газожидкостных сред в процессах электролиза //ТВТ. 2021. Т. 59. № 6. С. 869-876.
2. Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю. Математическое моделирование катодных процессов при получении водорода// Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 1. С. 99-105.
3. Бабаев Р.К., Алиев С.А.// Проблемы науки, 2018 Т.4 №28, С. 31-33,
4. Чебакова В.Ю. Моделирование высокочастотного емкостного разряда при атмосферном давлении в аргоне//Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2016. Т. 158. № 3. С. 404-423

Работа поддержана РФФ (грант № 23-29-00099).

УДК 621.039.586

Мельников И.А., Шмельков Г.Б., Голубев М.А., Великанов А.В.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г.
Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПОЛОСТИ НАД РАСПЛАВОМ

Тяжелая авария на АЭС с реактором типа ВВЭР сопровождается разогревом и расплавлением материалов активной зоны, вследствие чего происходит образование ванны высокотемпературного расплава. Расплав представляет собой нагретую свыше 2000 К вязкую жидкость с объемным тепловыделением, состоящую из расплавленных компонент активной зоны. При подобных температурах вклад радиационного теплообмена в общий процесс теплопередачи становится существенным, в некоторых случаях теплообмен излучением представляет собой основной механизм отвода тепла от расплава. В современных расчетных кодах, предназначенных для моделирования процесса протекания тяжелой аварии, теплообмен излучением моделируется с упрощениями.

В данной работе представлено описание расчетного модуля THERA (Thermal Radiation), входящего в интегральный тяжелоаварийный код TSAR

(Toolkits for Severe Accident Research). Модуль THERA позволяет осуществлять расчет теплообмена излучением в полости над расплавом в условиях сложной геометрии с наличием поверхностей, затеняющих друг друга. Расчет радиационного теплообмена возможен как в оптически-прозрачной среде, так и с учетом присутствия поглощающих и излучающих газов в полости.

В качестве основного расчетного метода был выбран зональный метод [1]. В его основе лежит понятие углового коэффициента – геометрическая характеристика расчетной области, которая определяет долю излучения, испущенного поверхностью 1 и падающего на поверхность 2:

$$\varphi_{12} = \frac{S_1 S_2 \cos(\beta_1) \cos(\beta_2)}{\pi |\vec{R}_{12}|^2} \quad 1)$$

где S_1, S_2 – площади поверхностей 1 и 2 соответственно, \vec{R}_{12} – вектор, соединяющий барицентры поверхностей 1 и 2, β_1, β_2 – углы между нормальными к поверхностям 1 и 2 и вектором \vec{R}_{12} .

Трехмерная расчетная область разбивается на N конечных треугольных поверхностей, для каждой пары поверхностей рассчитывается угловой коэффициент. Учет сложной геометрии расчетной области основан на определении видимости поверхностей относительно друг друга. На каждой k -й поверхности записываются условия баланса плотностей тепловых потоков излучения:

$$q_{рез,k} = q_{эфф,k} - q_{пад,k} \quad 2)$$

где $q_{рез,k}$ – плотность результирующего потока излучения, $q_{эфф,k}$ – плотность эффективного теплового потока излучения, исходящего с k -й поверхности, как сумма плотности излучающего теплового потока излучения с площадки k и плотности отраженного теплового потока излучения, $q_{пад,k}$ – плотность падающего теплового потока излучения на поверхность k .

С помощью понятия эффективной плотности теплового потока излучения записывается итоговая система линейных алгебраических уравнений. Моделирование радиационного теплообмена возможно в замкнутой и незамкнутой расчетных областях. Моделирование теплообмена излучением в полости, заполненной поглощающей и излучающей газовой средой, осуществляется модифицированным зональным методом с использованием модели учета радиационных свойств газов, основанной на глобальной функции распределения поглощения [2].

В ходе работы было проведено моделирование лучистого теплообмена модулем THERA с поверхности расплава, расположенного на днище корпуса реактора ВВЭР - 1000, на конструкции реакторной установки на в рамках анализа внутрикорпусной стадии тяжелой аварии. В качестве исходных данных по составу расплава и его теплофизическим характеристикам используются резуль-

таты моделированию обобщенного сценария гипотетической тяжелой аварии на АЭС с реактором ВВЭР – 1000 кодом СОКРАТ В1 - В2. В ходе протекания внутрикорпусной стадии тяжелой аварии в полости расплава образуется парогазовая смесь, состоящая из водяного пара и водорода. Моделирование проводилось для случая оптически – прозрачной и газовой полости. В результате работы получены данные по тепловым потокам излучения к элементам конструкции реакторной установки.

Библиографический список

1. Hottel H.C., Sarofim A.F., Radiative Transfer / NY, McGraw-Hill Book Company - 1967;
2. Denison M. K. and Webb B. W. (1993a), A spectral line-based weighted-sum-of-gray-gases model for arbitrary RTE solvers// ASME J. Heat Transfer, 1993a (115)pp. 1004–1012.

УДК 621.039

Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В., Савекин С.С., Яковлева О.В.
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ АНАЛИЗА РАДИАЦИОННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ НА АЭС С ВВЭР

При обосновании безопасности АЭС важную роль играет анализ радиационных последствий запроектных аварий (ЗПА), включая тяжелые аварии (ТА). В соответствии с требованиями нормативной документации [1], анализ ЗПА должен выполняться в реалистическом приближении. При этом, задача анализа радиационных последствий ЗПА может быть разделена на несколько крупных подзадач:

- 1) моделирование накопления продуктов деления (ПД) под оболочками твэлов;
- 2) моделирование выхода ПД при плавлении топлива;
- 3) моделирование выхода ПД из расплава кориума;
- 4) моделирование переноса ПД в системе первого контура;
- 5) моделирование переноса ПД в защитной оболочке (ЗО);
- 6) моделирование переноса изотопов ПД в окружающей среде.

Для решения задач моделирования выхода и переноса ПД в условиях ТА в НИЦ «Курчатовский институт» разработан и аттестован расчётный код МАВР-ТА [2]. Код МАВР-ТА валидирован на экспериментах VI, VERCORS, PHEBUS-

FP, MCE, VERDON, VEGA, FALCON, MARVIKEN, VANAM M3. На рис. 1 представлены результаты валидации для массы I-131 в атмосфере защитной оболочки в эксперименте PHEBUS-FP FPT-1.

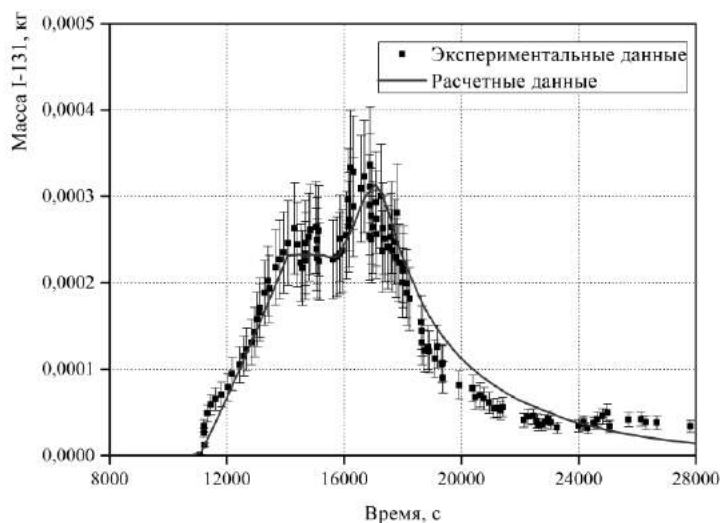


Рис. 1. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по массе I-131 в составе аэрозолей в атмосфере ЗО, эксперимент FPT-1

Для решения задачи моделирования переноса ПД в ЗО при проектных авариях и ЗПА без плавления топлива в НИЦ «Курчатовский институт» разработан и аттестован расчётный код ИРКА [3]. Проведена валидация кода ИРКА на экспериментах VANAM-M3, PHEBUS-FP, TOSQAN, CSE. На рис. 2 представлены результаты валидации для распределения аэрозоля по размерам в атмосфере защитной оболочки в эксперименте TOSQAN на момент времени 2000 с после начала работы спринклерной системы.

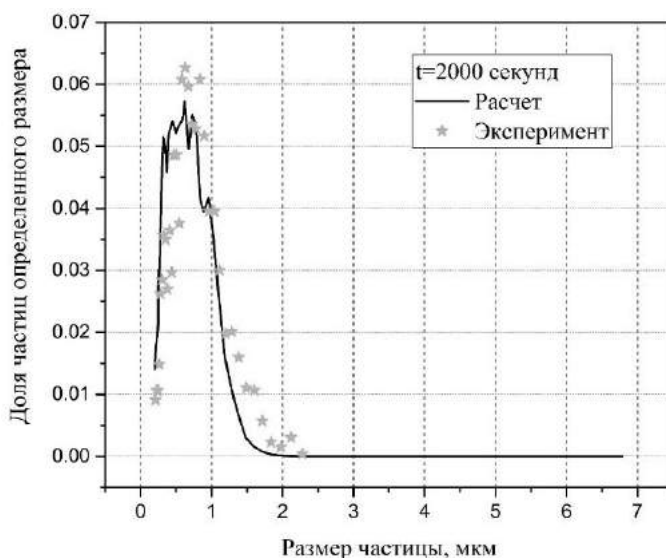


Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных распределений аэрозоля по размерам в $t=2000$ с

Для решения задачи переноса радиоактивных ПД в окружающей среде в НИЦ «Курчатовский институт» в НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается код МАП-ТА. На рис. 3 представлены результаты валидации разных моделей для высоты подъема факела в эксперименте SMHI №22а.

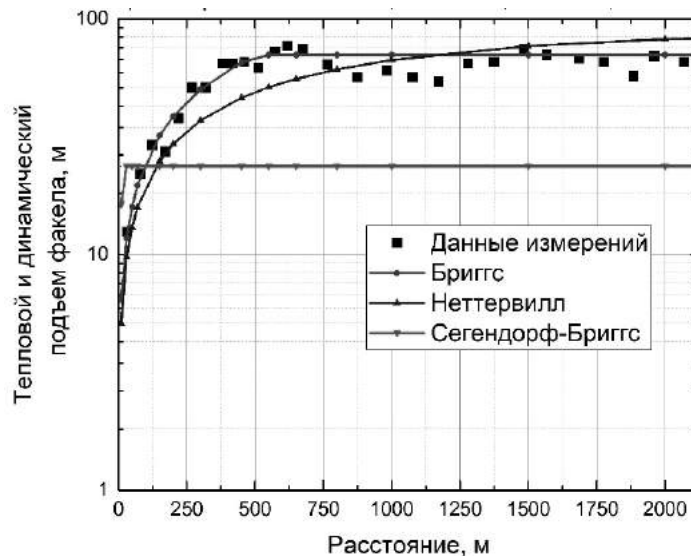


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных значений высоты подъема факела для эксперимента SMHI № 22 а

Все представленные в работе коды снабжены модулем для анализа неопределенности, реализующим методику, соответствующую РБ-166-20 [4].

Библиографический список

1. Deterministic safety analysis for nuclear power plants. IAEA Safety Standards SSG-2 (Rev. 1). Vienna, 2019.
2. МАВР-ТА. Аттестационный паспорт программного средства № 535 от 5 ноября 2021 г.
3. ИРКА. Аттестационный паспорт программного средства № 572 от 5 декабря 2022 г.
4. РБ-166-20 «Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций», 2020.

СЕКЦИЯ 4. СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

УДК 536.7

Барбин Н.М., Титов С.А., Терентьев Д.И.

Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС
России, г. Екатеринбург

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМАХ «РАДИОАКТИВНЫЙ ГРАФИТ-ВОЗДУХ» С УВЕЛИЧЕНИЕМ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА

За время своего существования ядерная энергетика шагнула далеко вперед, и будущее мировой экономики сегодня трудно представить без ее использования. На сегодняшний день в 32 странах эксплуатируют атомные электростанции (АЭС), их количество составляет 190 единиц в которые входит 442 энергоблока с общей электрической мощностью около 393 ГВт [1].

В России на данный момент в рабочем состоянии находится 11 АЭС на которых эксплуатируются 38 энергоблоков из которых 13 энергоблоков с канальными реакторами (10 энергоблоков с реакторами большой мощности канального типа (РБМК-1000) и 3 энергетические гетерогенные петлевые реакторы с 6-ю петлями циркуляции теплоносителя (ЭПП-6). В конструкции РБМК используется в качестве замедлителя графит, который в случае аварии приводит к возгоранию реактор и создает серьезную угрозу окружающей среде распространением радиоактивных материалов [1].

Целью проведенной работы является наблюдение над поведением углерода при горении радиоактивного графита в атмосфере воздуха с разным содержанием кислорода.

Анализ исследования был выполнен с использованием метода термодинамического моделирования с помощью программы TERRA [2]. Данная программа позволяет выполнять термодинамическое моделирование многокомпонентных систем. Информация об исходном составе реакторного графита взята из работ [2-4], исходный состав газовой фазы (воздух) взят из справочника [5]. Анализ данных результатов выполнялся в программе Microsoft Excel. Метод термодинамического моделирования успешно используется для исследования высокотемпературных систем [5–8].

В работе было обработано 7 систем с различным содержанием кислорода, данные которых представлены в табл. 1. В интервале температур от 300 К до 3600 К с шагом 100 К, при давлении 0,1 МПа.

Таблица 1. Содержание кислорода в системах

№ п/п	Номер системы	Содержание кислорода в системе, мас%
1	Система 1	6,816125001
2	Система 2	11,98770113
3	Система 3	19,16561551
4	Система 4	20,70793039
5	Система 5	22,33272433
6	Система 6	23,75761551
7	Система 7	25,19614651

Влияние кислорода на углерод представлено на рис. 1 и табл. 2. При различном содержании в системе кислорода в точке начала взаимодействия T_1 с возрастанием кислорода в системе наблюдается уменьшение температуры с 770 К до 550 К. С возрастанием кислорода в точке исчезновения углерода T_2 в системе так же прослеживается уменьшение температуры с 1050 К до 790 К.

Таблица 2. Влияние кислорода на углерод

Соединение	Содержание кислорода, мас%	T_1 (К)	T_2 (К)
$C_{(к.)}$	6,816125001	770 К	1050 К
	11,98770113	760 К	1020 К
	19,16561551	750 К	920 К
	20,70793039	750 К	900 К
	22,33272433	700 К	900 К
	23,75761551	600 К	800 К
	25,19614651	550 К	790 К

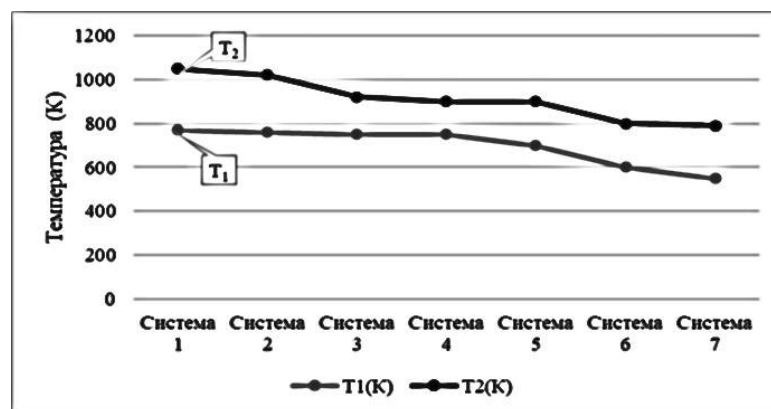


Рис. 1. Влияние кислорода на углерод

Термодинамическое моделирование показало, что в системах радиоактивный графит O_2+N_2 при увеличении содержания кислорода температура снижается.

Библиографический список

1. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»: официальный сайт. Электронный ресурс: <http://www.rosatom.ru/> (дата доступа 02.09.2023).
2. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. 96 с.
3. Шидловский В.В., Роменков А.А., Хаттарова Е.А., Гуськов А.В., Мартынов А.В. // Годовой отчет НИКИЭТ-2010: Сб. статей. М.: НИКИЭТ, 2010. С. 178.
4. Роменков А.А., Туктаров М.А., Карлина О.К., Павлова Г.Ю., Юрченко А.Ю., Апаркин Ф.М., Горелов К.А., Барбин Н.М. // Годовой отчет НИКИЭТ-2010: Сб. статей. М.: НИКИЭТ, 2010. С. 150.
5. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Металлургия, 1994. – 352 с.
6. Барбин Н. М., Кобелев А. М., Титов С. А., Терентьев Д. И. Термодинамический анализ состава продуктов горения радиоактивного графита в водяном паре или воздухе // Физика горения и взрыва. – 2022. – Т. 58. – № 4. – С. 24-31. – DOI 10.15372/FGV20220403.
7. Барбин Н. М., Титов С. А., Терентьев Д. И., Кобелев А. М. Термодинамическое моделирование термических процессов с участием радионуклидов урана, плутония, европия при нагреве радиоактивного графита в атмосфере воздуха // Радиохимия. – 2023. – Т. 65, № 3. – С. 269-276. – DOI 10.31857/S0033831123030085.

Волосников Д.В., Поволоцкий И.И., Марчукова А.А., Скрипов П.В.
 Институт теплофизики УрО РАН, г. Екатеринбург
 Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, г. Екатеринбург

ТЕПЛООТДАЧА К ИМПУЛЬСНО ПЕРЕГРЕТЫМ ВОДНЫМ РАСТВОРАМ ГЛИКОЛЕЙ И ОЦЕНКА ИХ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Получение знаний о свойствах теплоносителей на водной основе в условиях мощного кратковременного тепловыделения является приоритетным направлением развития инженерной теплофизики [1, 2]. Водные растворы гликолей применяются в качестве рабочих тел в устройствах с импульсным теплообменом. Важно уметь прогнозировать поведение растворов гликолей с водой в случае их импульсного перегрева (относительно температуры равновесия жидкость-пар), обладать сведениями о тепловой проводимости и свойствах таких веществ в окрестности критической точки. Параметры последней определяют фазовую диаграмму (ФД) жидкость-пар и, в зависимости от концентрации второго компонента, позволяют сопоставлять водные растворы гомологов гликолей, оценивать основные черты характера теплообмена в случае мощного кратковременного выделения тепла.

Цель данного исследования – получение новых сведений о теплоотдаче к импульсно перегретым водным растворам гликолей в широкой области изменения температуры, оценка их критических параметров и определение ФД в зависимости от концентрации второго компонента.

Для исследования и сопоставления значений коэффициента теплоотдачи применен метод управляемого импульсного нагрева проволочного зонда, в режиме стабилизации его температуры [3]. В импульсном опыте реализована идея создания кратковременных квазиизотермических условий нагрева платинового зонда – термометра сопротивления с известной градуировкой, имеющего диаметр 20 мкм. В случае применения устройства регулирования мощности нагрева $P(t)$ на основе автобалансного моста температура зонда увеличивается от начального значения T_0 до выбранного значения $T_{st}(t_2 > t_1) \approx const$ за время порядка $t_1 \sim 100$ мкс и в дальнейшем поддерживается постоянной до 10 мс. Далее рассчитывается коэффициент теплоотдачи $K_T(t)$ при заданном температурном напоре $\Delta T = T_{st} - T_0$:

$$K_T(t) = [P(t) - P_{vac}(t)] / (\Delta T \cdot S_w), \quad (1)$$

где S_w – площадь поверхности зонда, P_{vac} – тепловыделение зонда в вакууме.

Далее сопоставляются приведенные значения коэффициента теплоотдачи для выбранной концентрации раствора $\Delta K_T(t)$ относительно соответствующего аддитивного значения $K_{Tad}(t)$:

$$\Delta K_T(t) = [K_T(t) - K_{Tad}(t)] / K_{Tad}(t) \quad (2)$$

где $K_{Tad}(t) = \sum C_i K_{Ti}$, C_i и K_{Ti} – доля и значение коэффициента теплоотдачи i – го компонента раствора соответственно.

Исходные компоненты гликолей полностью смешиваются с водой и образуют стабильные растворы. В случае определения коэффициента теплоотдачи опыты были проведены при атмосферном давлении. Для водных растворов гликолей изменение T_{st} составляло $(90—150)^\circ \text{C}$. Обнаружено отрицательное отклонение значения мгновенного коэффициента теплоотдачи $K_T(t)$ (ухудшение теплообмена), относительно его аддитивных значений в зависимости от массовой концентрации гликоля в воде [4]. Рассчитанные по формуле (2) приведенные значения коэффициента теплоотдачи $\Delta K_T(t)$ имеют концентрационные максимумы для равных масс компонентов и увеличиваются в сторону старших гомологов [5].

Исследование критических параметров водных растворов гликолей проведено с помощью классического метода импульсного нагрева зонда импульсами постоянного тока 100 и 500 мкс [6]. Обнаружено наличие отрицательного отклонения критической температуры водных растворов гликолей от аддитивных значений концентрационной зависимости. Отклонения приведенных значений данной зависимости имеет максимумы для равных масс компонентов и тенденцию к увеличению в сторону старших гликолей. Концентрационные значения критического давления имеют характер близкий к линейному. Значение критической температуры исходных компонентов увеличивается в соответствии с ростом гомологического ряда, а давление, наоборот, уменьшается. Измеренные значения критических параметров водных растворов (монопропиленгликоля, дипропиленгликоля и трипропиленгликоля) в доступных авторам источниках не обнаружены и будут представлены в докладе.

Библиографический список

1. M.A. Lexin, V.V. Yagov, A.R. Zabirov, P.K. Kanin, M.M. Vinogradov, I.A. Molotova, Investigation of Intensive Cooling of High-Temperature Bodies in Binary Water–Isopropanol Mixture // High Temp., 2020, V. 58, No. 3. P. 369–376.
2. Незамерзающие теплоносители / Беликов С.Е. М: Аква-Терм. 2013. С.56.
3. Д.В. Волосников, И.И. Поволоцкий, А.А. Старостин, П.В. Скрипов, Теплоотдача к водным растворам гликолей в импульсно перегретых состояниях // ТВТ. 2021, Т. 59, № 3, С. 384–393.
4. Д.В. Волосников, И.И. Поволоцкий, П.В. Скрипов, Взаимосвязь тепловой проводимости импульсно нагретого раствора с его объемом смешения // Письма в ЖТФ. 2021. Т.47, Вып.22. С.21-23.
5. I.I.Povolotskiy, D.V. Volosnikov, P.V. Skripov. Heat conduction of superheated mixtures: relationship with excess volume // Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 31 (1). P.19-31.

6. A.A. Igolnikov, S.B. Rutin, P.V. Skripov. Heat transfer under high-power heat release: Not fully stable fluids as potential heat carriers // Applied Thermal Engineering, 2022, V. 215 (3). P. 118904.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 19-19-00115-П, <https://rscf.ru/project/19-19-00115/>

УДК 536.24

Е.Ю. Лага, А.В. Дорожкин, Е.Г. Орлова, Д.В. Феоктистов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ ГИДРОФОБИЗАЦИИ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ХИМИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Гидрофобные поверхности в последнее время активно исследуются в связи с их возможным применением в различных областях, например авиация, судостроение, автомобилестроение, энергетика. Последнее связано с их уникальными функциональными свойствами: стойкость к обледенению, кавитационным нагрузкам, биообрастанию, коррозии и др. [1]. Однако известные способы гидрофобизации на основе химического осаждения покрытия, темплатных методов, spray или dip-coating, ненадежны, поскольку происходит быстрая деградация гидрофобных свойств. Целью настоящей работы является разработка процедуры гидрофобизации материалов на основе лазерного химического модифицирования поверхности.

Исследования проводились на образцах в форме пластин из алюминиево-магниевого сплава АМГ-2М (Al – 95,7–98,2%, Mg – 1,7–2,4%, Fe – <0,5%, Mn – 0,1–0,5%, Si – <0,4%, Cu – <0,15%, Ti – <0,15%). Лазерной системой на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера IPG Photonics (длина волны 1064 нм) создавалась текстура на предварительно полированных образцах размерами 15,0×15,0×1,2 мм. Следующим шагом образцы очищались в ультразвуковой ванне для подготовки к процессу гидрофобизации. Основой процесса является нагрев образца в муфельной печи в течение определенного времени, а после распыление на него углеводородсодержащей жидкости (трансформаторное масло).

Свойства смачивания исследовались на установке, в которой реализована теневая оптическая методика [2].

Измеренные статические контактные углы на полированных образцах АМГ-2М составили 86,3°. Непосредственно после гидрофобизации, поверхности демонстрировали супергидрофобные свойства и угол составлял больше 165°.

Гидрофобизация образцов выполнялась в следующем образом. Предварительно текстурированный и очищенный образец помещался на держатель и вводился в трубчатую печь LF-50/500-1200 (LOIP, Россия), нагретую до 920°C. На закрепленную каретку помещался образец с термопарой типа К (хромель-алюмель) и с помощью модуля линейного перемещения СТМЛ-1 (Сервотехника, Россия) образец перемещался в печь. После нагрева образец вынимался из печи и на его поверхность распылялось масло. Длительность и объем распыляемого масла контролировались электромагнитным клапаном (SAILFLO, Китай) в паре с модулем реле времени (ХУ-j02, Россия). Время нахождения образца в печи и температура внутри печи оставались постоянными, варьировалось время распыления масла на поверхность образца.

Исследование показало, что увеличение времени распыления масла с 1,5 до 2,5 с увеличивает контактный угол. Изменение статического угла при рассматриваемых параметрах варьировалось от 135° (при 1,5 с распыления) до 172° (при 2,5 с распыления). При увеличении длительности распыления больше 2,5 с, процедура гидрофобизации проходила нестабильно, так как образец перенасыщался маслом, и имел маслянистый остаток на поверхности. Недостаток масла наблюдался при длительности распыления меньше 1,5 с, из чего следует, что образец оставался гидрофильным.

Установлено, что вид текстуры, формируемой лазерным излучением, также влияет на свойства смачивания. Образцы с наиболее развитой шероховатостью (рис. 1) демонстрировали наибольшие статические контактные углы.

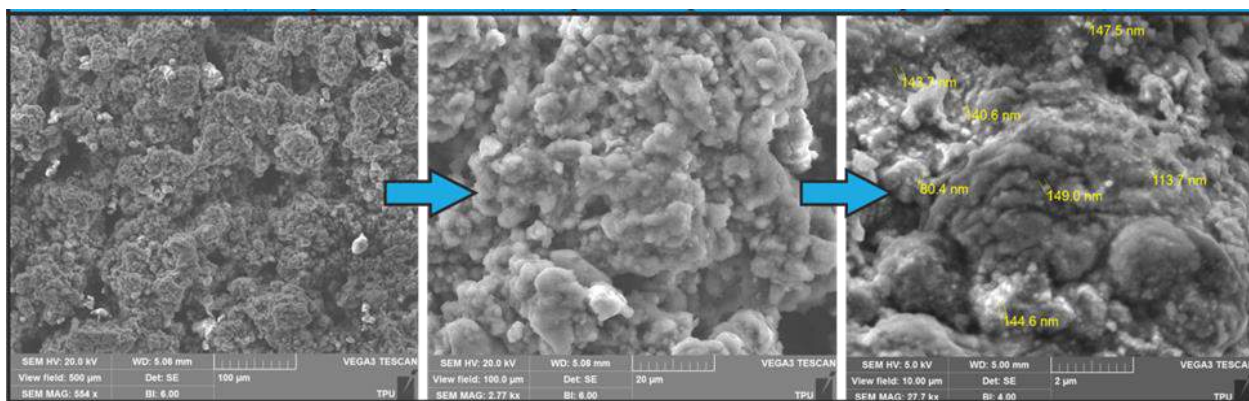


Рис. 1. Типичное СЭМ изображение текстуры супергидрофобного образца

По результатам проведенных исследований установлены параметры гидрофобизации (время распыления, температура нагрева образцов, длительность нагрева), позволяющие получить поверхности алюминий-магниевого сплава с супергидрофобными свойствами. Полученные материалы с функциональными свойствами в дальнейшем будут исследованы на долговечность покрытия, коррозионную стойкость, стойкость к кавитационным и абразивным износам.

Библиографический список

1. Е. А. Кузина, Ф. Ш. Омран, А. М. Емельяненко, Л. Б. Бойнович. О важности подбора режима гидрофобизации для получения стойких супергидрофобных покрытий // Коллоидный журнал, 2023, том 85, № 1, с. 63–7
2. G.V. Kuznetsov, E.G. Orlova, D.V. Feoktistov, A.G. Islamova, A.V. Zhuikov. Droplet Spread-ing and Wettability of Abrasive Processed Aluminum Alloy Sur-faces // Met. Mater. Int. 2020. V. 26. P. 46–55.

Исследование выполнено при поддержке программы развития ТПУ «Приоритет 2030» № 075-15-2023-375 (Приоритет-2030-НИП/ЭБ-114-375-2023).

УДК 544.015.4

Курьяков В.Н.

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ФАЗОВО-ПЕРЕХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ ВОДНЫХ ДИСПЕРСИЙ n-АЛКАНОВ

Изучение структуры и свойств нормальных алканов было начато около века назад. В последние десятилетия исследования n-алканов получили особенно интенсивное развитие. Объясняется это тем, что сведения о кристаллической структуре нормальных алканов позволяют выявить закономерности строения и свойств для всего обширного ряда алифатических соединений: кислот, спиртов, эфиров и т.д.

Нормальные алканы являются основными компонентами нефтяных парафинов и участвуют в образовании асфальто-смолисто-парафиновых отложений (АСПО), на борьбу с которыми тратится много времени и средств в нефтяной промышленности.

Температурный интервал, в котором происходят фазовые переходы парафинов отвечает суточным и сезонным колебаниям температуры земной поверхности. Поэтому изучение поведения парафинов при нагревании и охлаждении актуально с точки зрения моделирования природных процессов. Результаты такого моделирования способствуют развитию органической минералогии, биоминералогии, нефтяной геологии.

Одно из перспективных направлений применения парафинов – это разработка фазово-переходных материалов (Phase Change Materials, PCM). PCM-материалы – это материалы, в основу работы которых положен эффект выделения или поглощения тепла при изменении фазового состояния за счет скрытой

теплоты фазового перехода. Тепловая энергия может запасаться и высвобождаться, когда РСМ-материалы плавятся или кристаллизуются. Хорошо известный пример такого материала – солевая грелка. Менее известный, но рассматриваемый как перспективный теплоноситель повышенной эффективности – дисперсия парафина в воде. Такого рода теплоноситель, оставаясь жидким и сохраняя текучесть, может запасать дополнительную тепловую энергию в виде скрытой теплоты фазового перехода дисперсной фазы. Таким образом, речь идет о повышении эффективности передачи и хранении тепловой энергии, что является актуальной задачей современной энергетики. Исследованию такого рода систем посвящено много работ, опубликованных в ведущих научных зарубежных журналах. К сожалению, в России разработке и исследованию РСМ-материалов уделяется мало внимания. Представляемая работа актуальна не только с точки зрения фундаментальных исследований фазовых переходов в условиях ограниченной геометрии (наноэмульсиях), но и имеет прикладное значение для разработки так называемых материалов, изменяющих фазовое состояние (Phase change material, РСМ).

Распространенными методами исследований фазовых переходов парафинов являются адиабатическая и дифференциально сканирующая калориметрия. Для исследований ротационных фаз парафинов используют методы рентгеновской дифракции. В представляемой работе авторами предложена новая методика определения температур фазовых переходов парафинов, основанная на оптических методах. Особенностью метода является то, что парафин для исследований представлен в виде субмикронной дисперсии в воде.

В данной работе представлены результаты исследований физико-химических свойств водных дисперсий *n*-алканов, а также представлено описание методики получения таких дисперсий при помощи ультразвукового диспергирования и без добавления поверхностно-активных веществ (ПАВ). Для серии *n*-алканов от C17 до C42 приготовлены водные дисперсии с размером частиц около 100 нм. Для таких образцов новым оптическим методом и методами калориметрии (ДСК и микро-ДСК) определены температуры плавления, кристаллизации и ротаторных фаз. Для серии образцов дисперсий проведены тесты на устойчивость к многократным нагревам и охлаждениям, при которых частицы плавятся и кристаллизуются. Экспериментально показана высокая устойчивость таких систем к термическим циклам. Водные дисперсии *n*-алканов, полученные предлагаемым методом могут рассматриваться в качестве основы для разработок фазово-переходных материалов.

СЕКЦИЯ 5. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 620.9

Абдуллин Т.Р., Кондратьев А.Е., Ахметова И.Г., Зарипова Д.А.,
Носов С.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань
АО «ТГК-16»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОГЕЛЯ НА ТЭЦ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Основными применяемыми в России утеплителями все еще являются традиционными теплоизоляционные материалы [1]. Применение новых инновационных материалов позволяет значительно увеличить эффективность теплоизоляции. Аэрогель – материал, используемый в исследовании представляет собой композитный теплоизоляционный материал, внешне схожий с минеральной ватой, но имеющий ряд преимуществ над традиционными утеплителями.

С помощью программного комплекса для моделирования процессов COMSOL Multiphysics, проведены расчёты модели трубопровода с теплоизоляцией для определения толщины изоляционного слоя при заданной температуре на её поверхности (см. рис. 1).

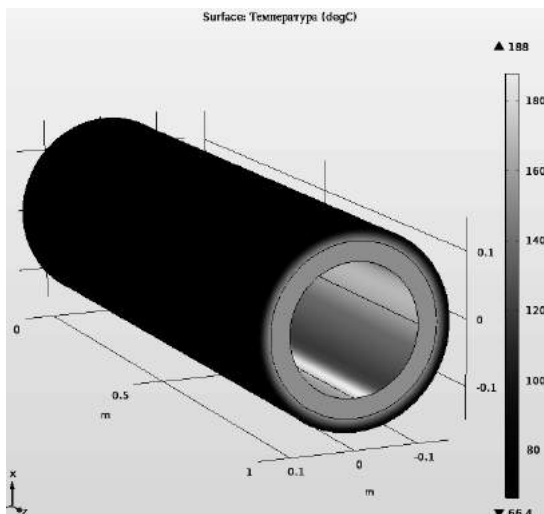


Рис. 1. Распределение температур в слое аэрогелевого волокна

По результатам проведённого моделирования получаем толщину аэрогелевого волокна равную 10 мм при коэффициенте теплопроводности аэрогелевого волокна равной 0,0095 Вт/м·К.

Для проверки результатов моделирования, руководствуясь СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов», были произведены расчёты требуемой толщины тепловой изоляции по заданной температуре на поверхности изоляционного слоя.

Требуемая температура на поверхности теплоизоляции при расчёте принимается равной 60 °С, температура наружного воздуха 48 °С.

Также для уточнения результатов использовался метод последовательных приближений. Итоговая расчётная формула показана в уравнении (1).

$$\left(\frac{t_{в} - t_{п}}{t_{п} - t_{н}} \right) = \frac{\ln \frac{d_{н}^{ст} + 2\delta_0 i}{d_{н}^{ст}} \alpha_{н} (d_{н}^{ст} + 2\delta_0 i)}{2\lambda_{из}} \quad (1)$$

Из уравнения (1) получаем толщину аэрогелевого волокна, равную 10,5 мм.

В рамках исследования перспектив использования аэрогеля как теплоизоляции на предприятиях, проведены работы по разработке, производству и установке аэрогелевой теплоизоляции в виде термочехлов на трубопровод 7РЦ-1 на Казанской ТЭЦ-3 (см. рис. 2).



Рис. 2. Теплоизоляционный чехол с аэрогелевым волокном в составе, смонтированный на Казанской ТЭЦ-3

На исследуемом участке трубопровода провели 12 измерений температуры поверхности теплоизоляционного слоя и поверхности греющего трубопровода бесконтактным способом. Температура греющего трубопровода равна 188 °С, а температура поверхности теплоизоляции 66 °С.

Высокие энергосберегающие свойства аэрогеля обусловлены его решёткой из оксида кремния с порами до 2 мкм с запёртым внутри, благодаря эффекту Кнудсена, воздухом. Недостатком широкого использования аэрогелевого волокна является стоимость его производства, так, например, 1 м² аэрогеля дороже 1 м² базальтового волокна в 4 раза, что нивелируется сроком службы аэрогеля. Так как аэрогель не горит, не разрушается, гидрофобен и не ядовит, срок его службы без изменения свойств превышает 40 лет, тогда как базальт разрушается во влажной среде за 1-2 года.

Таким образом, при использовании аэрогеля вместо традиционной теплоизоляции ТЭЦ экономит более 40 тыс. рублей с погонного метра трубопровода. Также уменьшение тепловых потерь за собой влечёт меньшие расходы топлива, что положительно сказывается на экологии и окружающей среде.

1. Федотова, А. О. Перспектива применения аэрогелей в теплоснабжении / А. О. Федотова, Ю. В. Ваньков // Материалы VII Национальной научно-практической конференции, Казань, 09–10 декабря 2021 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 738-740. – EDN YRCIUO.

Работа выполнена в рамках гос. задания № 075-03-2023-291

УДК 621.039

Абрамова Д.А., Дубцов Н.Д., Петрова С.Е.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЭС ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА

В современном мире все больше растет потребность в энергетических ресурсах. Такой спрос на энергию в основном удовлетворяется за счет сжигания ископаемого топлива: природного газа, нефти и т.д. Установки, работающие на таком топливе, считаются основными источниками выбросов парниковых газов [1 – 2].

Чтобы уменьшить негативные последствия использования ископаемого топлива, необходимо использовать такой источник энергии, который сможет решить не только энергетические проблемы, но и не принесет ущерба окружающей среде. Такими источниками энергии могут стать различные установки на базе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (ВИЭ): солнечные элементы, геотермальные системы, топливные элементы и т.д. [3 – 5, 1].

К экологически чистой энергетике также можно отнести водородную энергетику.

Водород относится к числу важнейших видов сырья химической и нефтехимической промышленности. Свойства этого газа обуславливают его применение и в других отраслях промышленности: металлургической, пищевой, стекольной, электронной, электротехнической. Благодаря своей высокой теплопроводности, коэффициенту диффузии и нетоксичности, в энергетике водород нашел своё применение в охлаждении мощных турбогенераторов. По оценкам экспертов, в энергетике на ТЭЦ и АЭС потребляется около 4 – 5 тыс.т. водорода в год.

Водород может быть получен различными способами, например, с использованием биомассы, ископаемого топлива, электролиза воды и т.д. На сегодняшний день более 95% технологий производства водорода основаны на сжигании ископаемого топлива, это требует высокого энергопотребления, а также высвобождает значительное количество парниковых газов [6]. На сегодняшний день разработано множество альтернативных способов получения водорода, таких как электролиз, фотолиз, а также частичное окисление жидких углеводородов и природного газа.

Ядерная энергетика считается устойчивым и чистым источником энергии, который обладает большим потенциалом для крупномасштабного производства водорода. Известно, что эффективность системы высокотемпературного электролиза, работающей на ядерной энергии, потенциально может быть близка к эффективности термохимических циклов без использования ископаемого топлива, выбросов парниковых газов и сильной коррозии материалов [7]. Отмечается, что паровой электролиз в сочетании с твердокислотной электролизной ячейкой является эффективным способом получения водорода при промежуточных температурах (<300 °C) и высокой эффективности, но для разделения водяного пара и водорода требуется отдельный процесс [8]. Интеграция парового электролиза с твердооксидным электролизером (SOEC) является еще одним подходом к производству водорода, но он страдает от нестабильных электродов и имеет проблемы безопасности.

В работе рассмотрено влияние совместного использования реакторов 4-го поколения с установками для добычи водорода на себестоимость вырабатываемой электроэнергии. При использовании АЭС с высокотемпературным электролизером выгода по себестоимости составит около 1%, а за время использования станции будет сэкономлено около 7 млн рублей.

Библиографический список

1. Fallah Vostakola, M.; Amini Horri, B. Progress in Material Development for Low-Temperature Solid Oxide Fuel Cells: A Review. *Energies* 2021, 14, 1280.
2. Hooshyari, K.; Amini Horri, B.; Abdoli, H.; Fallah Vostakola, M.; Kakavand, P.; Salarizadeh, P. A Review of Recent Developments and Advanced Applications of High-Temperature Polymer Electrolyte Membranes for PEM Fuel Cells. *Energies* 2021, 14, 5440.
3. Calcabrini, A.; Procel, P.; Huang, B.; Calcabrini, A.; Moya, P.P.; Huang, B.; Kambhampati, V. Low-Breakdown-Voltage Solar Cells for Shading-Tolerant Photovoltaic Modules Low-Breakdown-Voltage Solar Cells for Shading-Tolerant Photovoltaic Modules. *Cell Rep. Phys. Sci.* 2022, 3, 101155.
4. Gautier, A.; Wetter, M.; Sulzer, M. Resilient Cooling through Geothermal District Energy System. *Appl. Energy* 2022, 325, 119880.
5. Rafique, M.; Mubashar, R.; Irshad, M.; Gillani, S.S.A.; Tahir, M.B.; Khalid, N.R.; Yasmin, A.; Shehzad, M.A. A Comprehensive Study on Methods and Mate-

rials for Photocatalytic Water Splitting and Hydrogen Production as a Renewable Energy Resource. J. Inorg. Organomet. Polym. Mater. 2020, 30, 3837–3861

6. O'Brien, J.E.; Stoots, C.M.; Herring, J.S.; Hartvigsen, J.J. Performance of Planar High-Temperature Electrolysis Stacks for Hydrogen Production from Nuclear Energy. Nucl. Technol. 2007, 158, 118–131.

7. Fujiwara, N.; Nagase, H.; Tada, S.; Kikuchi, R. Hydrogen Production by Steam Electrolysis in Solid Acid Electrolysis Cells. ChemSusChem 2021, 14, 417–427.

УДК 620.9

Аверьянова А.А., Ваньков Ю.В.

Казанский государственный энергетический университет

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА

Современная нефтегазоперерабатывающая отрасль характеризуется интенсивным темпом развития, обуславливается это высоким объемом добычи нефти и газа. Основными процессами отрасли являются: первичная переработка, каталитический риформинг, гидроочистка дизельного топлива и бензина. Почти все указанные процессы протекают при высоких температурах, с использованием топливно-энергетических ресурсов.

Для снижения затрат на топливо и пар, требуемое для нагрева потока до определенной температуры, снижения потребления воды для охлаждения, используют теплообменное оборудование (ТО), доля которого на нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) составляет 30-40%.

Анализ литературы [1] по техническому состоянию оборудования показал, что в отрасли имеются проблемы в виде морально и физически устаревшего оборудования, в том числе теплообменного.

Ввиду высокой опасности обращающихся в технологических циклах веществ, отказ аппаратов может привести к аварийным ситуациям, сопровождающимся серьезными экономическими, экологическими и социальными ущербами. В соответствии с этим, проведение своевременной диагностики технического состояния ТО является важной задачей.

Известны способы диагностики аппаратов [2,3,4], их недостатком является либо отсутствию автоматизации процесса, либо проведение диагностики только по одному параметру. С целью повышения точности диагностирования технического состояния ТО, авторами предложен способ диагностики, при котором с помощью автоматизированной системы управления технологическим процессом проводится совместный анализ тепловых и гидравлических характеристик [5].

В соответствии с ФЗ №261 «Об энергосбережении» для предприятий, осуществляющих добычу, переработку, транспортировку нефти и газа необходимо

проводить энергетическое обследование (энергоаудит) с целью исследования генерирующих и энергопотребляющих систем и выявления наличия вторичных энергоресурсов.

Существует множество методов анализа энергетической эффективности предприятия, наиболее современным является пинч-анализ. Пинч-анализ – это метод, позволяющий улучшить эффективное использование энергии и других ресурсов путем организации наиболее эффективного взаимодействия технологических потоков. Результатом анализа являются данные по количеству рекуперированной энергии и используемой энергии внешних энергоносителей. Недостатком является рассмотрение дополнительной площади теплообмена только как дополнительные единицы ТО, добавляемых в структуру теплообменной системы, хотя на практике можно заменить существующие трубы и/или использовать приспособления для интенсификации теплообмена.

С целью повышения тепловой эффективности процесса и рекуперации тепловой энергии авторами предлагается метод, заключающийся в проведении диагностики ТО [5], расчете коэффициента теплопередачи, теплового КПД и сравнении полученных значений с паспортными. При неудовлетворительных показателях, с помощью разработанного автоматизированного расчета разных по конструктивным особенностям ТО (кожухотрубный с трубами, интенсифицирующими теплообмен, пластинчатый, «труба в трубе») подбирается ТО с оптимальными характеристиками для действующих условий эксплуатации. Для сравнения энергоэффективности осуществляется пинч-анализ до и после модернизации.

Обнаружение превышения температурного напора и гидравлического сопротивления при диагностике ТО и своевременное проведение мероприятий по очистке поверхности теплообмена, ремонта и обслуживания позволит повысить энергосбережение за счет снижения недогрева и увеличения энергии, доступной к рекуперации, снижения расходов на прокачку теплоносителя и, соответственно, расходов на собственные нужды. Подбор нового ТО с характеристиками оптимальнее параметров, эксплуатируемых аппаратов также позволит повысить энергосбережение за счет повышения коэффициента теплопередачи и, соответственно, повышения температуры нагреваемой среды и снижения температуры греющей среды, что скажется на снижении потребления внешних утилит, как подводящих, так и отводящих энергию.

Библиографический список

1. Баширова Э.М. Ранжирование нефтегазового оборудования при переходе на систему обслуживания и ремонта по техническому состоянию / Оборудование. Автоматика. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, № 1, 2014. – с. 18-22.

2. Демин А.М., Науменко А.П. Диагностирование теплообменного оборудования на основе режимных параметров установки гидроочистки дизельных топлив / Омский научный вестник, №4, 2019. – с. 85.
3. Пат. 2771267, РФ, Способ автоматического контроля тепловых потерь рекуперативных теплообменников на установках низкотемпературной сепарации газа, эксплуатируемых на севере РФ / Ефимов А.Н. Патентообладатель ООО "Газпром добыча Ямбург", № 2021107549, заявл. 22.03.2021, опубл. 29.04.2022.
4. Пат. 2771269, РФ, Способ автоматической диагностики состояния рекуперативных теплообменников на установках низкотемпературной сепарации газа, эксплуатируемых на севере РФ / Ефимов А.Н. Патентообладатель ООО "Газпром добыча Ямбург", № 2021107549, заявл. 22.03.2021, опубл. 29.04.2022.
5. Заявка №2023122246, Российская Федерация, Способ автоматической диагностики наличия отложений на стенках рекуперативного теплообменного аппарата / Аверьянова А.А., АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт центробежных и роторных компрессоров им. В.Б. Шнеппа».

УДК 536.244:66.042.88

Алексеев П.Д., Леухин Ю.Л.

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В Ломоносова

СТРУЙНЫЙ МОДУЛЬНЫЙ РЕКУПЕРАТОР

В работе исследована теплоотдача теплообменного элемента – модуля струйного рекуператора, выполненного в натуральную величину (см. рис.1). Воздух, подводящийся к теплообменному элементу через патрубок 6, поступает в перфорированную трубу 2, откуда через выдувные отверстия 3 в виде системы импактных струй подается на внутреннюю поверхность теплопередающей трубы 1 и нагревается. Модуль имеет следующие геометрические характеристики: рабочая длина – 1389 мм, наружный диаметр перфорированной вставки – 60,5 мм, внутренний диаметр внешней теплопередающей трубы – 100,5 мм, в исходном варианте диаметр выдувных отверстий равнялся 3,5 мм, количество отверстий в ряду – 5 и количество рядов – 33. Температуры подаваемого в устройство воздуха и поверхности наружной трубы, равнялись соответственно 19,8° С и 100° С, расход воздуха – 0,0055 м³/с. Расход воздуха и температуры выбирались для верификации результатов расчетов по опытным данным, полученным на физической модели струйного модульного рекуператора с аналогичными геометрическими размерами и граничными условиями.

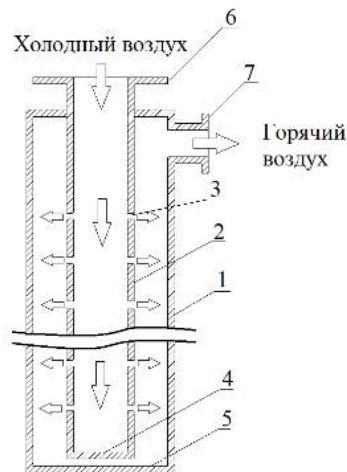


Рис. 1. Модуль струйного рекуператора

Исследования выполнены методом численного моделирования аэродинамики и теплоотдачи теплообменного элемента рекуператора с использованием программного комплекса ANSYS Fluent 15.0 и модели турбулентности Realizable $k-\varepsilon$ (URANS). Расчет производился на неструктурированной тетраэдрической сетке с количеством ячеек равным 15 млн.

Изменение псевдолокального коэффициента теплоотдачи (осредненного по периметру поперечного сечения) по длине внешней трубы теплообменного элемента при неизменном диаметре выдувных отверстий равном 3,5 мм приведено на рис. 2 (z – продольная координата, отсчитываемая от глухого торца модуля по направлению к выходному торцу). Максимальные значения коэффициента теплоотдачи, расположенные в критических точках натекания импактных струй, и осредненные по длине значительно снижаются к глухому и к выходному торцам модуля. У глухого торца воздушный поток имеет сложную неупорядоченную вихревую структуру, которая снижает ударное воздействие от трех первых рядов импактных струй на поверхность внешней теплопередающей трубы.

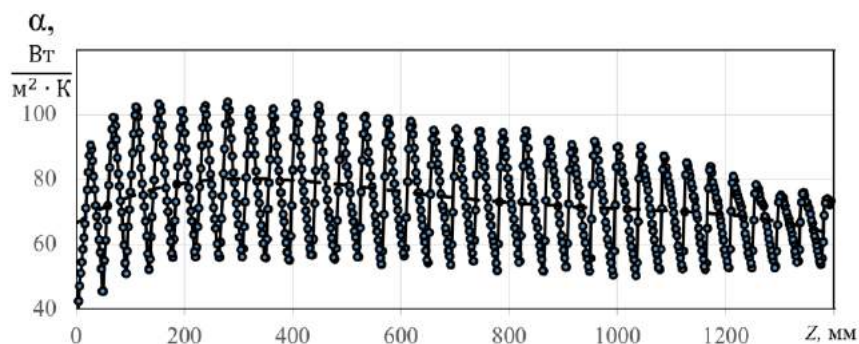


Рис.2. Изменение коэффициента теплоотдачи по длине при неизменном диаметре выдувных отверстий

От четвертого ряда до одиннадцатого теплоотдача практически не изменяется. Начиная от одиннадцатого ряда, в направлении выходного торца, интен-

сивный спутный поток сносит входящие струи, уменьшая теплоотдачу. Максимальные значения коэффициента теплоотдачи у выходного торца снижаются примерно на 27%, а осредненные на 22%.

Негативное воздействие перечисленных факторов можно снизить изменением диаметров выдувных отверстий по длине в направлениях глухого и выходного торцов (см. рис. 3)

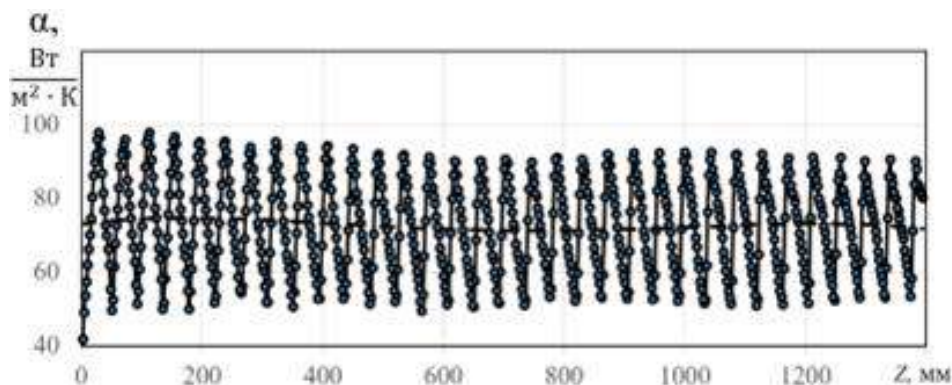


Рис.3. Изменение теплоотдачи по длине внешней трубы при переменном диаметре выдувных отверстий

Установлено, что местная теплоотдача на поверхности внешней трубы, определяется параметром A_f , представляющим отношение площади выдувных отверстий к площади обдуваемой поверхности. Для компенсации негативного воздействия неупорядоченного потока у глухого торца и сносящего потока в направлении выходного торца следует повысить параметр A_f за счет увеличения диаметров выдувных отверстий в этих частях. При увеличении диаметров в направлении к глухому торцу возрастает мощность газовых струй, способных преодолеть негативное влияние неупорядоченных вихрей, а с увеличением диаметров отверстий в направлении выходного торца, струи легче преодолевают сносящее воздействие спутного потока. В работе предлагаются уравнения для расчета диаметров выдувных отверстий по длине перфорированной трубы.

УДК 620.9

Аль-Окби А.К., Ваньков Ю.В., Гарнышова Е.В., Зиганшин Ш.Г

University of Technology, Baghdad, Iraq

Казанский государственный энергетический университет

СИСТЕМА КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА С АККУМУЛЯТОРОМ ТЕПЛА

Системы кондиционирования воздуха в Ираке потребляют более половины выработки электроэнергии. Летом, когда температура повышается, спрос на использование кондиционеров увеличивается, что приводит к постоянным перебоям в подаче электроэнергии. Потребители начинают использовать местную

генерацию – дизель-генераторы, которые увеличивают загрязнение окружающей среды. Одним из вариантов решения проблемы является использование тепловой энергии солнца для замещения части электрической энергии в цикле работы систем кондиционирования

Вопросам использования энергии солнца для систем охлаждения посвящено большое количество работ, что говорит об актуальности данной темы.

Nwasuka N. C. с соавторами [1] провели сравнение между солнечной гибридной системой кондиционирования воздуха и обычной системой кондиционирования воздуха с точки зрения получения низких температур в кондиционируемом помещении, результаты показали, что комнатные температуры полученные с солнечной гибридной системой кондиционирования воздуха ниже, чем температуры достигнутые обычной системой, что доказывает большую эффективность гибридной системы. Anita Preisler с коллегами [2] исследовали систему испарительного охлаждения с осушителем на солнечной энергии и сравнили ее с традиционной системой с точки зрения экономии энергии. Результаты показали, что система испарительного охлаждения с осушителем на солнечной энергии экономит 73,9% электрической энергии зимой и 18,2% летом по сравнению с традиционной системой. Авторы отметили, что эту систему можно использовать в южной Европе, где уровень энергосбережения может достичь 50% потребления традиционной системы. M. Khalaji Assadi в работе [3] использовал тепловой коллектор состоящий из U-образной системы солнечных вакуумных трубок и объединил его с кондиционерами воздуха различной мощности от 2,93 кВт до 7,034 кВт с целью снизить потребление электроэнергии путем замены компрессора другим компрессором, работающем на постоянном токе. Результаты показали, что сочетание солнечного коллектора системой кондиционирования позволяет снизить потребление электрической энергии на 45%.

Традиционная система парокомпрессионного холодильного цикла состоит из испарителя, компрессора, конденсатора и расширительного клапана. Компрессор является основной частью системы и потребляет большое количество электроэнергии для создания в системе давления, необходимого для перемещения хладагента по магистрали. Предлагаемая система гибридного холодильного цикла отличается от традиционной системы добавлением в систему солнечного теплового коллектора с баком-аккумулятором. Коллектор поглощает солнечную радиацию, энергия которой идет на нагрев теплоносителя (воды) в баке, который в свою очередь посредством змеевикowego теплообменника повышает температуру и давление хладагента поступающего в конденсатор.

Исследования производительности и энергопотребления разработанной системы проводились в трех режимах – с солнечным тепловым коллектором (два режима) и без него.

Первый режим представляет собой традиционную систему компрессионного холодильного цикла с компрессором мощностью 7,034 кВт; второй представляет собой гибридную компрессионную холодильную систему с компрес-

сорок мощностью 7,034 кВт; третий представляет собой систему гибридного компрессионного холодильного цикла с уменьшенной мощностью компрессора до 5,272 кВт.

При обработке результатов измерений учитывалось влияние температуры наружного воздуха и часов пиковой нагрузки на энергетическую систему.

Практические эксперименты, сравнивающие три режима работы традиционной и гибридной системы, показали, что интеграция традиционной парокомпрессионной системы кондиционирования с аккумулятором тепла от солнечного коллектора позволяет снизить потребление электроэнергии на 64%.

Дополнительным положительным эффектом от внедрения гибридных систем кондиционирования будет уменьшение антропогенной нагрузки на окружающую среду за счет отсутствия необходимости использования местных дизель-генераторов.

Библиографический список

1. Nwasuka, Nnamdi Cyprian, Nduka Nwankwojike, and Uchechukwu Nwaiwu. "Performance Evaluation of a Solar Hybrid Air-Conditioner." (2021).
2. Preisler, Anita, and Markus Brychta. "High potential of full year operation with solar driven desiccant evaporative cooling systems." *Energy Procedia* 30 (2012): 668-675.
3. Assadi, M. Khalaji, S. I. Gilani, and TC Jun Yen. "DESIGN a solar hybrid air conditioning compressor system." In *MATEC Web of Conferences*, vol. 38, p. 02001. EDP Sciences, 2016

Работа выполнялась по гос.заданию (№ 075-03-2023-291).

УДК 338.4

Базукова Э.Р., Пономарев Р.А., Политова Т.О., Гапоненко С.О.
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ВАРИАНТОВ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ПАРОВОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

В рамках энергоаудита крупного промышленного комплекса была проведена работа по оценке потерь тепловой энергии при транспортировке энергоносителей до группы заводов. На некоторых участках сети пароснабжения, транспортирующих перегретый пар с давлением 1,5 и 3,0 МПа с температурой 270° С и 315° С, величина фактических тепловых потерь превышала нормативные значения на 40-70 %. Величина сверхнормативных потерь по всем рассмотренным участкам составила 4230 Гкал/год (4,5 млн руб/год).

В случае замены теплоизоляционных конструкций на выделенных участках, рассмотрены материалы, применяемые для тепловой изоляции высокотемпературных объектов. Волокнистые теплоизоляционные материалы из минеральных волокон [1] (базальтовые изоляционные цилиндры BOS100, базальтовое супертонкое волокно БСТВ 30), а также теплоизоляционные материалы из кремнеземного аэрогеля (Evergel).

В настоящее время существует несколько методик позволяющих оценить результирующую экономическую эффективность от организации теплозащиты объекта, а также провести сравнительную экономическую оценку при выборе теплоизоляционного материала [2].

При эксплуатации волокнистых теплоизоляционных материалов с полимерным связующим в диапазоне температур от 150-400° С наблюдается деградация структуры материала вследствие температурной деструкции полимерного связующего [3].

Для выбора наиболее экономичного теплоизоляционного материала, при организации нормативной тепловой защиты паропроводов, необходимо проведение сравнительной экономической оценки различных изоляционных материалов, с учетом теплопроводности, стоимости, а также их долговечности (см. рис.1). Результаты сравнительной экономической оценки представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета показателей для оценки экономической эффективности от организации нормативной тепловой защиты

Диаметр паропровода, мм	Материал			
	BOS100	BOS100*	Evergel	БСТВ 30
	ЧДД (млн.руб/м) / ИДД (руб/руб)			
109	45,9 / 31	46,2 / 40	46,1 / 38	46,0 / 36
219	451,9 / 32	455,0 / 42	452,1 / 34	456,1 / 45
273	307,9 / 31	310,0 / 41	306,2 / 29	311,2 / 46
325	577,4 / 32	581,3 / 42	572,4 / 21	583,3 / 47

Примечания: * – результаты без учёта реальной долговечности и необходимости капитального ремонта для материалов с полимерным связующим. Наилучшие значения показателей выделены.

Так как в случае организации нормативной теплозащиты эффект будет одинаков для всех конкурирующих материалов (т.к. определяется величиной нормативных тепловых потерь), то разница в ЧДД обусловлена величиной дисконтированных капитальных вложений в теплоизоляционную конструкцию при выборе того или иного материала.

Для рассматриваемого объекта экономия от организации нормативной тепловой защиты при выборе теплоизоляционного материала с учетом его долговечности составит 3,3 млн. рублей.

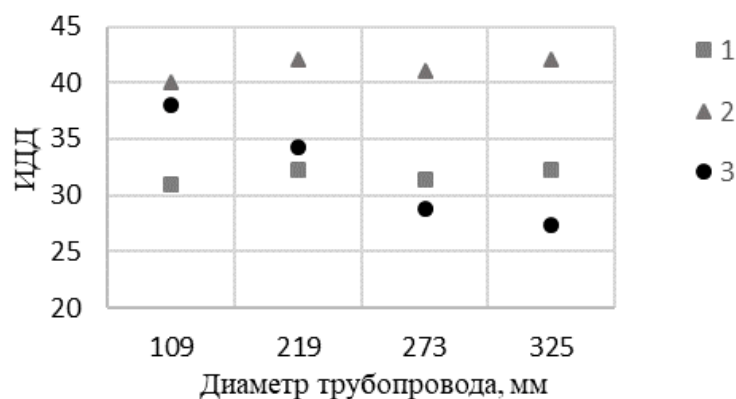


Рис. 1. Изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту:
 1 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 100; 2 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 100, с учётом необходимости замены материала, содержащего полимерное связующее; 3 – мат аэрогелевый на основе стеклохолста Evergel.

Показано, что для трубопроводов с малым диаметром при организации нормативной тепловой защиты наибольшая экономическая эффективность может достигаться при использовании материалов с минимальной теплопроводностью (материалы из кремнеземного аэрогеля), несмотря на высокую стоимость таких материалов.

Показано влияние долговечности материала на изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту паропровода.

Библиографический список

1. Vankov Y., Bazukova E., Emelyanov D., Fedyukhin A., Afanaseva O., Akhmetova I., Berardi U. Experimental Assessment of the Thermal Conductivity of Basalt Fibres at High Temperatures. *Energies*. 2022; 15(8): 2784. <https://doi.org/10.3390/en15082784>.
2. Базукова Э.Р., Ваньков Ю.В., Пономарев Р.А. Экономический эффект вариантов тепловой защиты трубопроводов энергетических комплексов // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т. 14. №4 (56). С. 103-112.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022660400. «Программа расчета срока службы и предельной температуры применения теплоизоляционных материалов из данных термогравиметрии разложения» / Э.Р. Базукова, Ю.В. Ваньков, Д.А. Емельянов, Т.Р. Абдуллин. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.05.2022г.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (гос. задание №075-03-2023-291/1).

Моторин О.В., Болога М.К.

Институт прикладной физики, Молдавский государственный университет,
г. Кишинев

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Стремительное развитие электроники и компьютерной техники в последние десятилетия привело к тому, что традиционные способы охлаждения не в состоянии обеспечить требуемые температурные режимы. Даже в устройствах с небольшими тепловыделением могут возникать проблемы с охлаждением при наличии особых требований к массо-габаритным характеристикам, уровню шума и энергопотреблению. Тепловая труба это теплопередающее устройство, работающие по замкнутому испарительно-конденсационному циклу. В традиционных тепловых трубах сконденсировавшийся пар, возвращается в зону испарения с помощью капиллярно-пористой структуры. В пульсационных тепловых трубах (ПТТ) пористая структура отсутствует. Конструктивно они представляют собой параллельные участки трубки малого диаметра, согнутой серпантинообразно и частично заполненной теплоносителем. Одни концы ветвей нагреваются, а другие – охлаждаются. При достаточной подводимой мощности в трубке возникает пульсационное движение паровых пузырей и жидкости, вследствие чего происходит интенсивный перенос тепла из зоны нагрева в зону охлаждения.

Целью данной работы является исследования влияния электрического поля в зоне кипения на теплотехнические характеристики ПТТ. Исследуемая ПТТ содержала пять витков в зоне охлаждения и была изготовлена из медной трубки с внутренним диаметром 1,9 мм и внешним диаметром 3 мм. Длина зоны нагрева равна 52 мм, длина адиабатной зоны 152 мм и длина зоны охлаждения 65 мм. В зоне нагрева ПТТ находилось пять стеклянных вставок длиной 46 мм, выполненных из трубки с внутренним диаметром 2,5 мм и внешним диаметром 5 мм. Внутри каждой стеклянной трубки находился высоковольтный электрод, вторым электродом служил омический нагреватель, намотанный поверх стеклянной трубки. В зоне охлаждения ПТТ была вмонтирована в алюминиевый блок, в каналах которого циркулировала вода, подаваемая из термостата. В зонах нагрева и охлаждения было установлено по пять термопар, две термопары регистрировали температуру воды на входе и выходе зоны охлаждения и еще две термопары находились в адиабатной зоне. Рабочей жидкостью служил *n*-гексан, являющийся диэлектриком и имеющий низкую температуру кипения. Исследовалось влияние подводимой тепловой мощности P при различных

напряжениях U на электродах, степени заполнения ПТТ теплоносителем и угла наклона ПТТ на термическое сопротивление R ПТТ.

Обобщение полученных результатов проводилось согласно методике [1,2]. При обработке данных в виде $R = f(P, U)$ было замечено, что примерно с $P = 20$ Вт экспериментальные точки хорошо аппроксимируются зависимостями вида

$$R = \frac{a}{P + b}, \text{ где } a \text{ и } b \text{ - некоторые постоянные, зависящие от напряжения}$$

U на электродах. Отложив по оси ординат выражение

$Y \in a / R - b = P$, мы вместо нескольких кривых получим биссектрису первого координатного угла. Аппроксимируя a и b как функции от U , получим,

$$a = 0,035U^2 - 0,84U + 39,42; \quad b = 0,096U^2 - 1,28U + 0,546;$$

$$Y \in \frac{0,035U^2 - 0,84U + 39,42}{R} - 0,096U^2 + 1,28U - 0,546 = P.$$

Обобщенная зависимость $Y(P)$ показана на рис. 1.

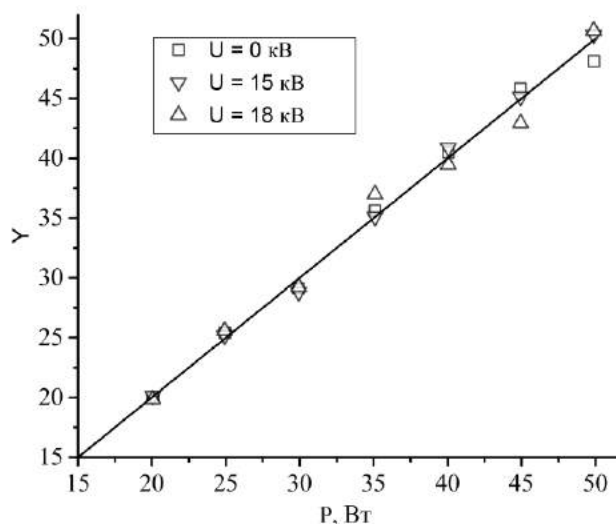


Рис. 1. Обобщенная зависимость $Y(P)$; степень заполнения 60%; жидкость - *n*-гексан

Выводы. Проведено экспериментальное исследование влияния электрического поля на теплотехнические характеристики ПТТ при воздействии поля на зону кипения. При тепловой мощности 20 Вт и напряжении 18 кВ получено снижение термического сопротивления ПТТ на 35%. С ростом тепловой мощности эффект действия поля уменьшается.

Проведено обобщение полученных экспериментальных данных путем сведения их к биссектрисе. Результаты работы представляют интерес в части интенсификации тепломассообменных процессов.

Библиографический список

1. Гросу Ф.П., Болога Ан.М., Паур Х.-Р., Болога М.К., Моторин О.В. Обобщение таунсендовских вольтамперных характеристик коронного разряда // Электронная обработка материалов. 2014. Т. 50, № 4. С. 23-28.
2. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожевников И.В., Поликарпов А.А., Моторин О.В. Теплообмен в тепловой трубе со встроенным электрогидродинамическим насосом // Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ6. Т.2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. с. 181-182.

Работа выполнена в рамках проекта ANCD 20.80009.5007.06.

УДК 621.039

Киндра В.О., Максимов И.А., Брызгунов П.А.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ АЭС ЗА СЧЁТ ИНТЕГРАЦИИ ВОДОРОДНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Повышение экологической безопасности производства электрической энергии является одним из ключевых приоритетов развития энергетического сектора, что отражено в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года. Развитие атомной отрасли может обеспечить надёжное и экологически безопасное энергообеспечение страны. Увеличение доли атомных электрических станций в отечественном энергобалансе приведёт к сокращению уровня выбросов токсичных веществ и парниковых газов в атмосферу.

На сегодняшний день доля АЭС в структуре установленной мощности единой энергосистемы РФ составляет порядка 12%. При этом атомные электрические станции покрывают базовую нагрузку, что обусловлено низкой маневренностью. Для увеличения доли атомных энергоблоков в структуре мощности необходимы новые решения, обеспечивающие возможность регулирования количества отпускаемой мощности.

Повышения маневренности энергоблоков можно достичь за счёт применения систем аккумулирования энергии, в том числе с использованием водородных технологий. В частности, комбинирование АЭС с водородными энергетическими комплексами, включающими в себя системы производства, хранения и потребления водорода, является одним из перспективных направлений [1]. Вопрос выбора способа интеграции систем водородного аккумулирования остаётся актуальным ввиду необходимости обеспечения максимально эффективного использования теплоты топлива как в периоды накопления энергии, так и разрядки.

В настоящей работе представлены результаты математического моделирования тепловой схемы перспективной АЭС повышенной маневренности с интегрированной системой водородного аккумулирования энергии [2], приведённой на рис. 1. При прохождении провала электрической нагрузки часть отпускаемой электрической мощности затрачивается на производство водорода методом электролиза. В свою очередь, при прохождении пика электрической нагрузки произведённый ранее водород направляется в пиковую газотурбинную установку для дополнительной выработки электроэнергии и частичного нагрева питательной воды (подогрев питательной воды в газовой турбине (ГВТО) необходим из-за отключения подогревателей высокого давления в пиковом режиме работы АЭС).

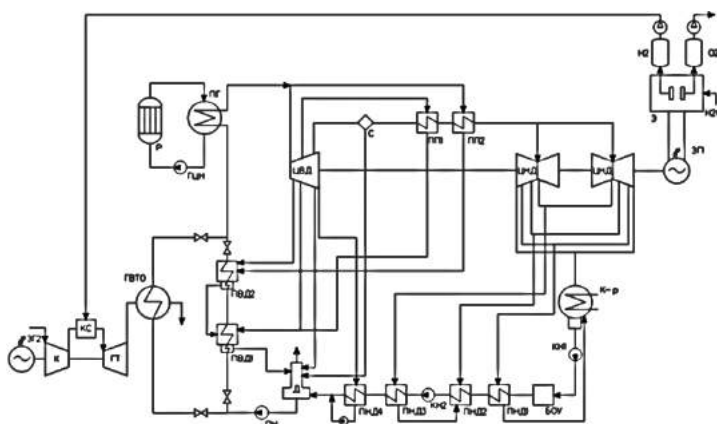


Рис. 1. Схема АЭС с интегрированной системой водородного аккумулирования:

Р – реактор; ПГ – парогенератор; ЦВД, ЦНД – цилиндр высокого и низкого давления; С – сепаратор; ПП – пароперегреватель; ПВД, ПНД – подогреватель высокого и низкого давления; Д – деаэрактор; К – компрессор; ГТ – газовая турбина; ЭГ – электрогенератор; КС – камера сгорания; ГВТО – газо-водяной теплообменник; Э – электролизёр

Результаты математического моделирования энергоблока с реактором ВВЭР-1000 и системой водородного аккумулирования показали, что при работе в режиме зарядки максимальный расход водорода при отпуске 20% мощности на электролизер составляет 1,376 кг/с. Обеспечение постоянства условий работы реактора являлось ключевым ограничением при моделировании схемы, поэтому в режиме разгрузки подогрев части питательной воды в ГВТО позволяет разгрузить ПВД2 и повысить мощность паротурбинной установки. За счет работы пиковой ГТУ можно достичь прироста отпускаемой мощности на более чем 19%, а КПД энергоблока в режиме разгрузки может достигать 36,8%.

Таким образом, применение водородных технологий на атомных энергоблоках может обеспечить повышенный уровень их манёвренности, благодаря чему появляется возможность повышения доли АЭС в структуре электрогенерации РФ. Технико-экономический анализ перспектив создания подобных энергоблоков является актуальной задачей.

Библиографический список

1. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Оценка системной эффективности АЭС в комбинировании с водородным энергетическим комплексом // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. — 2019. — № 1. — с. 70–81.
2. Патент № 2786709 Российская Федерация, МПК G21D 3/08 (2006.01). Способ повышения маневренности атомной электростанции: № 2022107205: заявл. 18.03.2022 : опубл. 26.12.2022/ Киндра В.О., Комаров И.И., Рогалев Н.Д., Рогалев А.Н., Колисенко Е.Б. ; заявитель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.

Исследование выполнено в Национальном исследовательском университете МЭИ за счет гранта Российского научного фонда №23-79-10235, <https://rscf.ru/project/23-79-10235/>

УДК 620.9

Федюхин А.В., Гафиатуллина К.Р., Крайков М.Д., Мухаметова Л.Р.
Московский энергетический институт, г. Москва
Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СООРУЖЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Ключевыми показателями, характеризующими физико-технические и эксплуатационные свойства теплоизоляционных материалов, являются: плотность, теплопроводность, температуростойкость, сжимаемость и упругость (для мягких материалов), прочность на сжатие при деформации (для жестких и полужестких материалов), горючесть, водостойкость и стойкость к воздействию химически агрессивных сред, содержание органических веществ. Важнейшим показателем эффективности тепловой изоляции является коэффициент теплопроводности материала, от которого зависит толщина теплоизоляционного слоя, соответственно, и нагрузка на изолируемый объект, его конструктивные характеристики и габаритные размеры.

Крупные промышленные предприятия энергоемких отраслей промышленности имеют сложную и разветвленную систему энергоснабжения. Основная доля потребления тепловой энергии приходится на водяной пар, расходуемый на технологические нужды производства. Для таких предприятий перспективными являются мероприятия, направленные на снижение тепловых потерь при транспортировке энергоносителей. Диапазон температур, в котором работают конструкции промышленной изоляции составляет от -180 до 600 °С. Для тепловой изоляции систем, транспортирующих высокотемпературные теплоносители

ли, применяется промышленная тепловая изоляция, подавляющая часть (85 – 90 %) которой монтируется из волокнистых материалов (минераловатные и стекловолокнистые изделия).

Одним из перспективных материалов является аэрогель на основе диоксида кремния [1]. Теплоизоляционные маты на основе аэрогеля используются для тепловой защиты высокотемпературных тепловых сетей, технологического оборудования и в сооружениях для сведения к минимуму тепловых мостов [2]. Применение матов толщиной от 10 до 20 мм приводит к снижению энергопотребления примерно на 15 – 22 % для зданий и сооружений [3]. Согласно СП 41-103-2000 в случае использования тепловой изоляции, как средства, предохраняющего обслуживающий персонал от ожогов, температура поверхности не должна превышать 60 °С для изолируемых объектов, расположенных на открытом воздухе, в рабочей или обслуживаемой зоне, либо 75 °С для объектов, расположенных за пределами рабочей или обслуживаемой зоны. В соответствие с данной нормой, толщины тепловой изоляции для расчетной модели паропровода при температурном режиме 300 °С применялись равными: 20 мм для аэрогеля, 150 мм для минеральной ваты. На рис. 1 и 2 представлены результаты расчета температурного профиля тепловой изоляции в среде ANSYS.

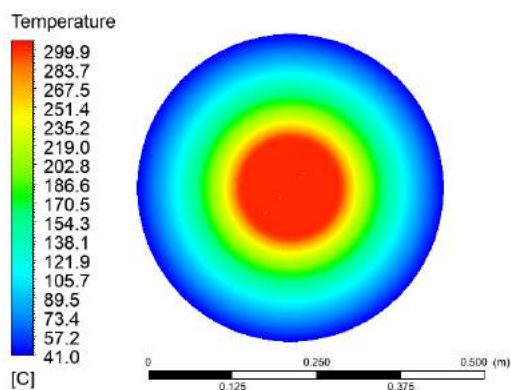


Рис. 1. Температурный профиль тепловой изоляции из минеральной ваты при 300° С

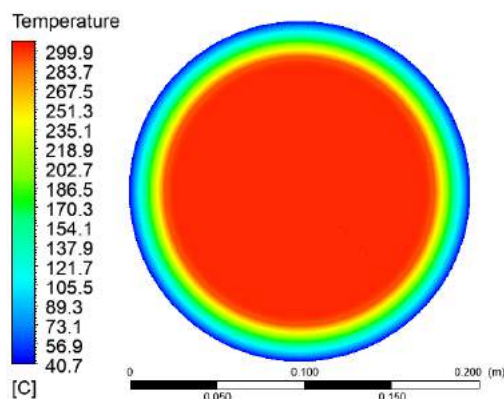


Рис. 2. Температурный профиль тепловой изоляции из аэрогеля при 300° С

На основании проведенных расчетов, можно заключить, что аэрогель по многим теплофизическим характеристикам превосходит минеральную вату. Однако важно отметить, что сложность технологического процесса изготовления, а также отсутствие массового промышленного производства в Российской Федерации значительно снижают перспективы широкого применения аэрогеля в качестве высокотемпературной тепловой изоляции.

Библиографический список

1. Alattar, A.M. Spectral and structural investigation of silica aerogels properties synthesized through several techniques. *Journal of Non-Crystalline Solids* 2021, 571, 121048.
2. Yang, W., Liu, J., Wang, Y., Gao, S. Experimental study on the thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating materials under various hygrothermal environments. *Energy and Buildings* 2020, 206, 109583.
3. Sharma, R., Arch, B., Berardi, U. The Use of Aerogel-Enhanced Blankets for Thermal Bridging Correction in Concrete & Steel Buildings. *Feature*. 2019.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-01262-22-01 от 28.01.2022 г. (дополнительное соглашение № 075-03-2022-151/1 от 31.01.2022 г., № 075-03-2023-291/1 от 28.02.2023 г.).

УДК 621.643.8:620.179.17

**Клюкин И.И., Александров Р.Н, Загретдинов А.Р., Зиганшин Ш.Г.,
Измайлова Е.В.**

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ УТЕЧЕК ТРУБОПРОВОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА НОРМИРОВАННОГО РАЗМАХА

Для обнаружения утечек трубопроводов в настоящее время широко применяются акустические методы. Это связано с тем, что акустический сигнал обладает достаточно емкой информацией о состоянии трубопровода. Эффективность акустического контроля зависит от правильного извлечения этой информации из диагностического сигнала.

Нами видится возможность успешного применения теории фракталов для контроля технического состояния трубопроводов. В потоке жидкости, вытекающей турбулентно через сквозное отверстие в стенке трубы, возникают хаотические пульсации плотности жидкости. Эти пульсации распространяются в жидкости на значительные расстояния и заставляют колебаться стенки трубопровода. Методы фрактального анализа позволяют дать количественное описание динамики таких процессов.

Одним из наиболее точных методов определения фрактальной размерности временных рядов является метод нормированного размаха (R/S анализ) [1,2].

Для исследования возможности применения предложенного метода для контроля утечек трубопровода разработан и создан экспериментальный стенд (см. рис. 1) [3,4].

Стенд представляет собой контур с циркулирующей водой, в котором предусмотрена возможность установки стального трубопровода различного диаметра.

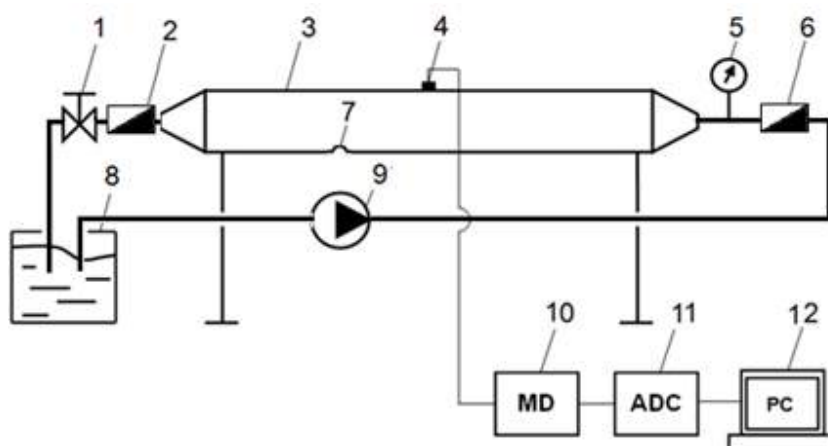


Рис. 1. Экспериментальный стенд:

1 – регулирующий вентиль; 2, 6 – счетчик воды; 3 – трубопровод; 4 – датчик вибрационного ускорения; 5 – манометр; 7 – дефект; 8 – емкость; 9 – насос; 10 – согласующее устройство; 11 – аналого-цифровой преобразователь; 12 – компьютер.

Проведены эксперименты на стальных трубах:

- с внешним диаметром 159 мм, толщиной стенки 6 мм, длиной 2 м;
- с внешним диаметром 34 мм, толщиной стенки 3 мм; длиной 2,5 м.

Экспериментальные исследования подтвердили возможность обнаружения утечек трубопровода по анализу фрактальной размерности акустических сигналов. С увеличением размера утечки фрактальная размерность имеет тенденцию к снижению (см. рис. 2 и 3).

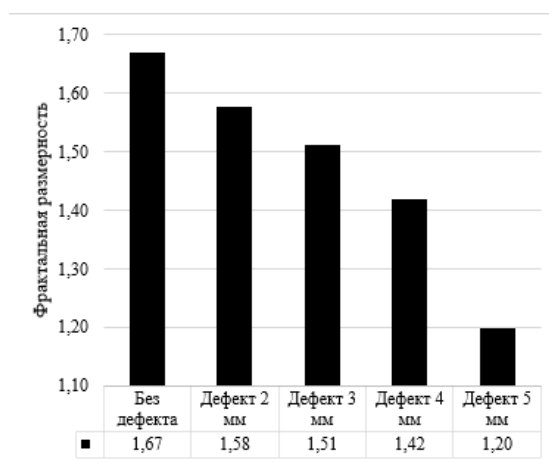


Рис. 2. Фрактальная размерность акустических сигналов трубопровода диаметром 159 мм

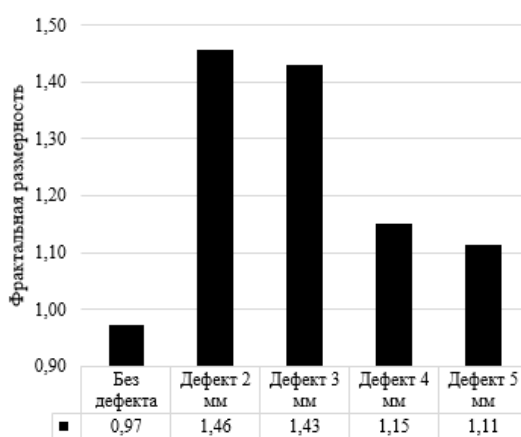


Рис. 3. Фрактальная размерность акустических сигналов трубопровода диаметром 34 мм

Библиографический список

1. Ташилова А.А. Статистика Херста (R/S) анализ в исследовании климатических переменных // Науки о земле. 2021. №4. С. 167-190.
2. Кисляков А.Н. Использование фрактальной размерности в техническом анализе рынка криптовалют // Ученые записки. 2018. №1(25). С. 101-105.
3. Ayrat Zagretdinov, Shamil Ziganshin, Yuri Vankov, Eugenia Izmailova, Alexander Kondratiev. Determination of Pipeline Leaks Based on the Analysis the Hurst Exponent of Acoustic Signals // Water. 2022. № 14. 3190.
4. Анализ масштабной инвариантности виброакустических сигналов трубопровода с утечками / А. Р. Загретдинов, Ш. Г. Зиганшин, Е. В. Измайлова, И. И. Клюкин // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК. 2023. № 1(78). С. 88-90.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10045, <https://rscf.ru/project/22-79-10045/>.

Косторева Ж.А., Омаров А.А., Сыродой С.В., Пурин М.В.,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СЕКВЕСТИРОВАНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ОКСИДОВ ПРИ СЖИГАНИИ ВЛАГОНАСЫЩЕННОГО ТОПЛИВА

Анализ публикаций в ведущих мировых изданиях научной периодики показывает, что в последние 10 лет по тематике водоугольных топлив (ВУТ) опубликовано более 5500 работ. При этом большинство статей принадлежат ученым из наиболее экономически развитых стран (например, США и Китай) с высоким научно-техническим потенциалом. Последнее свидетельствует о двух тенденциях: во-первых, водоугольные топлива являются одним из наиболее перспективных вариантов решения экологических проблем для современной теплоэнергетики; во-вторых, несмотря на достаточно обширные исследования процессов горения капель на начальной стадии), а затем частиц (после подсушивания приповерхностного слоя топлива) ВУТ (как единичных, так и их совокупности), на настоящее время не решен ряд важных задач, связанных с описанием физико-химических процессов, протекающих при нагреве до высоких температур существенно неоднородных частиц водоугольных топлив (инертный радиационно-конвективный нагрев; испарение воды; пиролиза угля; внутрипоровое реагирование продуктов термического разложения с водяными парами; окисление летучих; химические процессы, приводящие к снижению выбросов оксидов азота и серы при сжигании ВУТ). В настоящей работе предлагается новый подход к описанию процесса секвестирования токсичных оксидов (в частности, NO) продуктов сгорания при сжигании влагонасыщенного топлива, в результате химического взаимодействия промежуточных продуктов пиролиза угля и испарения воды.

На рис. 1 представлена принципиальная схема экспериментального стенда [1-2] для анализа компонентного состава продуктов сгорания топлива.

Одними из основных характеристик, определяющих рентабельность технологий сжигания, являются показатели выбросов в атмосферу антропогенных оксидов. На рисунке 1 приведена гистограмма, характеризующая среднее (по периоду горения) значение концентрации одного из основных антропогенных продуктов горения NO, одиночной частицы водоугольных топлив на основе длиннопламенного угля, сухой частицы длиннопламенного угля и влажной частицы длиннопламенного угля.

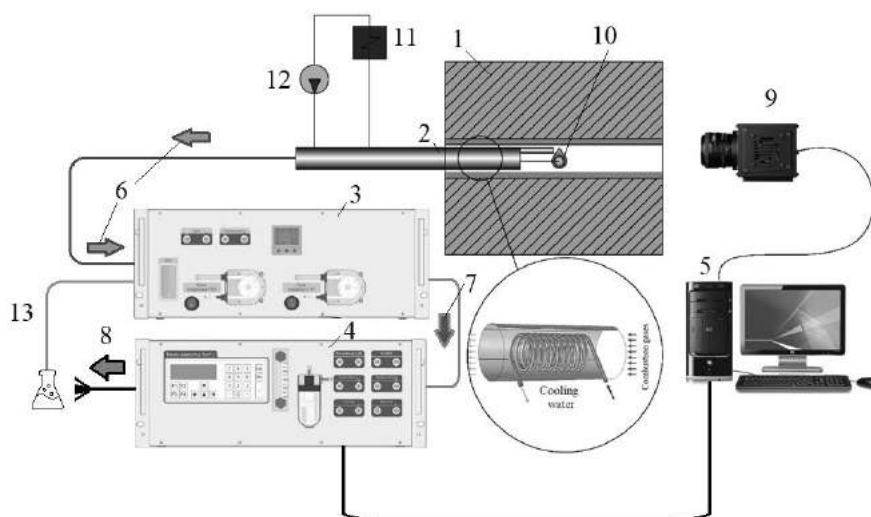


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для анализа компонентного состава газообразных продуктов сгорания: 1 – высокотемпературная печь; 2 – пробоотборник с водяным охлаждением; 3 – охладитель-осушитель пробы; 4 – газоанализатор; 5 – компьютер; 6 – образец, прошедший первый этап охлаждения; 7 – высушенный образец; 8 – газоанализатор выхлопных газов; 9 – скоростная видеокамера; 10 – частица топлива; 11 – внешний теплообменник; 12 – насос; 13 – канал отвода конденсата из блока «охладитель-осушитель» образца. Позиции 11, 12 представляют систему циркуляционного водяного охлаждения пробоотборника

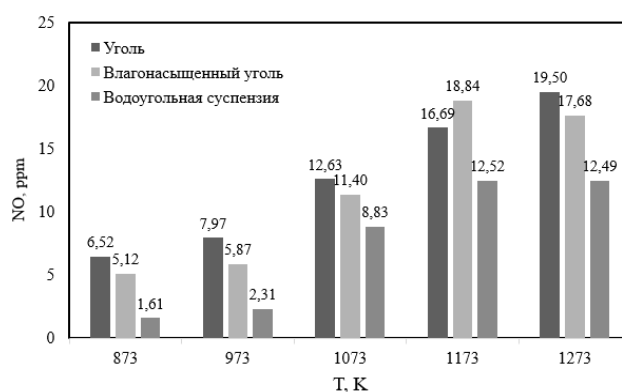


Рис. 2. Средняя по времени концентрация оксида азота в продуктах горения малой окрестности частицы топлива

Анализ результатов на рис. 2 показывает, что при сжигании ВУТ на основе длиннопламенного угля, образуется значительно меньше оксидов азота в продуктах сгорания в малой окрестности частицы, чем при сжигании сухой и увлажненной частицах угля той же марки для всего исследуемого диапазона температур окислителя. При этом стоит отметить, что увлажнение угольной частицы на 10%, сокращает содержание NO в антропогенных продуктах сгорания до 70% по сравнению с сухой частицей угля при относительно низких температурах окружающей среды (873-973К). Так же можно отметить, что при увеличении температуры внешней среды концентрация оксида азота растет для

всех трех топлив, такой результат можно объяснить интенсивным термохимическим реагированием диоксида азота с водяными парами, с формированием паров азотной кислоты. Анализ гистограммы приведенный на рис. 2, дает основания для вывода о перспективности применения ВУТ и влажного угля в качестве метода секвестирования оксидов азота в продуктах сгорания топлива.

Библиографический список

1. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Kostoreva Zh.A., Kostoreva A.A., Malyishev D. Yu., Nigay N.A., Gutareva N. Yu. Influence of a cubic wood particle orientation in space on the characteristics and conditions of its ignition // Biomass and Bioenergy. 2023. V. 170, 2023, P. 106704.
2. Малышев Д. Ю., Косторева Ж. А., Тамашевич М. С. Влияние компонентного состава водоугольных суспензий на объемы антропогенных газов, образующихся при их сжигании // Химия твердого топлива. 2023. №5. С.34-37

Работа поддержана РНФ (грант № 23-79-01067).

УДК 620.9

Ваньков Ю.В., Федотова А.О., Крайков М.Д., Гафиатуллина К.Р
Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА 3Д ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ ТЕПЛООБМЕНА

Серьезной проблемой при повышении эффективности работы систем централизованного теплоснабжения является значительная разница в спросе на тепловую энергию от источника к потребителям. Это приводит к повышению температуры обратной сетевой воды, что в свою очередь ухудшает эффективность работы теплоисточника. Решением, которое может уменьшить эту разницу, является использование аккумулирования тепла. Авторы работы [1] показали, что для тепловой подстанции мощностью 150 кВт применение теплоаккумулятора позволило уменьшить разницу в средних температурах обратной сетевой воды с 7,15 до 2,29 градусов, что позволило аккумулировать 69,5% избыточного тепла и повысить эффективность всей системы отопления на 22%.

Аккумулирование тепловой энергии для нужд теплоснабжения, как правило, требует большого количества баков-аккумуляторов, что увеличивает затраты и необходимые площади для их размещения.

На смену традиционным технологиям приходит аккумулирование посредством теплоаккумуляторов на фазовом переходе, работающих за счет изменения агрегатного состояния теплоаккумулирующих материалов. Эффективность применения таких агрегатов объясняется возможностью накопления и даль-

нейшего использования больших по сравнению с аккумуляторами явной энергии объемов тепловой энергии. Проведение исследований в области улучшения процессов зарядки и разрядки аккумуляторов такого типа является актуальной задачей.

Объектом исследования является тепловой аккумулятор на основе фазового перехода. Предметом исследования является процесс зарядки теплового аккумулятора на основе фазового перехода.

Низкие коэффициенты теплопроводности большинства теплоаккумулирующих материалов приводят к проблеме долгого протекания процесса зарядки аккумуляторов. В исследованиях [2, 3] авторами была приведена методика проведения эксперимента между теплоаккумулирующим материалом аккумуляторов с фазовым переходом с различными поверхностями нагрева. В результате авторы пришли к выводу, изменение скорости потока теплоносителя и его температуры на входе оказывает значительное влияние на скорость плавления ТАМ. Было установлено, что общее время плавления ТАМ сокращается примерно на 57% при увеличении температуры входного потока с 343 до 358 К. Более того, общее время плавления сокращается примерно на 70,5% при увеличении массового расхода теплоносителя с 0,15 до 5 л/мин.

Целью данной работы является повышение эффективности кожухотрубного теплового аккумулятора с фазовым переходом применением 3D поверхностных интенсификаторов теплообмена.

В докладе представлены результаты исследований повышения эффективности процессов «заряда» и «разряда» теплоаккумулятора с поверхностью теплообмена в виде сферических выемок. Описана схема экспериментального стенда (см. рис.1) и методика проведения исследований. Процессы нагрева и остывания ТАМ при различных режимах исследования иллюстрируются тепловизионными снимками.

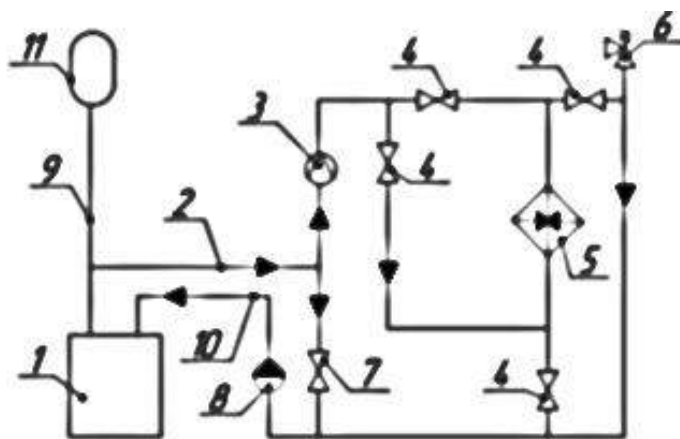


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – водонагреватель; 2 – подающий патрубков; 3 – ротаметр; 4 – кран; 5 – модель теплового аккумулятора; 6 – кран Маевского; 7 – байпасная линия с краном; 8 – циркуляционный насос; 9 – вертикальная трубка; 10 – обратная линия; 11 – расширительный бак

Получены следующие результаты:

- установлена разница во времени зарядки аккумулятора при подаче греющей среды сверху-вниз и снизу-вверх;
- модернизация поверхностей теплообмена сферическими выемками показало значительное ускорение процесса нагрева парафина.

Библиографический список

1. Turski M., Nogaj K., Sekret R. The use of a PCM heat accumulator to improve the efficiency of the district heating substation //Energy. – 2019. – Т. 187. – С. 115885.
2. Amer A. E., Elsakka M. M., Lebedev V. A. Thermal performance of an accumulator unit using phase change material with a fixed volume of fins //International Journal of Energy Research. – 2021. – Т. 45. – №. 13. – С. 19089-19102.
3. Умеренков, Е. В. Моделирование режима зарядки аккумулятора теплоты на фазовом переходе / Е. В. Умеренков, Э. В. Котенко // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5-2(38). – С. 348-351.

Работа поддержана госзаданием (№ 075-03-2023-291).

УДК 621.039.576

Алексеева В.Д., Крайнов Д.А., Полканов С.В.

Национальный исследовательский институт «МЭИ», г. Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ «ГЕЛИЙ» В КОНТУРЕ ВТГР ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ТЕПЛОВЫХ НУЖД НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Согласно отчету Министерства энергетики, более половины органического топлива, потребляемого в России, используется для теплоснабжения промышленных предприятий и отопления зданий. Это связано с необходимостью поддержания высоких температур в процессах производства, которые достигаются путем сжигания большого количества топлива.

Для обеспечения энергетических потребностей в высоких температурах при производственных процессах и отоплении зданий, предлагается использовать высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР), которые были предложены еще в 1950-70-е годы, но не получили широкого распространения.

Существующие исследования по высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам базируются на модульных реакторах, где в качестве теплоносителя используется гелий – химически инертный газ, который почти не поглощает нейтроны и не способен окислять элементы активной зоны даже при очень вы-

соких температурах. Главной особенностью такой установки является возможность нагревать гелий на выходе из активной зоны до 950° С [1].

Таблица 1.. Баланс потребления тепла в РФ по видам экономической деятельности в 2016 г.

Вид экономической деятельности	Млн. Гкал	%
Добыча полезных ископаемых	47,5	37
Целлюлозно-бумажное производство	39,8	3,1
Производство пищевых продуктов	41,4	3,2
Производство кокса и нефтепродуктов	67,4	5,2
Химическое производство	117,4	9,2
Металлургическое производство	68,6	5,3

Большинство производств, работающих в этих областях, требуют температуру от 700 до 950° С, что полностью соответствует возможностям высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов и делает внедрение этой технологии в промышленные энергетические системы актуальной задачей. Для удовлетворения потребностей производств, требующих температуры выше 950° С, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы могут быть дополнены источниками тепла на основе органического топлива или электричества [2].

Использование высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов для производства является наиболее интересной и перспективной технологией, которая может быть использована в различных отраслях промышленности. Этот процесс производства водорода имеет ряд преимуществ перед традиционными методами, такими как производство водорода из нефти или природного газа. Прежде всего, он является более экологически чистым, поскольку не требует использования ископаемых топлив. Кроме того, он может быть более эффективным, поскольку высокотемпературный газоохлаждаемый реактор может использовать гелий для образования пара с высокой эффективностью [3].

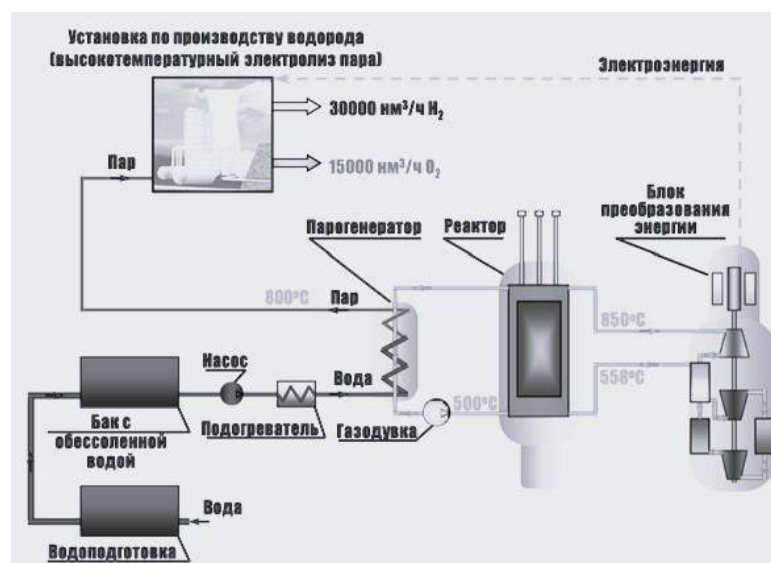


Рис.1. Принципиальная схема использования ВТГР для производства водорода методом высокотемпературного электролиза

Таблица 2. Параметры энергоустановки для производства водорода методом высокотемпературного электролиза с использованием ВТГР

Параметр	Значение
Мощность реактора, МВт	215
Полезная электрическая мощность генератора, МВт	87,1
Температура гелия в реакторе, °С	553 / 850
Давление гелия на входе в реактор, МПа	4,41
Температура гелия в БПЭ, °С	850 / 558
Мощность ПГ, МВт	22,3
Температура гелия в ПГ, °С	850 / 494
Паропроизводительность, кг/с	6,46
Температура пара на выходе из ПГ, °С	800
Давление пара на выходе из ПГ, МПа	4,82
Эффективность производства водорода, %	50
Производство водорода, тыс. нм ³ /ч	30

Библиографический список

1. Сняк Ю.В., Петров В.Ю. Прогнозные оценки стоимости водорода в условиях его централизованного производства // URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/prognoznye-otsenki-stoimosti-vodoroda-v-usloviyah-ego-tsentralizovannogo-proizvodstva> (дата обращения: 15.05.2023).
2. Головки В.Ф., Дмитриева И.В., Рязанов А.В. Выбор конфигурации ядерного энергоисточника на основе ВТГР для технологического применения// URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-konfiguratsii-yadernogo-energoistochnika-na-osnove-vtgr-dlya-tehnologicheskogo-primeneniya/viewer> (дата обращения: 02.05.2023).
3. Столяревский А.Я., Кодочигов Н.Г., Васяев А.В., Головки В.Ф., Ганин М.Е. Применение высокотемпературных модульных гелиевых реакторов для теплоснабжения энергоёмких производств// Новости теплоснабжения. 2. 2011.

УДК 536.468

Кропотова С.С., Стрижак П.А., Волков Р.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск

СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ВОЗГОРАНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ И ПОДАВЛЕНИЯ ГОРЕНИЯ

Пожары в помещениях представляют серьезную угрозу в связи с масштабными последствиями [1,2]. По этой причине нельзя недооценивать важность систем мониторинга пожарной обстановки в помещениях. Современные системы мониторинга и подавления возгораний имеют определенные ограничения.

Во-первых, возгорание, как правило, обнаруживается на стадии развитого пожара. Во-вторых, процесс тушения направлен на покрытие всей площади помещения тушащим составом (жидкостным, пенным, порошковым). Первое часто приводит к распространению горения на большие площади, а второе – к существенным убыткам, связанным с перезаливом помещения тушащей смесью. В случае многоэтажных зданий, нередко, в процессе тушения осуществляется залив тушащим составом через потолочные перекрытия нижних этажей и помещений, не подверженных прямому воздействию пожара. Во избежание данных негативных последствий необходимо решить две задачи: первая – ранняя идентификация возгорания на начальной стадии пиролиза горючего материала и типа последнего [3,4]; вторая – идентификация места расположения очага возгорания и его размеров (для реализации точечного тушения) [5]. Наличие соответствующей информации позволяет на раннем этапе выбрать наиболее эффективный тушащий состав, характеристики работы системы его подачи.

Проведены экспериментальные исследования с целью обоснования возможности ранней идентификации возгорания в помещении по газовому составу продуктов пиролиза и горения типичных строительных и отделочных материалов. Изучены условия свободного горения материала и при воздействии на него тушащими веществами (вода, растворы бишофита, суспензия бентонита, эмульсия пенообразователя). Применены две системы газоанализа: промышленная на основе сенсоров CO_2 , CO , H_2 , CH_4 и O_2 и исследовательская (газоанализатор с входящими в него сенсорами H_2 , CH_4 , H_2S , SO_2 , CO , CO_2). При тушении очагов горения использованы два распространенных варианта: непрерывная подача жидкости и импульсное распыление. Оценена сравнительная эффективность воздействия группой огнетушащих составов на очаги с горючими материалами с учетом расхода, времени и загрязнения окружающей среды.

Для проведения исследований использовался экспериментальный бокс размерами $1,5 \times 1 \times 1,25$ м и система управления и мониторинга с персональным компьютером. В экспериментальном боксе размещались модельный очаг пожара, система газоанализа, камера видеонаблюдения, высокоскоростной пирометр, а также распылительные устройства для подачи огнетушащей жидкости. Сигналы с данных технических средств поступали в систему управления и мониторинга, предназначенную для отображения на экране монитора измерений всех регистрируемых параметров (концентраций газов, температур модельного очага пожара), их дальнейшей передачи на персональный компьютер для последующей обработки, а также для активации подачи огнетушащей жидкости в очаг пожара с целью локализации и подавления горения.

Проведенные эксперименты позволили установить принципиальные отличия состава газообразных продуктов термического разложения при свободном

горении материалов и после тушения с использованием специализированных огнетушащих жидкостей.

При обобщении результатов экспериментов сделаны следующие заключения. Сравнение систем с непрерывной и импульсной подачей огнетушащих жидкостей в очаг с горючими материалами показало, что при импульсном распыле выход оксида и диоксида углерода несколько больше (на 1,9–7%), чем в случае непрерывного распыла. Однако расход воды на тушение для импульсного распыла в 1,4 раз меньше. Наименьшие выбросы зарегистрированы при тушении очага возгорания из древесины раствором бишофита. В этом случае выход оксида и диоксида углерода на 63% меньше, чем в случае воды. Показано, что при тушении эмульсией пенообразователя можно сократить выход CO и CO₂ на 28% по сравнению с водой.

Расчет коэффициентов эффективности огнетушащих составов позволил установить широкий диапазон их варьирования для разных материалов и применяемых жидкостей. В частности, значения коэффициента изменялись в диапазоне от 0,29 до 0,96. С применением установленной базы значений можно выбирать тип состава, объем и способ подачи с учетом требований к эффективности использования.

Библиографический список

1. Festag S. The Statistical Effectiveness of Fire Protection Measures: Learning from Real Fires in Germany // *Fire Technol.* 2021. V. 57. P. 1589–1609.
2. Himoto K. Conceptual framework for quantifying fire resilience – A new perspective on fire safety performance of buildings // *Fire Saf. J.* 2021. V. 120, 103052.
3. Foggia P., Saggese A., Vento M. Real-Time Fire Detection for Video-Surveillance Applications Using a Combination of Experts Based on Color, Shape, and Motion // *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 2015. V. 25. P. 1545–1556.
4. Ko B., Cheong K.H., Nam J.Y. Early fire detection algorithm based on irregular patterns of flames and hierarchical Bayesian Networks // *Fire Saf. J.* 2010. V. 45. P. 262–270.
5. Maoult Y. Le, Sentenac T., Orteu J.J., Arcens J.P. A new approach based on a low cost CCD camera in the near infrared // *Process Saf. Environ. Prot.* 2007. V. 85. P. 193–206.

Работа поддержана Российским Научным Фондом(проект № 21-19-00009, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00009/>).

Ваньков Ю.В., Макарова А.Р., Измайлова Е.В., Ахметова И.Г.
Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЛАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Исследование свойств тепловой изоляции в условиях отрицательных температур имеет высокую актуальность для предприятий химической отрасли, нефтепереработки, строительства зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты. Знание коэффициента теплопроводности изоляции в условиях отрицательных температур является необходимым для оптимизации и совершенствования технологий и устройств, повышения энергоэффективности производства продукции.

Объект исследования: образцы теплоизоляционного материала на основе базальтового волокна.

Предмет исследования: коэффициент теплопроводности тепловой изоляции с разным влагосодержанием при отрицательных температурах.

Цель работы: определение коэффициента теплопроводности теплоизоляции с разным влагосодержанием при отрицательных температурах.

Для решения поставленных задач создана экспериментальная установка, состоящая из термоконтейнера, аккумуляторов холода, исследуемого материала, термопар и датчика теплового потока (см. рис.1).

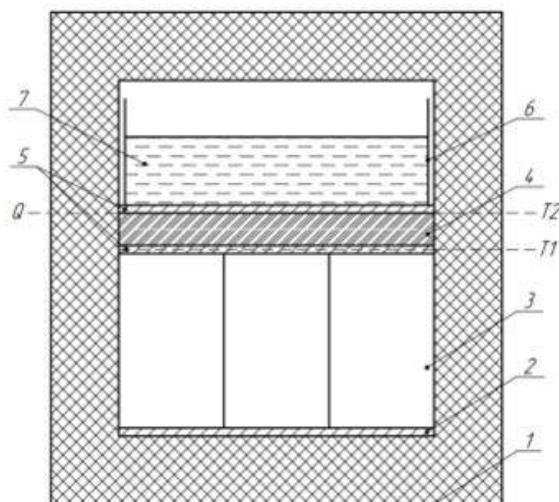


Рис. 1 Установка для определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала: 1 – термоконтейнер; 2 – медная пластина; 3 – аккумулятор холода; 4 – теплоизоляционный материал; 5 – медные пластины; 6 – медная тара; 7 – лед

Измерения экспериментальных данных проводились на оборудовании фирмы National Instruments и обработка и программном обеспечении.

Проведено 3 серии опытов по испытанию 6 образцов тепловой изоляции из базальтового волокна в виде плит, а также 3 серии опытов по испытанию 6 образцов базальтовых матов. Исследуемые образцы вырезались, высушивались, взвешивались. Далее в соответствующие образцы медицинским шприцом равномерно по объему материала вводилась вода в разном процентном содержании от массы сухого образца. Образцы запаивались в герметичные пакеты и подвергались заморозке.

Коэффициент теплопроводности исследуемого образца определялся методом дополнительной стенки после установления в зоне измерения стационарного теплового режима, характеризуемого постоянством по времени всех регистрируемых значений (плотность теплового потока, температуры наружной и внутренней поверхности стенки теплоизоляционного материала).

Проведена оценка неопределенности результатов экспериментов. Она складывалась из погрешности измерений величины и погрешности, вносимой приборами и составляет не более 10%.

По усредненным значениям результатов экспериментов получены уравнения, описывающие зависимость коэффициента теплопроводности изучаемых материалов от влагосодержания в условиях отрицательных температур.

Увеличение влагосодержания приводит к росту коэффициента теплопроводности это объясняется тем, что теплопроводность воздуха Это объясняется тем, что теплопроводность воздуха $0,023 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, воды $0,55 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, что в 25 раз выше, чем у воздуха; теплопроводность льда $2,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ в 100 раз выше, чем у воздуха.

Когда материал насыщается влагой, вода вытесняет воздух, находящийся между волокнами, что приводит к увеличению коэффициента теплопроводности материала. При замерзании вода расширяется, лед разрушает структуру теплоизоляционного материала и приводит к еще большему увеличению теплопроводности.

Дополнительно проведено исследование коэффициента теплопроводности аэрогеля на основе стекловолокна в условиях отрицательных температур. Так как аэрогель является гидрофобным материалом значение коэффициента теплопроводности аэрогеля на основе стекловолокна при отрицательных температурах составляет $0,014 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, что в 2 раза меньше коэффициента теплопроводности сухой базальтовой изоляции.

Полученные результаты расширяют знания о связи влагосодержания волокнистых теплоизоляционных материалов и их теплопроводностью при отрицательных температурах.

Работа выполнена по госзаданию № 075-03-2023-291/1.

Овчинников К.А., Ефремов А.В.

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ВЛОЖЕНИЙ В ПОВЫШЕНИЕ КПД ТЭС

В работе рассмотрен вопрос оптимизации технико-экономических показателей угольных КЭС и ПГЭС. Расчеты произведены для разной стоимости топлива. По оригинальной методике численно оценен предел удельных капиталовложений, после которого удорожание конструкции не окупается экономией топлива. Благодаря отсутствию в модели условно-постоянных затрат ее удобно использовать для укрупненной оценки инвестиций конструкторами при производстве оборудования и проектировщиками при его подборе.

Теплоэнергетика занимает в энергобалансе РФ значимое место, 71,29% [1]. Распространены две компоновки теплоэлектростанций: электростанции с котлоагрегатом и паротурбинной установкой (78,06% установленной мощности [2]) и парогазовые электростанции, ПГЭС (16.07% у.м. [2]).

В рамках данного анализа произведен анализ угольной КЭС и ПГЭС.

При составлении энергетического инвестпроекта, подборе поставщиков и проектировании электростанции ключевой задачей является нахождение баланса между энергоэффективностью и дороговизной. С аналогичной проблемой сталкиваются производители энергетического оборудования.

Затраты на производство электроэнергии оценивают [3-4] с помощью приведенной стоимости электроэнергии (LCOE, Levelised Cost of Energy), см. ур. (1):

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_1^n \frac{OPEX_n}{(1+r)^n}}{\sum_1^n \frac{E_n}{(1+r)^n}} \quad (1)$$

где CAPEX – кап.затраты [\$]; OPEX - операционные затраты [\$/год]; E_n- выработка электроэнергии [кВт·ч/год], r – ставка рефинансирования, n – лет.

Ее можно разложить (см. формулу 2) на три составляющие: капитальную и условно-постоянную затраты и топливную составляющую.

$$LCOE = R_{CAPEX} + R_{пост.} + R_{топ.} \quad (2)$$

Мы предлагаем модель, в которой условно-постоянные затраты не меняются. Тогда изменение OPEX целиком обусловлено топливной составляющей.

Чтобы производство электроэнергии стало более экономичным, увеличение капитальных затрат не должно превышать экономию топлива (уравнения (3,4))

$$\frac{\Delta CAPEX}{\sum_1^n \frac{E_n}{(1+r)^n}} < \frac{\sum_1^n \Delta OPEX_n}{\sum_1^n E_n} \quad (3)$$

$$\Delta CAPEX \sum_1^n (1+r)^n < \sum_1^n \Delta OPEX_n \quad (4)$$

Преимущество модели в простоте: между снижением затрат на топливо и пределом затрат при модернизации прямая зависимость (см. рис. 1).

Примем срок эксплуатации в 30 лет, номинальные КПД в 39% и 60% (угольной КЭС и ПГЭС соответственно) и ставку рефинансирования в 7,5%.

Диапазон топливных затрат угольных КЭС выбран произвольно, с опорой на аналитические отчеты [5-6], а ПГЭС - на данные ПАО «Газпром» [7].

Для простоты расчетов топливные затраты на кВт*ч были переведены в цену за теплоту при сгорании (без скрытой теплоты конденсации). Так, при стоимости 13,88 \$/т за уголь с низшей теплотой сгорания 4200 ккал при переводе в цену за теплоту составит 0,79 \$/ГДж. Тогда при увеличении КПД на 0,1%, удорожание удельных капитальных затрат окупится, только если будет менее, чем 0,22 \$/кВт. А при оптовой цене на газ - 0,06 \$/куб.м. (2,21 \$/ГДж), удельные капитальные затраты ПГЭС не должны увеличиваться более чем на 0,40 \$/кВт.

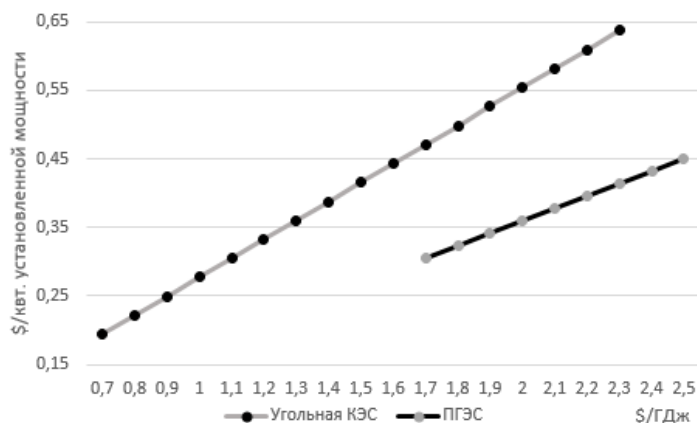


Рис. 1. Граница увеличения величины капитальных затрат теплоэлектростанции при увеличении КПД на 0,1%, в зависимости от цены на уголь

Библиографический список

1. Энергетический профиль России. EES EAEC [Электронный ресурс]: <https://www.eeseaec.org/energeticeskij-profil-rossii> (дата обращения: 28.08.2023)
2. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году // Системный оператор Единой Энергетической Системы России
3. Fan, Jing-Li; Wei, Shijie; Yang, Lin; Wang, Hang; Zhong, Ping; Zhang, Xian (2019). Comparison of the LCOE between coal-fired power plants with CCS and main low-carbon generation technologies: Evidence from China. Energy, doi:10.1016/j.energy.2019.04.003

4. Федотов А.А., Каранова Д.А., и др. Использование свалочного газа в газотурбинных и газопоршневых установках: энергетические и экономические оценки // международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2019 г.
5. Еженедельный обзор рынков угля, газа, мазута и электроэнергии в России. Argus Топливо и энергетика. 27 июля 2022, выпуск XIV, №29.
6. Рынок угля. Аналитический обзор. Итоги первого полугодия 2021 г. УРАЛЬСКАЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ
7. Приказ ФАС России от 16.11.2022 N 820/22 "Об утверждении оптовых цен на газ, добываемый ПАО "Газпром" и его аффилированными лицами, реализуемый потребителям Российской Федерации основных положений формирования и государственного регулирования цен на газ, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 29 декабря 2000 г. N 1021"

УДК 62-144.3

Плотников Л.В., Давыдов Д.А., Красильников Д.Н., Рыжков А.Ф.
Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА БЕНЗИНЕ И СИНТЕЗ-ГАЗЕ

Известно, что сегодня двигатели внутреннего сгорания (ДВС) активно развиваются в направлении использования различных альтернативных и возобновляемых топлив, таких как биотопливо, водород, синтез-газ, синтетическое топливо и другие [1, 2]. Однако, применение таких экзотических топлив часто требует доработки конструкции топливной системы и камеры сгорания, а также настройки параметров рабочего цикла ДВС, чтобы повысить их эффективность [3, 4]. Одним из самых распространенных способов совершенствования двигателей остается математическое моделирование [5]. Это позволяет быстро и дешево найти способы улучшения технико-экономических и экологических показателей ДВС.

Цель данной работы состояла в оценке технико-экономических показателей двигателя при его переводе с бензина на синтез-газ на основе математического моделирования рабочего цикла. Дополнительно была выполнена оптимизация параметров двигателя, работающего на синтез-газе, с целью увеличения мощности и КПД.

Моделирование рабочего цикла двигателя выполнялось в программе Дизель-РК. В качестве объекта для численного исследования был выбран ДВС с искровым зажиганием, работающий на бензине. Основные технические харак-

теристики базового двигателя: тип двигателя – четырехтактный, без наддува; количество цилиндров – 1; диаметр цилиндра – 52 мм; ход поршня – 38 мм; номинальная мощность – 1,7 кВт; номинальная частота вращения – 3600 об/мин; максимальный крутящий момент – 4 Нм. Основные параметры рабочего цикла базового двигателя: степень сжатия – 7,7; угол опережения зажигания – 22 град.; коэффициент избытка воздуха – 1,0.

Геометрические размеры впускной и выпускной систем, а также фазы газораспределения оставались неизменными для всех случаев моделирования.

Топливом для базового ДВС являлся бензин со следующими физико-химическими свойствами: химический состав: C₈H₁₈ – 92 %; C₇H₁₇ – 8 %; теплота сгорания – 44,0 МДж/кг; плотность – 720 кг/м³.

Перевод базового двигателя на синтез-газ осуществлялся посредством изменения физико-химических свойств топлива. Моделирование проводилось для двух типов синтез-газа. Синтез-газ №1 имел следующие свойства: химический состав: CH₄ – 3,4 %; CO₂ – 4,3 %; H₂ – 11,2 %; N₂ – 60 %; CO – 20,9 %; теплота сгорания – 4,475 МДж/кг; плотность – 1,133 кг/м³. Синтез-газ №2: химический состав: CH₄ – 1,6 %; CO₂ – 2,5 %; H₂ – 3,8 %; N₂ – 64,1 %; CO – 28 %; теплота сгорания – 3,721 МДж/кг; плотность – 1,216 кг/м³.

Мощность и КПД поршневого двигателя являлись ключевыми параметрами двигателя для оценки эффективности перевода с бензина на синтез-газ.

По результатам моделирования установлено, что конвертация базового бензинового двигателя на синтез-газ показала существенное снижение технико-экономических показателей ДВС: падение мощности в среднем на 30 %, уменьшение КПД до 7 %.

Соответственно, был проведен анализ влияния различных параметров рабочего цикла двигателя, работающего на синтез-газе, на его мощность и КПД. Таким образом, были выбраны следующие новые параметры рабочего цикла ДВС для работы на синтез-газе: степень сжатия – 9,6; угол опережения зажигания – 18 град.; коэффициент избытка воздуха – 0,9.

Выявлено, что ДВС, работающий на синтез-газе, с новыми параметрами рабочего цикла имеет более высокие технико-экономические показатели по сравнению с базовым двигателем на бензине.

Можно сделать следующие основные выводы:

- установлено, что перевод двигателя с искровым зажиганием с бензина на синтез-газ приводит к снижению мощности до 33 % и одновременному снижению КПД до 7 %.

- выявлено влияние различных параметров рабочего цикла (угол опережения зажигания, коэффициент избытка воздуха и степень сжатия) на технико-экономические показатели двигателя с искровым зажиганием, работающего на синтез-газе.

- показано, что доводка параметров рабочего цикла приводит к существенному улучшению показателей двигателя, работающего на синтез-газе (сниже-

ние мощности не превышает 11 % при росте КПД в среднем на 5 % по сравнению с базовым ДВС).

Библиографический список

1. Hamid M., Wesolowski M. Waste-to-energy technologies as the future of internal combustion engines // Combustion Engines. 2023. V. 193(2). P. 52-63.
2. Yadav J., Deppenkemper K., Pischinger S. Impact of renewable fuels on heavy-duty engine performance and emissions // Energy Reports. 2023. V. 9. P. 1977-1989.
3. Krishnan M.G., Rajkumar S., Thangaraja J., Devarajan Y. Exploring the synergistic potential of higher alcohols and biodiesel in blended and dual fuel combustion modes in diesel engines: A comprehensive review // Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2023. V. 35. Paper 101180.
4. Plotnikov L.V., Ulman N.V. Computational and analytical evaluation of the efficiency of using hydrogen as a fuel in an internal combustion engine // IOP Conf. Series: Earth and Envir. Science. 2021. V. 723. Paper 052018.
5. Reitz R.D., Ogawa H., Payri R., Fansler T. et al. IJER editorial: The future of the internal combustion engine // Int. J. Engine Research. 2020. V. 21(1). P. 3-10.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства "Приоритет-2030".

УДК 62-68

Плотникова Л.В., Ваньков Ю.В., Политова Т.О.

Казанский государственный энергетический университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СБРОСНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Значительными резервами энергосбережения в виде возможных к использованию потоков сбросной энергии (теплоты конденсата, отработанного пара, пара вторичного вскипания, оборотной и технической воды, дымовых газов, технологических полупродуктов и т.п.) обладают крупнотоннажные промышленные предприятия со сложной структурой. Сложность структуры определяется большим количеством элементов в составе теплотехнологической схемы производства, обратными потоками, связями с окружающей средой в виде по-

требуемых топливно-энергетических ресурсов и сбросной энергии. Для таких предприятий вариантов создания энерготехнологических комплексов с включением энергосберегающего и теплоаккумулирующего оборудования, использующего сбросную теплоту, может быть множество. Часто на производстве критерием выбора энергосберегающего мероприятия является срок окупаемости. Однако несколько мероприятий с близким сроком окупаемости могут иметь различный энергетический эффект. Поэтому для выбора эффективного варианта предложено использование системного подхода к анализу теплотехнологических схем [1].

Для ряда производств химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной отраслей промышленности проведен комплексный анализ, включающий структурный анализ, пинч-анализ, термодинамический анализ [2].

Применение структурного анализа позволило, помимо определения последовательности расчета с минимальным количеством итераций/допущений, также преодолеть неоднозначность исходных данных и рассчитать достоверные значения параметров внешних энергоносителей, данные о которых зачастую отсутствуют на производствах, но являются необходимыми для оценки эффективности использования сбросной теплоты.

Пинч-анализ оказался применим только для производств, на которых имеется значительный подогрев технологических потоков, а затем их охлаждение, сопровождающееся сбросом теплоты в окружающую среду. Это предприятия нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, в частности, установки первичной переработки нефти и газоразделения. В ином случае не образуется зона перекрытия горячих и холодных потоков на температурно-энтальпийных диаграммах, следовательно, отсутствует теплообменное оборудование, подходящее для перераспределения потоков.

Проведение пинч-анализа предложено дополнить термодинамическим анализом – помимо температурно-энтальпийных диаграмм строятся температурно-энергетические диаграммы, показывающие работоспособность горячих потоков.

Для схем, к которым пинч-анализ не применим, в термодинамическом анализе предложено для выбора утилизируемого потока ввести критерий ценности теплового потока k_G , определяемый по формуле (1):

$$k_G = \frac{e}{q} \cdot G, \quad (1)$$

где e – эксергия потока, кДж/кг;

q – теплота потока, кДж/кг;

G – расход, кг/с.

Разработаны энерготехнологические комплексы, предназначенные для использования теплоты сбросных потоков, выбранных на основе вышерассмотренных методов анализа.

Так, в схемах, для которых применим пинч-анализ, в качестве теплоутилизационного оборудования выступают теплообменные аппараты, воздухоподогреватели, подогреватели теплофикационной воды, парогенераторы. Это теплотехнологические схемы первичной переработки нефти, газоразделения.

В схемах, для которых пинч-анализ неприменим, в качестве теплоутилизационного оборудования использованы пароструйные компрессоры, аппараты вторичного вскипания и пароаккумуляторы, абсорбционные холодильные машины, теплонасосные установки. Это теплотехнологические схемы шинного производства, химического производства гипосульфитных солей, целлюлозно-бумажного производства, очистки и осушки газа, процесса ректификации. Следует отметить, что перечисленное оборудование относится к трансформаторам теплоты, в которых эксергетический потенциал возрастает за счет использования механической составляющей эксергии. Потребность поднятия потенциала сбросной энергии в таких схемах обусловлена тем, что утилизируемые потоки – низкотемпературные.

Разработанные энерготехнологические комплексы обеспечили снижение внешнего энергопотребления рассмотренных производств на 18-35 %.

Библиографический список

1. Плотникова Л.В., Торкунова Ю.В. Программное обеспечение системного анализа сложноструктурированных промышленных комплексов при разработке энергосберегающих мероприятий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 1 (53). С. 140–154.
2. Сычева О.И., Писаренко Ю.А. Критерии оценки термодинамической эффективности процесса ректификации // Теоретические основы химической технологии. 2019. Т. 53, № 3. С. 309–314.

Работа поддержана государственным заданием(№ 075-03-2023-291).

УДК 621.311

Санчес Гомес О.М., Кузнецов О.Н.

Институт электроэнергетики (ИЭЭ) ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», г. Москва
Институт электроэнергетики (ИЭЭ) ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

МОДЕРНИЗАЦИЯ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОСТРОВА ХУВЕНТУД

Наука и технологии сегодня составляют мощную опору культурного, социального и экономического развития современного общества. В настоящее время происходит эволюция электрической инфраструктуры не только в отношении использования новых технологий, но и новых способов взаимодействия

с потребителями. Технологии интеллектуальных электрических сетей являются решением при модернизации электросетевой инфраструктуры [1].

Комплексная автоматизация Национальной электроэнергетической системы Республики Куба рассматривается в качестве жизненно важного аспекта стратегического плана развития электроэнергетических компаний, в том числе на острове Хувентуд, причём приоритет отдан развитию электрической сети страны с ориентиром на создание условий увеличения доли электростанций на базе возобновляемых источников энергии в структуре генерирующей мощности энергосистемы [2].

Целью данной работы является анализ необходимости модернизации и развития электроэнергетической системы острова Хувентуд.

При проведении анализа следующие методы исследования: историко-логический, анализ и синтез, документальный анализ, наблюдение и графические доказательства. Применяемые подходы: интервью с диспетчерами, оперативным персоналом электрических станций и подстанций и специалистами по автоматизации технологических процессов энергосистемы.

В связи с прогнозируемым ростом энергопотребления в результате увеличения промышленного сектора, необходимо проанализировать электроэнергетическую систему, включая электросетевое хозяйство, и, уделить особое внимание системообразующим объектам, таким как подстанция Герона.

Основные аспекты стратегического плана развития электроэнергетической системы острова Хувентуд до 2030 г. предшествуют необходимости обновления автоматизации подстанций, включают такие темы, как модернизация инфраструктуры, системы дистанционного управления, логика автоматизации задач, цифровизация подстанций, стандарт связи IEC 61850 и другие [2].

Стандарт связи IEC 61850 — это протокол связи, который на сегодняшний день является наиболее важным средством интеграции всего оборудования защиты, управления, SCADA, блокировки и опроса на подстанции. Он позволяет обмениваться данными между интеллектуальными устройствами как внутри одной подстанции, так и между разными подстанциями [3].

В результате проведённого анализа отмечено, что основные аспекты плана стратегического развития энергосистемы острова Хувентуд, ориентированы правительством Республики Куба на изучение потенциала возобновляемых источников энергии, в том числе энергии солнца энергии. Кроме того, в плане стратегического развития предусмотрено применение новых технологий в системах транспорта электроэнергии и поставлена цель выполнения трансформации электрической сети в период 2021-2030 г. г. [4].

Планом развития предусмотрено внедрение накопителя электроэнергии мощностью 10 МВт. Предусматривается внедрение системы энергетического менеджмента Японского агентства международного сотрудничества, что позволит улучшить качество электрической энергии.

Несоответствие главной подстанции энергосистемы острова Хувентуд Герона современному техническому уровню развития подстанций энергосистем с

электростанциями на базе возобновляемых источников энергии, рассматривается как причина проведения модернизации электроэнергетической системы острова Хувентуд с выходом на более высокий уровень автоматизации технологических процессов, с учётом технологий интеллектуальных электрических сетей для увеличения доли электроэнергии, вырабатываемой на базе возобновляемых источников энергии, снижения уровня потерь электроэнергии и сокращения времени нарушения нормального электроснабжения потребителей.

Библиографический список

1. Абреус О.Е. Предложение по строительству подстанции 110/34,5 кВ в районе Картахены // Кафедра Электроэнергетики. Университет Марты Абреу. Вилла Клара, 2014. 125 с.
2. Фудзит К., Мена А. Подготовительный исследовательский проект «Проект улучшения электроснабжения острова Хувентуд» // UNE, 2018. 24 с.
3. Молина Э.Дж., Флорес О.Д. Применение стандарта IEC 61850 в системы электрозащиты подстанций высокого напряжения // Преподающий. 2009. 59 с.
4. Предварительное технико-экономическое обоснование проекта IRENA. Программа установки 14,5 МВт в 5 фотоэлектрических солнечных парках острова Хувентуд, // INEL. Гавана, 2021. С.14-19.

УДК 551.467:629.5.045.64(211)

Кудинович И.В., Сыралёва М.Н.

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
г. Санкт-Петербург

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОБОГРЕВА СУДОВЫХ ЦИСТЕРН

При плавании в арктических морях балластная вода в кормовых и бортовых скуловых балластных цистернах выше ватерлинии может замерзнуть, причем замерзание начинается с верхней части и от боковых стенок, что может привести к обмерзанию вентиляционных труб и клапанов [1]. Образование льда может нарушить работу балластной системы судна и привести к нарушению устойчивости и проблемам с приемом и сливом балласта.

В связи с этим, 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).

В работе [2] был выполнен сравнительный анализ энергоэффективности (в качестве критерия энергоэффективности принято отношение полного теплового потока на поверхности льда, обеспечивающего заданную толщину льда, к затрачиваемой мощности на работу системы) систем рекуперативного теплообмена, воздушного барботажа и вынужденной циркуляции воды и показано, что наиболее энергоэффективными противообледенительными системами являются: система циркуляции балластной воды, и система барботирования воздуха. Однако указанные системы имеют ряд недостатков. Недостатком системы циркуляции балластной воды является сложная конструкция циркуляционного контура и необходимость использования насоса большой мощности. Система барботирования воздуха удобна в эксплуатации, но имеет ограничения при эксплуатации судов при очень низких температурах забортного воздуха.

Таким образом, система подогрева балластной воды наименее энергоэффективна по сравнению с остальными системами обогрева; однако она остается самым надежным способом предотвращения обледенения балластных цистерн при любых экстремальных условиях эксплуатации.

На основе выполненных расчетных исследований [1] сформулированы рекомендации по повышению энергоэффективности системы обогрева судовых цистерн:

- использование нарастающего на внутренней поверхности цистерны слоя льда, как средства теплоизоляции, обеспечивающее снижение теплотерь из цистерны в окружающую среду;
- размещение змеевиков как можно ближе к конструктивной ватерлинии с учетом технологических возможностей их закрепления, что позволяет снизить «паразитные» потери за счет снижения перегрева морской воды относительно температуры замерзания в балластных цистернах ниже ватерлинии.

Нормативная точечная методика [3], используемая в настоящее время при проектировании систем обогрева судовых балластных цистерн, не позволяет корректно рассчитать тепловой режим балластных цистерн сложной геометрической формы. Для теплового расчета таких цистерн необходимо применение CFD кодов. На основании тепловых расчетов с учетом конструктивных особенностей балластных цистерн определены места установки датчиков измерения и их минимально необходимое количество.

В работе [4] проанализирована динамика изменения температурного состояния воды в балластной цистерне при включении и выключении системы обогрева. Предложены рекомендации по алгоритму управления системой обогрева, обеспечивающему наибольшую энергоэффективность.

Качка судна приводит к возникновению вынужденного движения жидкости в ёмкости и, как следствие этого, интенсификации теплообмена между балластной водой и ограждающими поверхностями [5].

В представленной работе исследовано влияние качки судна на теплообмен между балластной водой и ограждающими поверхностями в балластной цистерне.

Библиографический список

1. Bagaev D.V., Kudinovich I.V., Syraleva M.N. Improving the energy efficiency of ship tank heating systems (All-Russian Scientific Conference with International Participation Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers, ТРЕАС-2019, Saint-Petersburg, Russia), 2019 pp 44-45
2. Comparative analysis of energy efficiency of ballast tank anti-freezing systems, Journal of Physics: Conference Series, doi:10.1088/1742-6596/1683/2/022023
3. РД5Р.113-85 «Система подогрева жидкостей в судовых цистернах. Правила проектирования»
4. Syraleva M.N., Kudinovich I.V. Control of ship tank heating systems to increase their energy efficiency (Journal of Physics: Conference Series. 12. Сер. "XII All Russian Conference "Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers", ТРЕАС 2021") 2022. С. 012018
5. Н. В. Селиванов, С. И. Кузьмин, К. Б. Андрис, В. И. Евдашкин. Теплообмен и гидродинамика у ограждающих поверхностей танков морских нефтеналивных судов в условиях качки. ISSN 2073-1574. Вестник АГТУ. Сер. : Морская техника и технология. 2009. N 2, с. 92-98.

УДК 66.092-977-922

Ушаков К.Ю., Богомолов А.Р., Садовский В.М.
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

ТОПЛИВНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПРОЦЕССА СОВМЕСТНОГО ОЖИЖЕНИЯ САПРОМИКСИТОВ И РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ

Одним из направлений использования некондиционного угольного сырья является их термическая переработка с целью получения жидких углеводородов, а также твёрдых и газообразных энергетических продуктов. С целью повышения экономической эффективности в процесс термической переработки могут быть включены вторичные энергетические ресурсы. Введение резиновой крошки отработанных шин карьерных самосвалов, в процесс ожижения сапропелевых углей может способствовать уменьшению затрат на дорогостоящий компонент, как водорододонорный растворитель. Использование отходов резинотехнических изделий дополнительно способствует решению экологических проблем их накопления. Ранее авторами [1] было показано, что перспективным сырьем для процессов прямого ожижения углей являются сапромикситы Барзасского месторождения (Кемеровская область, Россия). В настоящей работе проведены экспериментальные исследования процесса совместного ожижения сапромикситов Барзасского месторождения плитчатой модификации (кл. 1-3 мм) и отходов РТИ - измельченная фракция крупногабаритных шин ка-

рьерных самосвалов (резиновая крошка), предоставленная компанией АО ХК «СДС-Уголь». Подготовка образцов для исследований с массовыми отношениями уголь/(уголь+шина) от 0 до 1 производилась механическим смешением. Продуктами термической обработки резиноугольного сырья являлись газообразные, жидкие продукты и твердый остаток, содержащий смолистые вещества (мальтены и асфальтены).

При экспериментальных исследованиях установлено, что при термической обработке резиновой крошки выход жидких продуктов был незначителен, преимущественно образуются твердый углеродсодержащий и газообразные продукты. При этом, с увеличением доли угля в смеси происходит перераспределение выхода продуктов в сторону увеличения доли жидких и газообразных продуктов. При соотношении уголь/(уголь+шина) в диапазоне 0,3-0,6 наблюдается заметный рост выхода жидких продуктов (при отношении = 0,5 достигает максимума ~ 38,43 масс.%). Отметим, что это значение выхода жидких продуктов превышает выход жидких продуктов, получаемый при термообработке Барзасского сапромиксита в аналогичных условиях (~ 14,85 масс.%). Компонентный состав (определенный методом газовой хроматографии с использованием прибора Agilent 6890N (США) с масс-селективным детектором Agilent 5973.) жидких продуктов совместной термообработки смесей резиновой крошки и Барзасского сапромиксита с различной массовой долей угля в основном представлен ароматическими соединениями (преимущественно алкилпроизводные бензола и нафталина). При этом с повышением содержания барзасского угля в смеси в жидких продуктах заметно увеличивается доля полиароматических соединений (производных флюорена, антрацена, фенантрена и пирена), а также существенно снижается концентрация цимола, нафталина, тетралина, но одновременно с этим появляются кислородсодержащие компоненты (алкилпроизводные фенола).

Во всем исследуемом интервале составов смешанного сырья выход газообразных продуктов при ожижении превышал 20 масс.%, и был максимальным (~ 50 масс.%) при соотношении уголь/(уголь+шина) = 0,8. Состав газообразного продукта термообработки смеси угля и резины был определен с использованием квадрупольного масс-спектрометра Gas Analyzer MS 100. В составе газообразных продуктов преобладал СО (до 74%), также в составе до 10% содержались углеводороды (преимущественно этан), кислород (14%), содержание водорода было менее 1%. Газ подобного состава может рассматриваться как топливный продукт (теплота сгорания, определенная по формуле Д.И. Менделеева, равна 15 МДж/нм³) для компенсации энергетических затрат эндотермического процесса ожижения углеводородного сырья.

Для твёрдого остатка содержащего смолы с использованием автоматического изопериболического калориметра АС-500 (LECO, США) была также определена теплота сгорания. Для образцов с соотношением уголь/(уголь+шина) в диапазоне 0,3-0,6 низшая теплота сгорания находится в

диапазоне 25,5-27,2 МДж/кг. При этом теплота сгорания сапромиксита составляет менее 20 МДж/кг, а резиной крошки ~ 30 МДж/кг.

В работе показаны выход и состав жидких, твёрдых и газообразных продуктов процесса ожижения смеси сапромиксита и резиновой крошки. Жидкий продукт может быть использован в химической промышленности, а твёрдый и газообразные продукты могут быть рассмотрены в качестве топлив, как для снижения энергетических затрат на реализацию процесса ожижения, так и для выработки тепловой и/или электрической энергии.

1. Ушаков К.Ю., Петров И.Я., Богомолов А.Р. Влияние технологических параметров на термические превращения барзасских углей в различных средах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 196–209. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3369.

Работа выполнена при финансовой поддержке в соответствии с доп. соглашением № 075-03-2021-138/3 о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3).

УДК 621.43.016.4

Цэрэндорж Ц., Султангузин И.А.
Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОПОТЕРИ ЗДАНИЙ В УЛАН-БАТОРЕ

Климат в Монголии резко-континентальный, сухой и суровый, большую часть года составляет прохладная весна, прохладная осень и суровая зима, лето приходится на короткий период времени. В столице Монголии в городе Улан-Баторе, по сравнению со столицами других стран, расчетная температура наружного воздуха в зимнее время самая низкая и составляет –39 °С, а в некоторых районах страны температура достигает –45 °С.

Процесс теплопередачи обусловлен разницей температур, чем больше разница температур, тем больше тепловая нагрузка на отопление для поддержания комфортной температуры внутри зданий. При таких колебаниях наружного воздуха особенно сложно поддерживать постоянную температуру внутри здания. Очевидно, что в таких экстремальных условиях, для Монголии очень важна система теплоснабжения. В настоящее время вместе с развитием страны строится много зданий и потребление тепловой энергии продолжает увеличиваться. По этой причине потребление тепловой энергии достигает пика в зим-

ний период и превышает мощность источников энергии, расположенных в центральном районе Монголии. Требуется решение проблемы энергодефицита и одним из таких эффективных решений может быть экономия тепловой энергии за счет «уменьшения теплопотерь и утепления здания», а как следствие снижение нагрузки на систему отопления.

Ключевые слова: изоляция здания, тепловое сопротивление, тепловая нагрузка, программа ArchiCAD.

Энергетическая отрасль Монголии – один из важнейших факторов её социально-экономического развития. Именно от топливных и энергетических ресурсов напрямую зависит нормальное функционирование экономики страны. В Улан-Баторе столице Монголии есть три главных источника теплоэнергетики, 40% населения обслуживают теплоэлектроцентрали, 10% котельные и 50% индивидуальные печи. Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) обеспечивают города не только электроэнергией, но также отоплением и горячей водой. Большая часть тепловой энергии тратится на промышленность и строительство, далее идут затраты на транспорт, бытовые нужды и сельское хозяйство.

Улан-Батор испытывает нехватку энергии с 2010 г. С каждым годом она стремительно растет. В 2022 г. в Монголии требуемая нагрузка тепла составила

3403.3 Гкал/ч при текущей потенциальной мощности основных источника теплоснабжения – 2318 Гкал/ч. Поэтому можно компенсировать эту недостающую мощность путем экономии энергии.

Таблица 1. Фактическое и требуемое термическое сопротивление ограждений 5-этажного жилого дома

№	Виды ограждений	Фактическое термическое сопротивление, м ² °C/Вт	Требуемое термическое сопротивление м ² °C/Вт	Соответствие требованиям реформы
1	Стены	2,92	3,85	Нет
2	Окна	0,45	0,65	Нет
3	Крыша	7,7	5,57	Да

Большая часть отапливаемых зданий в Улан-Баторе была построена в 1950-1980 г. по старым строительным стандартам. Согласно проведенным исследованиям, ограждающие конструкции таких зданий имеют недостаточные теплозащитные свойства для устойчивого проживания и развития. В Улан-Баторе пятиэтажные жилые панельные дома составляют 60% всех многоэтаж-

ных жилых домов. Например, из пятиэтажных панельных домов, расположенных напротив Сухэ-Баторского района г. Улан-Батора, рассмотрим 19 корпус, теплотери которого приведены в табл. 1 методом приведенного сопротивления.

Тепловая нагрузка равна совокупным теплотерям здания, необходимо произвести тепловой энергии столько, сколько потеряно теплоты. Следовательно, утепляя здание с большими теплотерями, мы можем экономить тепловую энергию на 20-30%.

Библиографический список

1. Е.Г.Гашо, Х.Энхжаргал, Л.Батмэнд, Г.Баярсайхан, С.Мунхбаяр, Модернизация систем теплоснабжения в Монголии // РосТепло.ру-всё о теплоснабжении в России, 2021. №226. С. 1-6.
2. (https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/nt_4221.htm)
3. Калякин И.Д., Султангузин И.А. Повышение энергетической эффективности энергоснабжения зданий на основе математического моделирования // диссертация кандидата технических наук. 2022. Москва. НИУ «МЭИ». С. 52-63.
4. Tserendorj Ts., Sultanguzin I.A., Yavorovsky Yu.V. Chaikin, V.Y., Kalyakin I.D., Batbayar N. The Research on Heat Loss Reduction of Prefabricated Building in Ulan-Bator // Proceedings of the 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022, Moscow, March 16-18, 2023. 6 p.
5. Д. Цэрэндолгор, П.Бямбацогт, «Результаты испытаний с 4 по 14 февраля 2012 года в Сухэ-Баторском районе и доме 23 и Баянзурхском районе 12, результаты испытаний 19 апреля 2013 года».
6. Энергетика Монголии: электро и теплоэнергетика страны. Разбор БАБРа, 06.07.2022.
7. (<https://babr24.com/bur/?IDE=231386>)

УДК 621.311

Султанов М.М., Болдырев И.А., Курьянова Е.В., Шевченко М.Е.

Филиал федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Волжском

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

В условиях цифровизации экономики, в особенности энергетического сектора, стоит задача максимально эффективного использования собираемых параметров и информации о текущем состоянии процесса.

Сигналы измерительных каналов могут использоваться в системах диагностики энергетического оборудования, в системах прогнозирования остаточного ресурса оборудования, а также для перехода от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по текущему состоянию оборудования. Вследствие того, что данные в автоматизированных системах управления технологическими процессами собираются с некоторым интервалом и связаны между собой во времени, то они представляют собой временные ряды, которые могут эффективно контролироваться методами статистического анализа. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности применения методов статистического контроля и прогнозирования для определения текущего состояния технологического процесса.

Статистическая обработка данных является важным шагом перед построением прогнозной модели, поскольку позволяет более эффективно выявить регулярные и случайные компоненты во временных рядах для определения вида модели – ARMA, ARIMA или SARIMA [1].

Первоначальный анализ данных включает в себя проверку наличия выбросов, пропущенных значений, аномалий и других артефактов, которые могут повлиять на качество моделирования, после этого производится оценка стационарности временного ряда, т.е. наличия в нем постоянной средней и дисперсии.

Построение модели ARIMA в Python можно разделить на несколько шагов: определение параметров модели; разделение данных на обучающую и тестовую выборки; обучение модели; прогнозирование значений; визуализация результатов.

Используя оптимальные параметры, была построена ARIMA модель для тестовых данных температуры баббита в упорных подшипниках турбогенератора – «Т бабб УПОДШ-1» (рис. 1).

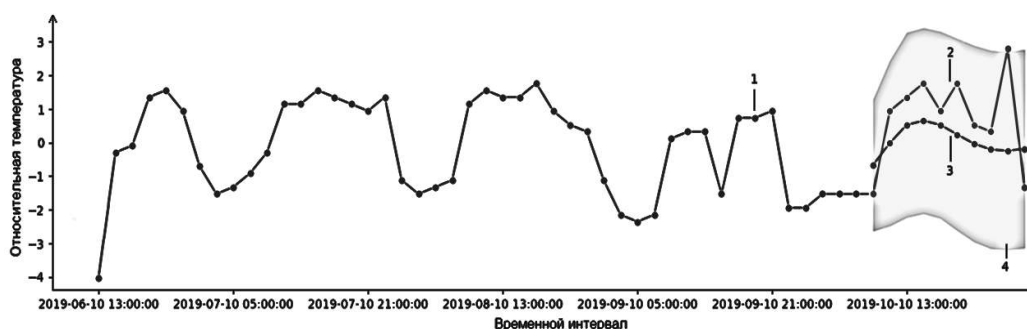


Рис.1. Результат построения модели ARIMA на тестовых данных параметра «Т бабб УПОДШ-1»:

- 1 – обучающая выборка; 2 – тестовые данные; 3 – прогнозируемые значения;
- 4 – доверительный интервал с вероятностью 95%

Для детального визуального сравнения построим отдельно участок прогноза и тестовых данных. Результаты представлены на рис. 2.

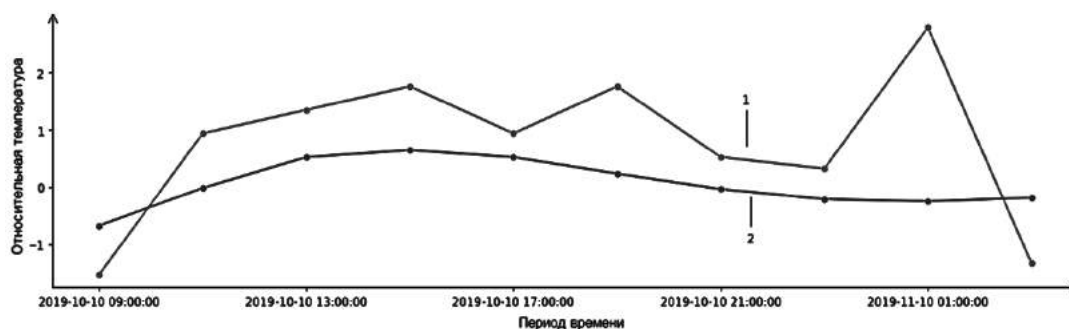


Рис. 2. Прогноз тестовых данных параметра «Т бабб УПОДШ-1»:
1 – тестовые данные; 2 – прогнозируемые значения

По результатам построения прогнозной модели на тестовых данных параметра, которые включали в себя период аномального режима работы оборудования, можно сделать вывод, что модель достаточно точно описывает тестовые данные. Следовательно, модель способна прогнозировать нестационарные, аномальные режимы.

Полученные результаты могут быть использованы для построения систем предиктивного анализа, направленных на выявление развития дефектов и предупреждения аварийных режимов работы. ARIMA модель с высокой точностью спрогнозировала предаварийный режим, обнаружение которого является ключевым фактором предупреждения аварий.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Российской Федерации FSWF- 2020-0025 “Разработка методов и анализ способов достижения высокого уровня безопасности и конкурентоспособности объектов энергетических систем на базе цифровых технологий”.

Библиографический список

1. Ворсина Д. А., Нестеров С. А. Прогнозирование временных рядов // Неделя науки СПбПУ. – 2019. – С. 49-53.
2. Armstrong J.S., Collopy F. Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons. International Journal of Forecasting. 1992; 3(1):69-80. DOI: 10.1016/0169-2070(92)90008-W

СЕКЦИЯ 6. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС И АЭС

УДК 620.9

Балакин Д.Ю., Аронсон К.Э.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, 620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТУПЕНИ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ПАРОСТРУЙНОГО ЭЖЕКТОРА С ПОМОЩЬЮ РАСШИРЕННОЙ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Для пароструйного эжектора известно, что его максимальная эффективность имеет место в предельном режиме [1]. В этом режиме давление на входе в ступень эжектора не зависит в определённом диапазоне от давления на выходе из ступени.

Для надёжной эксплуатации турбоустановки первая ступень многоступенчатого пароструйного эжектора должна работать в предельном режиме согласно нормам [2]. Вторая и третья ступень эжектора поддерживают режим работы первой ступени. Режим работы второй и третьей ступени эжектора в значительной степени зависит от эффективности промежуточных охладителей.

Для исследования процессов, происходящих в многоступенчатом пароструйном эжекторе, разработана схема измерений, представленная на рисунке (полная схема измерений эжектора включает 21 точку, куда вошли датчики измерения расхода конденсата пара, температуры сред и дополнительные датчики давления по тракту эжектора). С помощью разработанного портативного измерительного комплекса измерения проводились с шагом в 1 секунду.

Для определения режима функционирования ступеней эжектора на Салаватской ТЭЦ проведены испытания основного эжектора. В ходе испытаний эжектор отключён от конденсатора, а воздух подавался в приемную камеру первой ступени через калиброванные шайбы. Получена характеристика эжектора на сухом (атмосферном) воздухе, предельная производительность составила $G \approx 80$ кг/ч. Кроме этого проведены совместные испытания конденсатора и эжектора, в ходе которых сопоставлялось фактическое давление в конденсаторе с нормативным. Такая методика позволяет косвенно (методом сравнения) оценить эффективность эжектора.

Испытания эжектора на сухом воздухе не позволяют определить режим функционирования первой ступени эжектора, поскольку в таких условиях она будет работать в допредельном режиме. Поэтому основной эжектор ЭП-3-600-4 подключался к конденсатору турбины. На выходе из эжектора устанавливалось расходомерное устройство УрФУ [3], представляющее собой прибор дроссель-

ного типа, который измеряет расход воздуха по перепаду давления на калиброванной шайбе и температуре смеси.

Перепад давления на расходомере составлял $\Delta p \approx 0,6$ кПа. Давление на входе в первую ступень осталось постоянным в пределах погрешности схемы измерений. Подъем давления на входе во вторую и третью ступени составил ≈ 1 кПа. Это означает, что изменение противодействия на выходе из эжектора оказывает влияние на давление на входе в ступень эжектора.

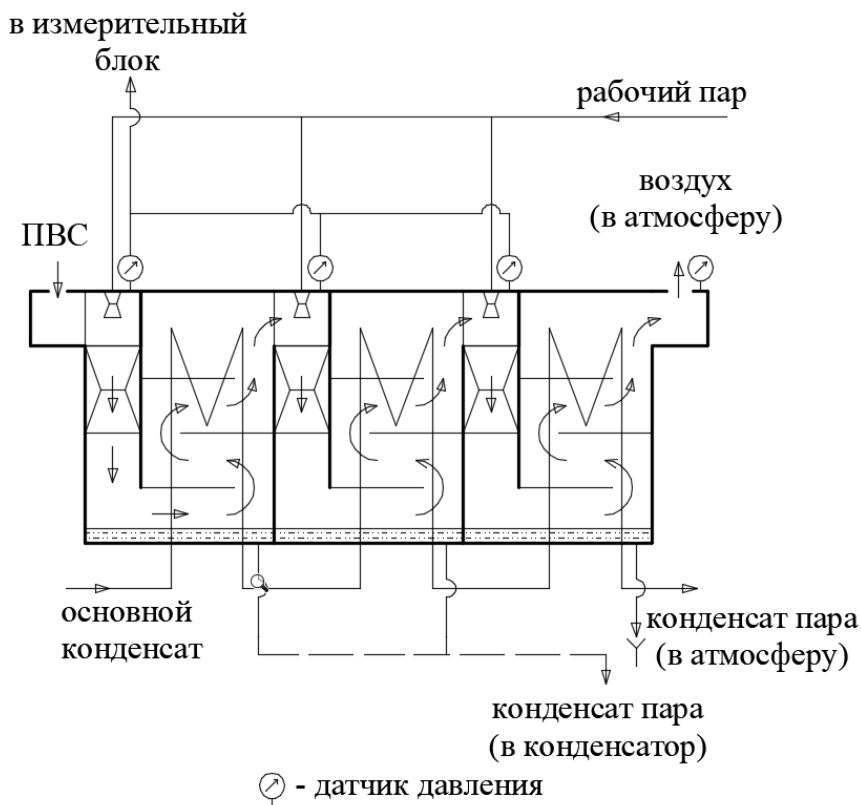


Рис. 1. Схема измерений.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что первая ступень эжектора работает в предельном режиме, а вторая и третья ступени – в допредельном.

В настоящее время идет разработка способа измерений полного давления потока ПВС за диффузором ступени эжектора. Это позволит уточнить режимы течения паровоздушной смеси по тракту эжектора.

Библиографический список

1. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер // М.: Энергоатомиздат, 1989 г. – 352 с
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: СО 153-34.20.501-2003 СПб.: ДЕАН, 2019. — 320 с.

3. Демидов А. Л. Расходомерное устройство для вакуумной системы паровой турбины/ К. Э. Аронсон, Н.В. Желонкин, И.Б. Мурманский, А.Ю. Рябчиков// Турбины и дизели. – 2020 - №1 (88) – С. 60-62.

УДК 620.9

Демидов А.Л., Аронсон К.Э., Рябчиков А.Ю., Александрова Е.К
Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ ПО РЯДАМ ТРУБОК ВХОДНОЙ ВОДЯНОЙ КАМЕРЫ КОНДЕНСАТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Распределение паровых нагрузок в различных зонах конденсатора зависит от распределения скоростей воды в трубках [1]. Паровая нагрузка выше в зонах конденсатора с более высокими скоростями движения воды в трубках. Это связано с тем, что при более высоких скоростях воды увеличивается коэффициент теплопередачи между паром и водой, что позволяет эффективнее конденсировать пар.

При расчёте конденсатора скорости воды в трубках по высоте водяной камеры принимаются постоянными, равными среднерасходной скорости.

Предлагается методика, позволяющая определить скорости воды в отдельных рядах трубок по высоте водяной камеры. Методика основана на коллекторном эффекте распределения жидкости в параллельных трубках [2].

В методике рассматривается не только распределение воды по трубкам с учетом конструкции входной водяной камеры, но и поворотной. Скорость воды в трубках определяется разностью статических давлений между камерами. Статические давления воды в трубках рассматриваются как с учетом сопротивления при движении воды в водяных камерах, так и с учетом изменения расходов воды по рядам.

Вначале расчета в первых рядах трубок по ходу воды расход принимается равным среднерасходному. Затем последовательно рассчитываются скорости воды во всех рядах трубного пучка. Определяется суммарный расход воды через конденсатор, данный расход сравнивается с принятым и производится итерация для расхода воды в первом ряду трубок. На рис. 1 показаны результаты расчета скорости воды в трубках и компоновка первого хода трубного пучка конденсатора К-1900-II.

Из рис. 1 видно, что характер распределения скорости воды по высоте трубного пучка соответствует общей теории коллекторного эффекта, из которого следует, что скорость воды в трубках ближе к входу в распределительный коллектор ниже скоростей воды в трубках у торца коллектора.

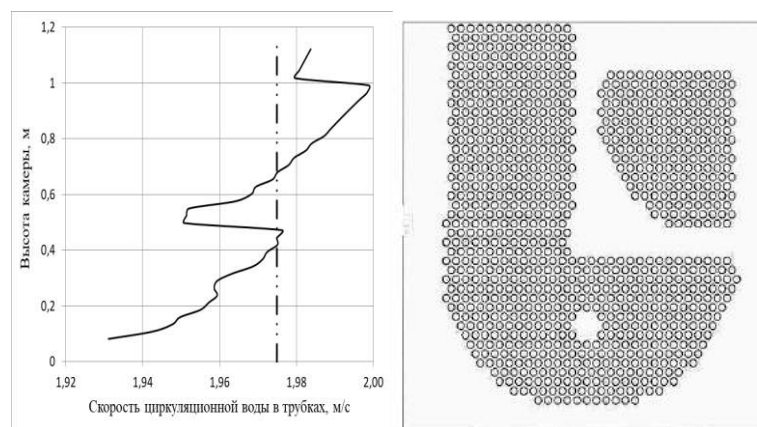


Рис. 1. График зависимости скорости воды в рядах трубок входной водяной камеры К-1900-II от её высоты

Также скорость воды в отдельных рядах трубок отличается от среднерасходной скорости, показанной штриховой линией на рисунке. Различие скоростей воды в отдельных рядах трубок, составляет около 3%. Установлено, что распределение скорости воды по рядам трубок зависит от количества трубок в ряду. Чем больше количество трубок, тем выше скорости.

На рис. 2 показаны результаты расчета и компоновка трубного пучка конденсатора К-9500.

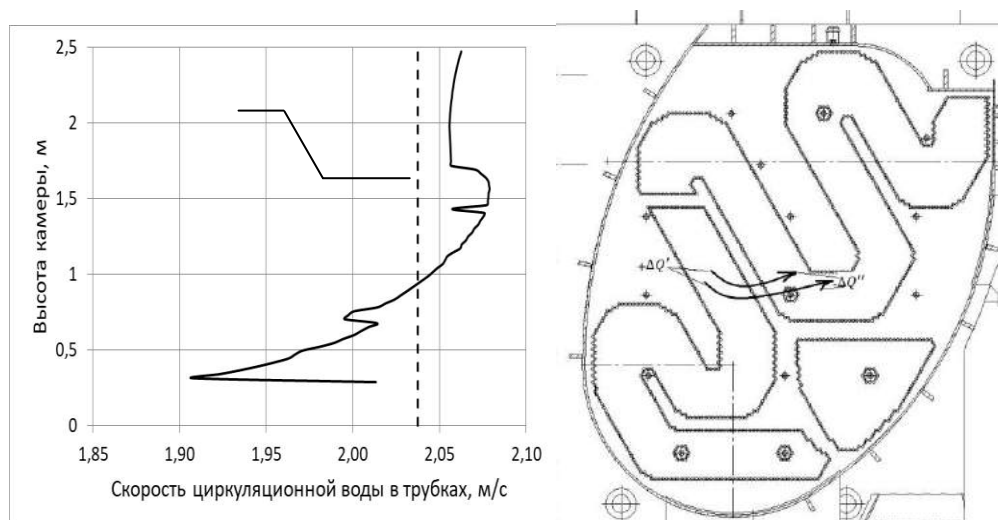


Рис. 2. График зависимости скорости воды в рядах трубок водяной камеры К-9500 от её высоты

При такой компоновке трубного пучка в одном горизонтальном сечении поворотной камеры расположены трубки первого хода и второго хода. Различие скоростей воды в трубах по рядам данного конденсатора достигает 8%, что определяется значительной неравномерностью количества трубок в рядах по высоте водяной камеры конденсатора.

Как правило, конденсатор рассчитывается для номинальной (максимальной) скорости воды в трубках для выбранного материала. Необходимо отметить, что пониженные скорости воды в трубках конденсатора, могут приводить к интенсификации образования отложений и повышенной коррозии трубок, а высокие скорости воды в трубках могут вызывать эрозионный износ, особенно во входных и выходных участках трубок.

При проектировании трубных пучков конденсаторов рекомендуется обращать внимание на распределение числа трубок по отдельным рядам и стремиться к равномерному расположению количества трубок в рядах, чтобы скорость воды была равномерной по всему трубному пучку.

Библиографический список

1. Демидов А.Л. Исследование распределения удельных паровых нагрузок в трубных пучках конденсаторов теплофикационных турбин// К. Э. Аронсон, А. Ю. Рябчиков, Н. В. Желонкин/ Энергетика. Экология. Энергосбережение. Тезисы докладов. – Калуга: Издательство Манускрипт, 2021 – С. 73-74
Петров Г.Н. Движение жидкости с изменением расхода вдоль пути. – М.: Стройиздат, 1964. – 200 с.

УДК 621.039.542

**Киселев Д.С., Бахин А.Н., Беспечалов Б.Н., Викторова С.М.,
Вишневский В.Ю., Зайцев Д.А., Козлов В.В., Репников В.М.,
Тихонов Н.А.**

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение «ЛУЧ», Московская обл., г. Подольск

ПЛОТНОЕ ТОПЛИВО ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

В настоящее время развитие мировой атомной энергетики ведётся по вектору разработок и строительства пилотных проектов ядерных энергетических установок «IV поколения», характеризующихся высокой эффективностью, экономичностью, безопасностью и меньшим риском распространения по сравнению с предыдущими поколениями. Представленные шесть концепций таких установок основываются на технологиях двух типов: высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах. Отечественными прототипами таких реакторов являются ВГР-50, ВГ-400, ВГМ и БН-600, БН-800. Помимо повышения эксплуатационных характеристик и безопасности, ставится задача в значительном расширении функционала таких установок: высокотемпературные газоохлаждаемые реактора предполагается использовать в областях нефтехимии, металлургии и выработки водорода, а реакторы на быстрых нейтронах осуществят замыкание ядерно-топливного цикла путём перера-

ботки использованного ядерного топлива на пристанционных модулях и возврате переработанного топлива обратно в активную зону реактора.

Ключевой задачей при реализации выбранной стратегии развития является обоснованный и апробированный выбор материалов самого энергонапряжённого узла – твэла ядерной энергетической установки, состоящего из топлива, помещенного в оболочку. Выбор пары «топливо-оболочка» основывается на решении проблем их совместимости, безопасности и эффективности эксплуатации [1].

В данной работе будет проведён сравнительный анализ эксплуатационных характеристик разрабатываемых видов топлив для установок «IV-поколения» – МОХ и СНУП. Показана перспективность использования плотного нитридного топлива по сравнению с оксидным, потенциально позволяющая достигнуть больших глубин выгорания. Будет предложена модификация плотного нитридного топлива – уран-циркониевый карбонитрид, характеризующийся повышенной термостойкостью и структурно-фазовой стабильностью при высоких температурах эксплуатации. Представленные доводы дадут основание рассматривать это топливо в качестве перспективного для использования в реакторах «IV поколения».

1. Zaytsev D.A., Bakhin A.N., Bespechalov B.N., Vishnevsky V.Yu., Kiselev D.S., Kolesnikov E.G., Kotov A.Yu., Kochnov V.Yu., Repnikov V.M., Serikov V.S. Interaction of Uranium-Zirconium Carbonitride Fuel Composition with Refractory Structural Materials // Journal of Physics. 2020, 1683. Paper 032037. doi:10.1088/1742-6596/1683/3/032037.

УДК 537.84

Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Окадьев Р.С., Мамыкин А.Д.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Россия является мировым лидером по разработке и эксплуатации атомных реакторов на быстрых нейтронах, в которых теплоносителем является жидкий натрий или свинец. Необходимость совершенствования оборудования и повышения безопасности работ на АЭС на быстрых нейтронах мотивирует авторов к углубленному изучению теплофизических процессов, а также развитию способов применения электромагнитных принципов в интересах систем [1], обеспечивающих работу станций. В данном направлении был исследован теплообмен

в тройниковых соединениях разнотемпературных потоков жидкого натрия [2] на созданном для этих целей двухтемпературном натриевом стенде [3] на площадке «ИМСС УрО РАН». Выполнен цикл договоров на поставку и проведение приемо-сдаточных испытаний электромагнитных насосов для Белоярской АЭС и исследовательского реактора МБИР. Эти работы потребовали создания еще одного натриевого испытательного стенда также на площадке «ИМСС УрО РАН». Стенд в 2023 году получил аккредитацию в Росатоме. На данный момент он является единственным в России аккредитованным стендом для проведения приемо-сдаточных испытаний оборудования для АЭС на БН с натриевым теплоносителем. Разработка этих электромагнитных насосов основана на математическом моделировании и экспериментальных исследованиях процессов в их каналах, что сопровождается поиском возможностей применения аппаратов в том числе и для контроля состава теплоносителя [4].

Одной их основных характеристик, которую необходимо измерять и контролировать как на АЭС, так и на испытательных и исследовательских стендах, является расход теплоносителя. Существующие электромагнитные расходомеры, которые находятся в эксплуатации, в основном основаны на корреляционных или времяпролетных методиках с измерением отклика пульсации сигнала, вызванной пульсацией поля скорости. В них пульсация создается либо твердым, либо «магнитным» препятствием, а отклик измеряется контактными датчиками, регистрирующими электрическое поле. Главное преимущество этих устройств над кондукционными расходомерами состоит в отсутствии необходимости проводить регулярную калибровку. Тем не менее, актуальным является разработка такого расходомера, который не имеет никакого контакта с трубопроводом и никаких вставок внутри канала. Это позволит сохранить целостность трубопровода, что является важным с точки зрения надежности. Авторами разрабатывается именно такое устройство [5], состоящее из последовательно по потоку расположенного бесконтактного электромагнитного генератора пульсаций скорости, и двух бесконтактных электромагнитных регистраторов пульсаций скорости. Зная расстояние между регистраторами и время между регистрациями откликов, можно определить скорость транзитного потока. Главными преимуществами методики является возможность управления интенсивностью и даже формой пульсации скорости, а также возможностью масштабирования системы на разные диаметры трубопроводов. Вопрос заключается в том как эффективно создать эти пульсации скорости и где наиболее рационально расположить измерители скорости.

Для ответа на вопрос в работе исследуется метод генерации пульсаций скорости, который заключается в использовании электромагнитных сил, созданных в локальной области канала с помощью индукторов вращающегося магнитного поля. Регистрация таких пульсаций осуществляется также с помощью электромагнитной системы. Выполнено численное исследование магнитогидродинамических процессов, а также экспериментальное исследование на галлиевом стенде. Изучена эволюция поля скорости, имеющего вихревые

структуры на фоне транзитного потока, для различных параметров процесса. Исследованы влияние интенсивности вихревых структур на возможность их регистрации с помощью данной методики. Полученные на основе результатов характеристики необходимы для выбора параметров устройства измерения расхода теплоносителя [5], который разработан на основе данного исследования.

Библиографический список

1. Архипов В.М. Техника работы с натрием на АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986. 136 с.
2. Колесниченко И., Халилов Р., Шестаков А., Крылов А., Пахолков В., Павлинов А., Мамыкин А., Васильев А., Рогожкин С., Фрик П. Перемешивание разнотемпературных потоков жидкого натрия в трубопроводе за тройником // Теплоэнергетика, 2023. № 3. С. 49-57.
3. Kolesnichenko I., Khalilov R., Shestakov A., Frick P. ICMM two-circuit sodium loop: a tool to study the mixing of flows with different temperature // Magnetohydrodynamics. 2016. V. 52. P. 87-94.
4. Колесниченко И., Халилов Р. Экстремум зависимости напора электромагнитного насоса для жидкого металла от частоты питающего тока // Вычислительная механика сплошных сред, 2022. Т. 15. С. 495-506.
5. Колесниченко И., Халилов Р., Мамыкин А. Корреляционный способ определения расхода жидкого металла и безэлектродный электромагнитный расходомер жидкого металла для его осуществления // Патент РФ № 2791036. Приоритет от 24.06.2022. Зарегистрирован в Гос.реестре изобретений РФ 01.03.2022.

Работа поддержана Правительством Пермского края в рамках научного проекта «Разработка систем измерения расхода жидкого металла в каналах металлургических и ядерных энергетических установок» (соглашение С-26/564 от 23 марта 2021 г).

УДК 621.311

Садкин И.С., Щинников П.А.

Новосибирский государственный технический университет

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ СО₂-ЦИКЛОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Современная климатическая повестка связана со снижением роста температуры на планете и требует сокращения антропогенного выброса углекислоты в атмосферу. Одним из основных источников выброса углекислоты в атмосфере

ру является энергетика на органическом топливе. Её доля в мировом энергобалансе велика и, даже в условия снижения, продолжает оставаться доминирующей. Поэтому задачи развития энергетики на органическом топливе рассматривают через призму сокращения выбросов углекислоты в атмосферу, в том числе и в России.

Одним из перспективных вариантов развития энергетики считается сжигание органического топлива в кислороде с переходом на новое рабочее тело – диоксид углерода. В этом случае не требуется применение систем улавливания CO_2 из продуктов сгорания, а его избыток может выводиться из цикла под рабочим давлением. Такое техническое решение успешно реализовано в г. Ла-Порте, Техас, США [1]. Практическая реализация CO_2 -цикла усилила интерес к подобным установкам. Широко известны исследования университета Граца (Graz University, Austria), компании 8 Rivers Capital (USA), National Energy Technology Laboratory (Pittsburg, USA). Компания Net Power (Texas, USA) реализовала энергетическую установку мощностью 50 МВт [2]. Одновременно изучением CO_2 -циклов занимаются в ОИВТ РАН, МЭИ, НГТУ.

Вместе с тем единообразный подход в исследованиях отсутствует, что затрудняет сравнение различных вариантов CO_2 -циклов как между собой, так и с другими известными технологиями производства электроэнергии. В статье предлагается методика сравнения энергоустановок на основе CO_2 -циклов в условиях изменения их термодинамических параметров.

В статье предлагается анализ энергетических показателей установок для производства электроэнергии на основе CO_2 -циклов. Рассматриваются КПД выработки и отпуска электроэнергии, удельные расходы топлива, затраты электроэнергии на собственные нужды установок. Для этого разработан методический подход, в основе которого лежат балансовые уравнения и уравнения затрат электроэнергии в оборудование собственных нужд. Уравнения затрат электроэнергии опираются на физические параметры рабочих сред и удельные показатели. Такой подход позволяет с единых позиций вести анализ разных технических решений при реализации CO_2 -циклов. Более того он позволяет вести сравнение установок на основе CO_2 -циклов с иными технологиями производства электроэнергии на основе сжигания органического топлива.

В статье рассмотрено четыре варианта установок на основе базовых конфигураций CO_2 -циклов [3, 4], отличающихся способом повышения давления и наличием/отсутствием конденсации рабочего тела. Проведено сравнение этих установок как между собой, так и с другими широко распространенными технологиями производства электроэнергии на органическом топливе.

Расчетами показано, что по показателю эффективности выработки электроэнергии CO_2 -технологии сопоставимы и превосходят технологии ПГУ на основе газовых турбин серий F и H даже без учета работы систем улавливания CO_2 для последних. Однако по показателю эффективности отпуска электроэнергии CO_2 -технологии находятся в одной конкурентной зоне с технологиями ПГУ на газовых турбинах серий A, B, E, F, H и уступают технологиями ПГУ на

основе самых современных газовых турбин серий HA, HL и JAC при обеспечении максимальных параметров входа ($p_0 = 300$ бар; $t_0 = 1400$ °C) и в бескомпрессорном варианте исполнения. Это связано с высокими затратами электроэнергии на обеспечение собственных нужд CO₂-установок, не менее 25% от полной мощности, вместо 11-13% у технологии ПГУ с улавливанием углекислого газа из продуктов сгорания.

Библиографический список

1. La Porte Test Facility. NET Power. - <https://netpower.com/la-porte-test-facility>
Дата обращения 05.03.2023. - Чтение с экрана.
2. Zero Emissions Power from Natural Gas. NET Power Performance Data. <https://netpower.com/wp-content/uploads/2021/05/2021-NET-Power-Performance-DataI-pager.pdf>, - Чтение с экрана.
3. Алексеенко С.В., Щинников П.А., Садкин И.С. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO₂-циклов при кислородном сжигании метана // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 1. С. 89-98.
4. Sadkin I.S., Shchinnikov P.A. Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired sCO₂ power cycles with oxygen combustion of methane // Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 234. Paper 121301.

Работа поддержана РФФ(грант № 23-29-00035)

СЕКЦИЯ 7. ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

УДК 544.076

Курьяков В.Н.

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

АНАЛИЗ ЖИДКОСТЕЙ НА СОДЕРЖАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ МЕТОДОМ УЛЬТРАМИКРОСОКПИИ

Вопрос контроля чистоты воды стоит достаточно остро во многих сферах промышленности. Особо чистая вода нужна в медицине, энергетике, наукоемких отраслях, в приборо- и машиностроении, при производстве высокочистых веществ.

Выделяют три класса чистоты воды по содержанию растворенных в ней солей. Очищенная или обессоленная вода – дистиллированная вода с максимальной электропроводностью 1 мкСм/см. Чистая вода или глубокообессоленная с электропроводностью в интервале от 1 мкСм/см до 0,1 мкСм/см и удельным сопротивлением до 10 МОм·см. Такая вода подходит для выполнения аналитических работ, она соответствует бидистиллированной воде. Ультрачистая вода или особо чистая (высокоомная) с максимальной электропроводностью 0,0555 МкСм/см и удельным сопротивлением 18,2 МОм·см. Контроль чистоты воды по содержанию растворенных в ней солей можно осуществить измерением проводимости (электрического сопротивления). Аппаратные решения для такого рода задач достаточно хорошо развиты. Фильтрационные системы для удаления механических примесей, вплоть до наноразмерных (например, системы обратного осмоса), также имеются в большом количестве на рынке и легко доступны. При этом методы контроля за содержанием механических примесей в ультрачистой воде не так хорошо развиты и задача разработки таких методов актуальна. Поскольку небольшие количества наноразмерных частиц могут попадать в уже очищенную воду во время хранения, транспортировки или использования, отделяясь от стенок тары хранения или системы водоподведения.

Распространенными методами контроля механических примесей в жидкости являются приборы на основе измерения количества вспышек в луче лазера, просвечивающим поток исследуемой жидкости. Такого рода счетчики частиц имеют нижнюю границу детектирования 1-5 мкм.

Приборы и методы измерения концентрации наночастиц могут быть использованы для контроля механических примесей в жидкости. К прямым методам измерения концентрации наночастиц можно отнести следующие методы: конденсационный метод (Condensation particle counter) – данный метод измерения концентрации предполагает обнаружение и подсчет частиц аэрозоля, предварительно увеличив их размер, конденсацией на них жидкости из пересыщенного газа; просвечивающая и растровая (сканирующая) электронная микроско-

пия (ПЭМ и РЭМ) – позволяет непосредственно подсчитать количество наночастиц на получаемых с помощью этих методов микрофотографиях и измерить их размер; атомно-силовая микроскопия (АСМ) – позволяет в некоторых случаях работать с коллоидными системами без высушивания, но проблемы, связанные с высокой стоимостью оборудования, необходимостью специальной подготовки сотрудника для проведения измерений и сложность оценки точного объема, в котором происходит подсчет числа частиц, остаются, как и для электронной микроскопии.

К непрямому методу измерения концентрации можно отнести: широко распространенный непрямой метод определения концентрации частиц с помощью спектрофотометра (абсорбционная спектрофотометрия); турбидиметрия и нефелометрия; резистивно-импульсное зондирование (Tunable Resistive Pulse Sensing, TRPS) или принципу Культера; гравиметрический метод – предполагает высушивание части образца на аналитических весах и взвешивание сухого остатка; кварцевая микрогравиметрия (Quartz crystal microgravimetry) – предполагает высушивание небольшого количества коллоидного раствора на специальной кварцевой площадке прибора и по предварительно проведенной калибровке, из анализа смещения резонансной частоты кристалла, определяют массу сухого остатка на кристалле.

Метод ультрамикроскопии [1] и прибор NP Counter («НП ВИЖН», Россия) на основе данного метода позволяет визуализировать отдельные частицы в воде с размером до 5-10 нм, а специализированное программное обеспечение позволяет подсчитать их и определить концентрацию частиц в образце. В 1925 году за изобретение щелевого и иммерсионного ультрамикроскопов и исследования коллоидных частиц с помощью метода ультрамикроскопии Рихард Зигмонди был удостоен Нобелевской премии по химии.

В работе представлена информация о теоретических основах метода ультрамикроскопии, приведено описание технических характеристик аппаратной части прибора на основе данного метода и представлены результаты исследований серии растворов стандартных образцов наночастиц.

Метод и разработанный прибор могут быть применены к оценке загрязнения механическими примесями не только воды, но и органических жидкостей (топлив, растворителей, смазок и т.п.).

1. Описание метода ультрамикроскопии: [сайт]. URL: <http://npcounter.ru/> (дата обращения: 01.09.2023).

СЕКЦИЯ 8. ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 662.63

Любов В.К.

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Архангельск

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ФАНЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В фанерном производстве образуется значительное количество побочных продуктов, которые могут быть полезно использованы, что позволяет снизить себестоимость конечной продукции. Одним из направлений эффективного использования отходов фанерного производства является их сжигание с целью получения тепловой и электрической энергии, необходимой в технологическом цикле производства. Поэтому в НАО «СВЕЗА Усть-Ижора» в 2020 году были смонтированы и запущены в работу два котлоагрегата Е-40-2,25-305ОР, имеющие одноступенчатую схему испарения.

Топливом для котлоагрегатов является смесь, состоящая из дробленки, обрезков фанеры, и «карандашей», березовой коры, обрезков сухого и сырого шпона и опилок с обрезной линии. Компоненты данной топливной смеси значительно различаются как по теплотехническим характеристикам, так и по технологическим показателям, но особенно сильно гранулометрическим составом, что делает ее сложной для обеспечения эффективного и взрывобезопасного энергетического использования.

Котлоагрегат оборудован индивидуальной системой топливоподачи, с помощью которой биотопливо через два сопла, расположенные на фронтальном экране, забрасывается потоком горячего первичного воздуха на охлаждаемую вибрационную решетку, подключенную к системе естественной циркуляции. Вибрация решетки, установленной под углом 7° к горизонту, осуществляется с помощью привода и обеспечивает перемещение топлива по ее длине. Продолжительность паузы и периода работы вибрационного устройства регулируется и зависит от производительности котла и качества сжигаемого топлива.

Стены топочной камеры закрыты цельносварными газоплотными панелями. Задний и фронтальный экраны имеют аэродинамические выступы, под которые через сопла вводится в топку горячий вторичный воздух, обеспечивающий дожигание горючих компонент топлива и снижение образования оксидов азота.

В опускном газоходе расположены две ступени конвективного пароперегревателя (КПП) и испарительная поверхность нагрева. В восходящем газоходе по ходу движения газов расположены мультициклон, трубчатый воздухоподогреватель (ТВП) и две ступени экономайзера (ЭКО1 и ЭКО2). Мультициклон является частью системы возврата уноса на вибрационную решетку. Для очист-

ки от золовых отложений поверхностей нагрева, расположенных опускном и восходящем газоходах установлены паровые сажеобдувочные аппараты (5+8 шт.).

Вторая ступень улавливания летучей золы выполнена в виде рукавных фильтров с вертикальным расположением рукавов. В процессе эксплуатации котлоагрегатов неоднократно наблюдались воспламенения, как в первой, так и во второй ступенях золоулавливания.

На котлоагрегатах установлена система экологического мониторинга АСУТП мини-ТЭЦ, тренды, получаемые с помощью данной системы, позволяют контролировать динамику изменения выбросов вредных веществ в атмосферный воздух и другие важные параметры работы котлов. Комплексные исследования показали, что реализованная система золоочистки является крайне неудачной. Она ограничивает компанию непрерывной эксплуатации котлоагрегата между чистками фильтров до 8–24 часов. Исходя из этого, требуется модернизация системы золоочистки и в перспективе реконструкция котлов с отказом от слое-факельной схемы сжигания, реализованной с помощью вибрационной решетки.

В 2021 году у котлоагрегата ст. №1 была проведена модернизация системы газоочистки. В ходе которой, вместо второй ступени очистки, выполненной в виде рукавных фильтров, был смонтирован комплекс пыле- и золоулавливания (КПЗУ-10×6×2), состоящий из параллельно установленных пылеуловителей КПЗУ-10 (12 шт.), производительностью по газу 10 тыс. м³/ч каждый, установленных в группу по 6 штук в два яруса, разнесенных по высоте. Уловленный материал с помощью шнековых конвейеров (2 шт.), направляется в контейнер сбора пыли.

Комплексный анализ результатов эксплуатации котла после модернизации второй ступени очистки показал, что она обеспечила работу котлоагрегата с более высокой паропроизводительностью и увеличила компанию непрерывной эксплуатации между чистками в 7–21 раза. Однако фактическая степень очистки дымовых газов в КПЗУ-10×6×2 оказалась меньше проектной и составила не более 80.0%. Кроме этого, было выявлено налипание частиц золы на лопатки рабочего колеса дымососа, что приводило к дисбалансу рабочего колеса и, как следствие, к повышенной вибрации агрегата.

Работа вибрационной решетки вызывала существенные пульсации в топке и последующих элементах котельной установки, дополнительные пульсации создавала включение сажеобдувочных аппаратов, все это вызывало нестабильность в значениях экологических показателей и невозможность обеспечения гарантированных уровней концентраций угарного газа (500 мг/м³) и твердых частиц (305 мг/м³).

Для разработки рекомендаций по комплексному повышению эффективности работы котла исследованы загрязняющая способность золовых частиц, образующихся при сжигании дробленки обрезков фанеры и термические процессы, протекающие с дробленкой фанеры в инертной и воздушной среде.

Нига́й Н.А., Сыро́дой С.В., Познаха́рев А.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СЛОЯ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЁ СУШКИ

В последние десятилетия (20-30 лет) значимость изучения процессов тепло-массопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы, существенно возросла (например, [1, 2]). Это обусловлено тем, что древесина считается одним из самых перспективных возобновляемых и экологоперспективных энергоносителей. Жёсткая экологическая политика ведущих мировых держав создаёт предпосылки для все более активного использования биомассы в производстве тепловой и электрической энергии [3]. В настоящее время одной из нерешенных пока задач в теории сушки древесной биомассы является установление оптимальной формы слоя диспергированной древесной биомассы. Аналогичные задачи встречаются при исследовании процессов тепло- и массопереноса сушки любых диспергированных влагонасыщенных материалов. Мотивация этой работы обусловлена необходимостью проведения анализа влияния размеров и формы слоя древесной биомассы на характеристики и условия ее сушки. С целью оценки влияния формы слоя на динамику процесса влагоудаления были приняты три типичные формы засыпки: в виде конуса, полусферы и полутора.

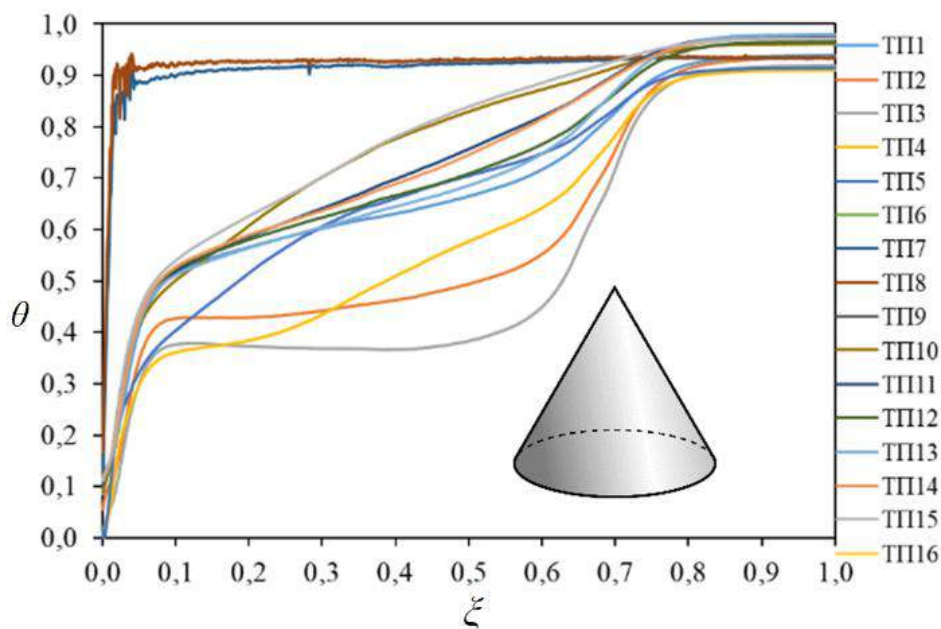


Рис. 1. Зависимости безразмерных температур ($\theta=T/T_0$) от безразмерного времени сушки ($\xi=t/t_{dry}$) при температуре в сушильной камере 393 К. Форма засыпки в виде конуса

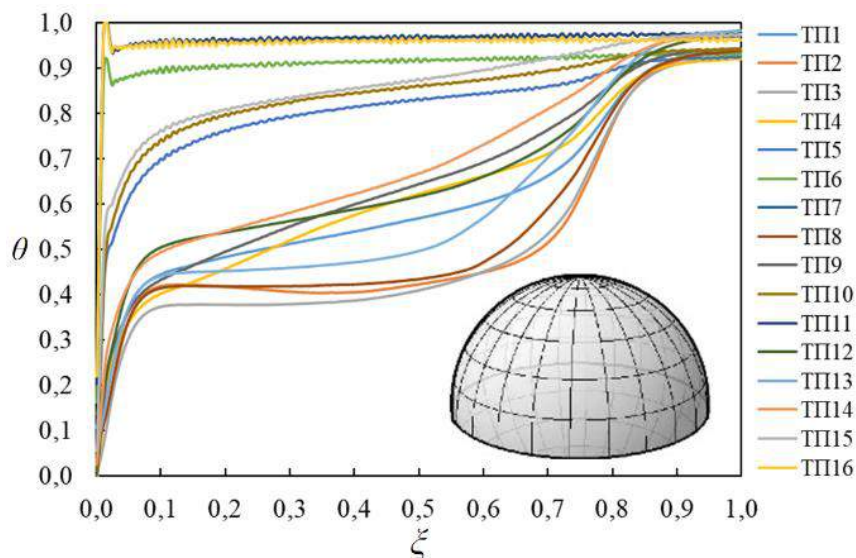


Рис. 2. Зависимости безразмерных температур ($\theta=T/T_0$) от безразмерного времени сушки ($\xi=t/t_{dry}$) при температуре в сушильной камере 393 К. Форма засыпки в виде полусферы

На рис. 1-3 приведены результаты экспериментальных исследований процесса сушки слоя древесной биомассы различных форм и размеров в условиях радиационно-конвективного нагрева. Установлены значения температур в характерных точках слоя биомассы в период сушки. По результатам экспериментальных исследований (рисунок 1-3) установлено существенно неравномерное и немонотонно изменяющееся температурное поле. Соответственно, можно сказать, что использование нульмерных моделей при описании процессов тепло- и массопереноса, протекающих при термической подготовке большой совокупности древесных частиц, неприменимо.

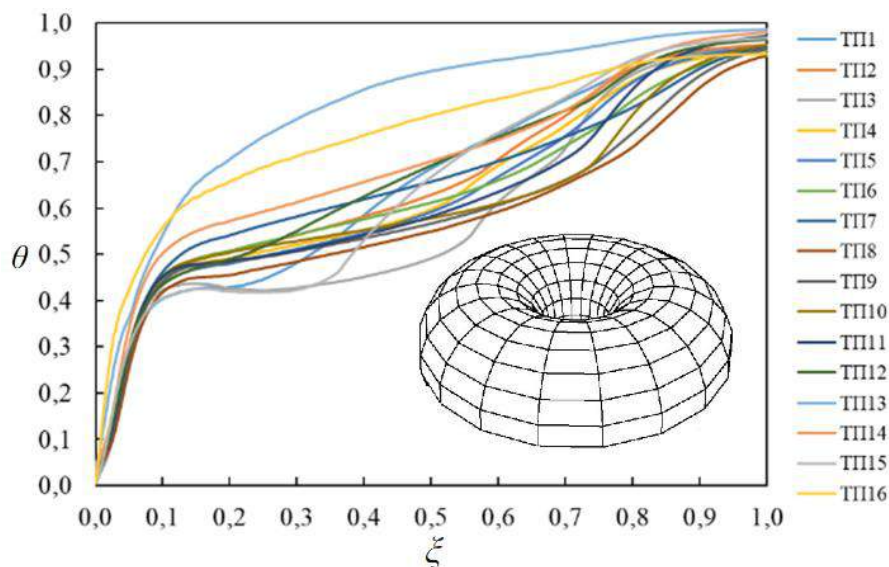


Рис. 3. Зависимости безразмерных температур ($\theta=T/T_0$) от безразмерного времени сушки ($\xi=t/t_{dry}$) при температуре в сушильной камере 393 К. Форма засыпки в виде полутора

Это обусловлено значительным влиянием комплекса процессов тепло- и массопереноса, протекающих при существенных фазовых превращениях. В работе [4] показано, что в период сушки древесной биомассы в слое формируется сложный спектр течений водяного пара, который конденсируется в его глубоких слоях. Последнее приводит к существенным трансформациям температурного поля.

Библиографический список

1. D.K. Shen, S. Gu, K.H. Luo, A.V. Bridgewater. Analysis of wood structural changes under thermal radiation // Energy Fuel. 2019. V. 23. P. 1081-1088.
2. R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossain, S. Mekhilef. A review on biomass as a fuel for boilers // Renew. Sustain. Energy Rev. 2011. V. 15. P. 2262-2289.
3. K. Braimakis, D. Magiri-Skouloudi, D. Grimekis, S. Karellas. Energy-exergy analysis of ultra-supercritical biomass-fuelled steam power plants for industrial CHP, district heating and cool-ing // Renewable Energy. 2020. V. 154. P. 252-269.
4. G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.A. Nigay, V.I. Maksimov, N.Yu. Gutareva. Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass// Renewable Energy. 2021. V.169. P.498 – 511.

Работа поддержана РФФ (грант № 23-79-10092).

УДК 662.763.1

Шевырёв С.А.

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОМПЛЕКСА ПОЛИГЕНЕРАЦИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ВОДОРОДА ИЗ БИОМАССЫ

Во многих странах для производства энергии активно используют биомассу различного происхождения [1]. В частности используется солома, отходы производства риса и подсолнечника, скорлупы орехов и другие материалы.

Переработка таких веществ помимо традиционного способа сжигания может быть организована при использовании технологии газификации. Перспективным направлением газификации можно считать паровую бескислородную газификацию [2], которая позволяет получать генераторный газ с наибольшим содержанием водорода.

Промышленная реализация предлагаемого направления может быть осуществлена в комплексе полигенерации, общее представление которого показано на рис.1.

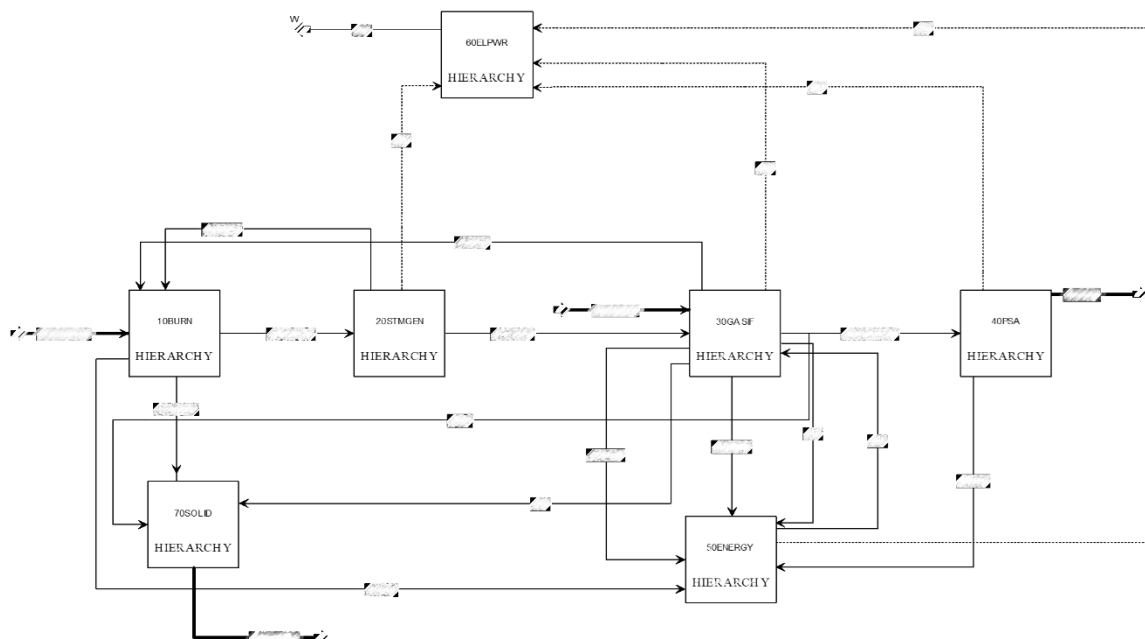


Рис. 1. Концепция комплекса полигенерации для получения H_2 из биомассы

Модель представленного комплекса полигенерации выполнена в программном комплексе Aspen Plus и содержит несколько основных блоков, в которых протекают как теплообменные, так и массообменные процессы [3].

Концепция создания таких комплексов состоит в производстве перегретого водяного пара требуемых параметров (температура до $1000\text{ }^\circ\text{C}$ и низкого давления) при использовании стандартного энергетического оборудования, к которому относится паровой котел и паровая турбина с регулируемым отбором водяного пара.

Энергетическая оценка эффективности таких комплексов полигенерации показывает их высокую эффективность, которая может достигать 60% и более. При этом для полной оценки необходимо выполнить эксергетический анализ, учитывая все входные и выходные потоки как для комплекса в целом, так и для отдельных блоков.

Эксергетическая оценка для комплекса полигенерации, представленного на рис. 1 выполнена с применением программного комплекса Aspen Plus по каждому из материальных потоков. В качестве исходного сырья для моделирования применялись буковые опилки.

Результаты моделирования показывают, что эксергетическая эффективность таких энергокомплексов может быть достаточно высокой, что связано с производством нескольких продуктов в едином технологическом цикле: тепловой энергии, электрической энергии и водорода.

Библиографический список

1. Makwana JP, Pandey J, Mishra G. Improving the properties of producer gas using high temperature gasification of rice husk in a pilot scale fluidized bed gasifier (FBG). *Renew Energy* 2019; 130: 943–951
2. Bogomolov A.R., Shevyrev S.A., Alekseev M. V. Prospects for high-temperature gasification of coal and sludge // *Therm. Eng.* 2013. Vol. 60, № 2. P. 153–156.
3. Шевырев, С. А. Применение Aspen plus для моделирования состава синтез-газа в процессе паровой бескислородной газификации биомассы / С. А. Шевырев // *Теплоэнергетика*. – 2021. – № 9. – С. 43-50. – DOI 10.1134/S0040363621080099.

СЕКЦИЯ 9. ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 544

Ушаков К.Ю., Богомолов А.Р., Горина В.З.
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА И ГАЗИФИКАЦИИ КРОШКИ ОТРАБОТАННЫХ ШИН

На сегодняшний день в России актуальной проблемой является переработка отработанных автомобильных шин, так как отходы не подвергаются разложению, огнеопасны при возгорании, поскольку при горении выбрасывается большое количество вредных веществ в атмосферу, грунт и водоемы, поэтому переработка резинотехнических отходов имеет важное экологическое значение [1].

В данной работе рассмотрен такой способ переработки отходов резинотехнических изделий, как пиролиз, в результате которого образуются жидкие продукты, пиролизный газ и твердый углеродсодержащий остаток, после чего следует стадия углекислотной газификации твердых отходов резинотехнических изделий [2].

Целью данной работы является исследование получаемых продуктов пиролиза и последующей газификации крупногабаритных шин.

Сырьем для термообработки является измельченная фракция отходов крупногабаритных шин карьерных самосвалов компании АО ХК «СДС-Уголь» классом крупности 2-4 мм.

Пиролиз проводили в течение 70 минут при температуре 600°C с количеством исходного сырья 80 г. В результате получено 42.1 % жидких продуктов, 14.0 % пиролизного газа, а масса твердого остатка составила 43.9 %. После чего следовал процесс углекислотной газификации твердого остатка при температурах 940°C, 960°C, 980°C с целью получения генераторного газа, обогащенного СО, и одновременной активации твердого остатка.

По результатам проведенных опытов установлено, что с увеличением температуры углекислотной активации повышается выход СО в составе генераторного газа с 43.7% до 57.0%, при этом количество СО₂ имеет обратную зависимость и изменяется в диапазоне с 51.4% до 39.4%.

Жидкие продукты пиролиза были подвергнуты дистилляции. Отбор фракций проводили при соответствующих температурах кипения при атмосферном давлении (9 фракций) и при вакууме 0,2 атм (7 фракций). Согласно данным хромато-масс-спектрометрического анализа, среди основных компонентов

жидких продуктов пиролиза присутствуют *D*-лимонен и *n*-цимол, являющиеся ценными компонентами для различных отраслей промышленности.

Полученные твердые остатки были проанализированы на возможность применения их в качестве сорбентов для очистки сточных вод. Оценка проводилась по следующим характеристикам: общая влага (определяли по ГОСТ 52911 – 2013), зольность (определяли по ГОСТ 55661 – 2013), адсорбционная активность по метиленовому голубому (определяли по ГОСТ 4453-74).

В результате выявлено, что содержание общей влаги твердого остатка всех образцов составило менее 1%.

Значения зольности для трех образцов, полученных при температурах углекислотной газификации 940°C, 960°C, 980°C, составляют соответственно 12.5%, 10.8%, 14.9%.

Стоит отметить, что в исследовании [3] с повышением температуры пиролиза исходного сырья значение адсорбционной активности снижается. Следовательно, наиболее благоприятными условиями для применения твердого остатка в качестве сорбента являются температуры пиролиза и последующей углекислотной газификации 600°C и 940°C.

На показатели адсорбционной активности влияют текстурные характеристики образцов: удельная поверхность, общий объем пор, средний диаметр пор. Выявлено, что у образца после пиролиза при температуре 600°C и газификации при температуре 940°C с наибольшим значением удельной поверхности 110.3 м²/г адсорбционная активность составила 83.8 мг/г. Средний диаметр пор имеет величину

61.4 нм, суммарный объем пор – 0.4 см³/г.

В работе показано, что полученный генераторный газ при температуре 980°C углекислотной активации твердого остатка с содержанием СО около 57% можно использовать в химической технологии после дополнительной абсорбции СО₂ одним из высокотехнологичных методов. Твердый углеродсодержащий остаток может быть использован в качестве сорбента для очистки сточных вод промышленных предприятий. Фракция из жидких продуктов пиролиза *D*-лимонен и *n*-цимол – ценные продукты.

Библиографический список

1. Спиридонова А.В., Друзьянова В.П. Пиролизный способ получения альтернативного моторного топлива // Вестник ИРГСХА. 2018. С. 150-156.
2. Ушаков К. Ю., Петров И. Я., Азиханов С.С., Темникова Е.Ю., Богомолов А.Р., Горина В.З. Патент 2780839 С1 Способ комплексной переработки резинотехнических отходов : № 2021133167 : заявл. 16.11.2021 : опубл. 04.10.2022 Бюл. № 28.
3. Петраков В.Д., Тыра А.В., Ушаков К.Ю. Определение влияния параметров термообработки резинотехнических отходов на сорбционные свойства твер-

дого остатка // VII Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика». 2022. С. 1.

Работа выполнена при финансовой поддержке в соответствии с дополнительным соглашением № 075-03-2021-138/3 о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3).

УДК 621.18-182.2

Росляков П.В.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Тепловая энергетика является одним из главных источников антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферный воздух. Для тепловых электростанций и котельных основным парниковым газом, образующимся при сжигании разных видов органического топлива, является углекислый газ CO_2 , на долю которого приходится 99,9% всех выбросов ПГ. В 2020 г. на 144 российских ТЭС выбросы углекислого газа превысили 1 млн тонн.

При переходе к низкоуглеродной энергетике большое внимание будет уделяться качеству используемых углей. Низкосортные и низкокалорийные угли, сжигание которых сопровождается повышенными удельными выбросами CO_2 , будут «вымываться» из топливного баланса ТЭС.

Наиболее реальными и достаточно эффективными на данный момент путями снижения CO_2 являются такие меры, как переход с угля на сжигание природного газа, увеличение доли когенерации тепловой и электрической энергии на ТЭС, позволяющей повысить эффективность (коэффициент) использования теплоты топлива, внедрение парогазовых установок, повышение коэффициента полезного действия при производстве электрической энергии на конденсационных электростанциях (КЭС) за счет модернизации действующего и внедрения нового оборудования, в том числе с повышенными (супер- и ультракритическими) параметрами пара, вывод из эксплуатации и демонтаж устаревшего неэффективного оборудования.

Проведенные расчеты показали, что в случае перевода всех угольных котлов российских ТЭС на сжигание природного газа выбросы CO_2 на предприятиях ТЭК, учитывая долю угля в топливном балансе российских ТЭС по итогам 2021 г. порядка 21,4% [1], оценочно могут быть снижены на 18 - 22%. С учетом доли теплоэнергетики в загрязнении углекислым газом в 29% [2], это приведет к снижению выбросов CO_2 на 5 - 6% в целом по стране. Таким образом абсо-

лотные выбросы CO_2 за счет данного мероприятия могут быть снижены примерно на 60 - 65 млн т/год.

Удельные выбросы CO_2 (т/МВт·ч) от конденсационных ПГУ в 1,5 раза меньше, чем от конденсационных газовых ПТУ и ГТУ и в 3 раза меньше по сравнению с пылеугольными КЭС. В этой связи в качестве приоритетных технологий в электроэнергетике на период до 2035 г. согласно Энергетической стратегии России определены отечественные ГТУ большой мощности и высокоэффективные ПГУ на их основе.

Переход пылеугольных КЭС со сверхкритических параметров пара (СКД: 25 МПа/545°C) на суперкритические параметры (СКП: 30 МПа/600°C) позволит за счет более высокого КПД снизить удельные выбросы CO_2 (т/МВт·ч) на 18 – 20%.

Удельные выбросы CO_2 на единицу производимой тепловой энергии при сжигании различных углей составили от 0,45 до 0,537 т/Гкал, при этом наибольшие выбросы характерны для бурых углей. Удельные выбросы CO_2 из газомазутных котлов колеблются в достаточно узких диапазонах: 0,36 – 0,375 т/Гкал – для мазутов и 0,233 – 0,251 т/Гкал – для природных газов. При сжигании попутных газов удельные выбросы CO_2 еще меньше и составляют всего 0,16 – 0,236 т/Гкал.

Расчеты также показали, что массовые (т/час) и удельные (с учетом пересчета т/МВт·ч и т/Гкал для корректного сопоставления) выбросы CO_2 при одинаковой мощности установок существенно меньше у отопительных котлов по сравнению с котлами конденсационных установок из-за значительной разницы в их КПД. Это еще раз подтверждает, что использование топлива для когенерации на ТЭЦ в силу более высокой эффективности использования теплоты топлива (КИТ) является одним из доступных и эффективных практических мероприятий, позволяющих снизить выбросы парниковых газов, что, в частности, предусмотрено в низкоуглеродной стратегии РФ.

Результаты проведенных расчетов массовых и удельных выбросов CO_2 для разных типов энергетических установок, сжигающих различные виды топлив, могут быть использованы для оценки выбросов парниковых газов при подготовке статистической отчетности ТЭС.

Библиографический список

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2022 Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии – М.: Бюро НДТ, 2022, 318 с.
2. Справочная информация об антропогенных выбросах парниковых газов. <https://pandia.ru/text/80/310/1378.php>

Рябов Г. А., Литун Д. С., Фоломеев О. М.

ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО ВТИ), г. Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ХИМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ CO₂ И ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ПРОДУКТОВ

Технология сжигания и газификации в химических циклах со связанными между собой реакторами с кипящим (КС) и циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) получили значительное развитие в связи с декарбонизацией энергетики и получением полезных продуктов из органических топлив. В [1] выполнен анализ современного состояния исследований и разработок по улавливанию CO₂ в химических циклах сжигания и газификации топлив (CLC). В настоящее время эта технология находится в стадии исследований на лабораторных и пилотных установках мощностью до 1 МВт.

Суть этой технологии сводится к такой организации процесса горения, когда переносчиком кислорода к топливу является не воздух, а оксид металла. Последний при взаимодействии с топливом в топливном реакторе восстанавливается до металла (или более низкого оксида) с образованием CO₂ и водяного пара. После этого металл окисляется в воздушном реакторе и получившийся оксид вновь направляется в цикл. Выходящие из топливного реактора газы после конденсации водяного пара представляют собой практически чистый CO₂, который может быть направлен на захоронение или утилизацию.

Показано, что при использовании технологии химических циклов относительно небольшое снижение КПД – около 4 %. Для очистки после сжигания они обычно общие потери за электроэнергию, включая сжатие, составляет около 10 % от теплотворной способности топлива, а снижение КПД нетто – 10,3 %. Поэтому, разработки в области улавливания CO₂ в химических циклах имеют значительную перспективу.

При разработке установок различной мощности наибольшее внимание уделяется максимальному повышению расхода циркулирующих частиц, например, за счет использования потока частиц внутренней циркуляции. Показано, что минимально необходимый расход циркулирующих частиц задается тепловым балансом. Предложена новая схема соединения реакторов и выполнены расчетные оценки удельного расхода частиц оксидов металлов на уровне 8 – 10 кг/с на тепловой МВт установки.

Одним из перспективных направлений переработки твердых топлив в полезные продукты с высокой добавленной стоимостью являются полигенерирующие системы с получением электроэнергии, тепла и синтетического газа с дальнейшей его переработкой в компоненты моторных топлив [2, 3].

Производство водорода с использованием технологии химических циклов вызывает все больший интерес в последние годы, потому что производительность процесса получения водорода довольно велика и происходит улавливание диоксида углерода. В таких системах используются три связанных между собой реактора [4]. Необходимо отметить, что при использовании биомассы в качестве топлива удается добиться отрицательных выбросов CO₂.

Авторы предложили объединить эти два технических решения в систему из пяти реакторов можно добиться экономически выгодного варианта получения водорода из твердых топлив. Даны особенности и основные параметры таких систем применительно к использованию биомассы и отходов углеобогащения. Определяющим работу системы со связанными между собой реакторами является гидродинамика таких аппаратов и контуров циркуляции, приведены соответствующие расчеты на базе экспериментов на холодных моделях [5]. Даны ориентировочные размеры и стоимостные показатели оборудования.

Выполнена оценка приведенной стоимости водорода за жизненный цикл установки (LСОН). Сравнение с результатами исследований для традиционных систем с газификацией твердых топлив и улавливанием CO₂ показало перспективность разработанных технологических решений.

Показано, что предложенная нами схема получения водорода в химических циклах с оксидами железа с использованием газогенератора со связанными между собой реакторами вполне жизнеспособна. Наше значение стоимости водорода – 1,36 дол. США/кг фактически получено для условий использования биомассы, то есть при отсутствии учитываемых выбросов CO₂. Около 2/3 расхода CO₂ уже готово к захоронению, поэтому остается удалить CO₂ только из потока дымовых газов от реактора с ЦКС газогенератора.

Библиографический список

- 1 Рябов Г. А. Химические циклы сжигания и газификации топлив. Обзор исследований и новых технологических решений / Теплоэнергетика, 2022 - № 1 - С. 32-50.
- 2 Pfeifer, C. Co-gasification of biomass and coal in a 8 MW dual fluidized bed steam gasifier /C. Pfeifer, I. Aiger, H. Hofbauer // Proc. of the 10-th Int. Conf. on CFB and Fluidization Technology, May 1 – 5, 2011, Synriver, Oregon, USA. – 2011.
- 3 Song, J.H. Optimization of biomass gasification process for F-T bio-diesel synthesis / J.H. Song, Y.K. Sung, Y.T. Choi, U.D. Lee// Proc. of the 20-th Int. Conf. on FBC, May 18 – 21, 2009, Xian, China. – 2009.
- 4 Chiesa, P. Three-reactors chemical looping process for hydrogen production / P. Chiesa, G. Lozza, A. Malandrino, M. Romano, V. Piccolo // International Journal of Hydrogen Energy 33(9):2233-2245, May 2008. DOI:10.1016/j.ijhydene.2008.02.032.

5 Рябов Г.А. Результаты расчетных и экспериментальных исследований гидродинамики циркуляционных контуров в аппаратах с циркулирующим кипящим слоем и системах со связанными реакторами [Текст] / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Д.А. Санкин, Д.А. Мельников // Теплоэнергетика. – 2015. – № 2. – С. 33–40.

УДК 662.613.1; 625.07

**Темникова Е.Ю., Полтавец А.В., Зуев М.В., Абулханов В.И,
Богомолов А.Р.**

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
г. Кемерово

ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗОЛОШЛАКОВ НОВО-КЕМЕРОВСКОЙ ТЭЦ

По данным СГК ежегодно суммарный выход золошлаковых отходов (ЗШО) составляет около 1,5 млн. т, при этом переработке подвергается всего 8,5%, в то время как действующие золоотвалы характеризуются предельным накоплением ЗШО. Использование ЗШО путем их переработки – разделения на продукты, в том числе на шлаковый щебень и шлаковый песок, является экономически более эффективно, чем складирование на золоотвалах, а с учетом перспективного увеличения экологических платежей и штрафов за вывоз ЗШО на золоотвалы и дефицита свободных земель в черте города вблизи существующих ТЭС для золоотвалов, будет становиться все более рентабельно.

Целью работы является определение возможности применения продуктов сепарации ЗШО - шлаковых щебня и песка в дорожном строительстве (в соответствии с ОДМ 218.2.031-2013 и ГОСТ 32826-2014).

Для достижения поставленной цели проведены аналитические испытания отобранных проб по различным показателям. С этой целью на Ново-Кемеровской ТЭЦ провели отдельный отбор представительных проб золы и шлака для определения доли шлака в ЗШО и исследования проб.

Для проб угля, подаваемого на сжигание, получены технические характеристики: влажность 4,0%, выход летучих 30,1%, зольность 20,9% и высшая теплота 5898 ккал/кг. Определен элементный состав $C^a = 60,2\%$, $H^a = 3,98\%$, $N^a = 1,73\%$, $S^a = 0,29\%$, $O^a_d = 9,27\%$ и проведен расчет низшей теплоты сгорания топлива 23747 кДж/кг.

По характеристикам котла, топлива и параметрам пара рассчитаем содержание шлака и золы в ЗШО. Расход топлива 32,3 т/ч вычислили как отношение произведения теплоты, воспринятой водой (по разности энтальпий перегретого пара и питательной воды), на фактическую паропроизводительность 335 т/ч к КПД котлоагрегата 92% и к располагаемой теплоте (сумма низшей теплоты сгорания топлива и теплоты вносимой с воздухом). Где энтальпия перегретого пара найдена при температуре 545°C и давлении 13,8 МПа перед стопорным

клапаном и, а энтальпия питательной воды при температуре 225°C перед экономайзером и давлении 18,5 МПа после ПЭН. Вычислили расход ЗШО котлоагрегата равный 112,5 кг/мин при расходе топлива в 32,3 т/ч и зольности 20,9%, как произведение расхода топлива и зольности топлива. На станции за 10 мин было отобрано 204 кг шлака, что равно 20,4 кг/мин. Тогда доля шлака составляет $20,4 / 112 = 0,18$ или 18%, а доля золы 82%:

Аналитические исследования показали, что в золе и в шлаке преобладают оксиды алюминия (22,57 и 20,03%) и кремния (56,04 и 57,95%), а оксида кальция (3,35 и 3,81%) менее 5 %, что свидетельствует о низкой активности ЗШО. Зола и шлак относятся к П-Б низкокальцевым, т.к. $(CaO+MgO) = 4,99$ и 5,7% менее 20% и сверхкислым $(SiO_2+Al_2O_3) = 78,61$ и 80,98% более 70%, соответственно.

По данным рассева шлака определили процентное содержание шлаковых песка и щебня. Доля шлака размером частиц менее 0,125 мм составила 0,6%, 0,125÷5 мм (шлаковый песок) – 56,4%, 8÷20 мм (шлаковый щебень) – 32,4%, более 20 мм – 10,6%.

Рассев золы уноса показал, что 97,8% отобранной золы проходит через сито 0,125 мм, т.е. она не может быть вовлечена в шлаковый песок.

Потери массы золы и шлака при прокаливании составили в среднем 1,4% от общей массы образца. На основании чего можно отнести золу и шлак к негорючим материалам (НГ).

Насыпная плотность шлака для применения в качестве щебня и песка составила 1050 кг/м³ и 990 кг/м³, соответственно, а пустотность шлакового щебня и песка – 58,98 и 65,08%, соответственно.

Получена истинная плотность шлака равная 2,835 г/см³, пористость шлакового щебня – 9,7%.

Коэффициент фильтрации составил 0,142 см/с или 122,7 м/сут (в испытаниях использовали шлаковый песок с размером частиц 0,125-5 мм).

Перед активностью шлака предварительно определялись значения максимальной плотности в сухом состоянии и оптимальной влажности по наивысшей точке их графической зависимости, значения которых составили 7,79 % и 1,32 г/см³. Затем при этих значения изготавливаются брикеты и выдерживаются в ванне с гидрозатвором 18 суток для определения предела прочности образцов. Однако по истечении 18 суток брикеты из шлака разрушились, в связи, с чем не проводились испытания на определение предела прочности образцов, который можно считать равным $S_{сж} = 0$. Т.е. грунт из шлака не активен, что подтверждается низким содержанием CaO менее 5%.

Содержание зёрен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы составило для шлакового щебня фракциями в диапазоне 5-8, 8-10, 10-15, 15-20 мм 0,86-2,98 %, для широкой фракции 5-20 мм – 2,04%, что соответствует марке щебня Л10.

Дробимость шлакового щебня по испытаниям составила 20%, а значение показателя сопротивления дроблению и износу зерен шлакового щебня – 18,57%, щебень можно отнести к маркам М800 и И2, соответственно.

Вывод: шлак Ново-Кемеровской ТЭЦ возможен к применению в качестве шлакового щебня и шлакового песка при строительстве, реконструкции, ремонтах земляного полотна автомобильных дорог общего пользования.

Работа выполнена при финансовой поддержке в соответствии с договорным письмом от 25.01.2023 г. № НКТЭЦ-23/64.

УДК 621.9

Фомичев В.В., Кочнов О.Ю., Пахолик Д.А., Кузнецов Н.В.
АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», г. Обнинск

ВЛИЯНИЕ ИЯУ МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

В настоящей работе рассмотрено влияние ИЯУ малой мощности на примере АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова». Анализ был проведен по результатам мониторинга радиационных параметров с 2011 по 2022 года и проведена корреляция данных параметров, как с объемом производства (Таблица №1), так и между собой. По итогам работы были отмечены наиболее эффективные мероприятия по снижению негативного воздействия на окружающую среду, из проведенных за рассматриваемый период. Также на основе последних проведенных мероприятий в 2022 году, дан прогноз по дальнейшей динамике выбросов.

Таблица №1 Объем производства за каждый год

№	Год	Объем производства, Ки
1	2011	около 3600
2	2012	около 6000
3	2013	около 2400
4	2014	около 2100
5	2015	около 8500
6	2016	около 8900
7	2017	около 9700
8	2018	около 10900
9	2019	около 17900
10	2020	около 15300
11	2021	около 18800
12	2022	около 14000

Для оценки воздействия АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» на окружающую среду были выбраны следующие контролируемые радиационные параметры:

- активность выбросов радионуклидов в атмосферу;

- общая бета-активность в поверхностном слое почвы;
- плотность загрязнения снега;
- общая бета - активность растительности;
- мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) фотонного (гамма) ионизирующего излучения;
- объемная активность ^{131}I в приземном слое атмосферы.

Значения радиационных параметров взяты из «Отчетов об экологической безопасности АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова, за рассматриваемый период [1].

Основное негативное воздействие АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» на окружающую среду связано с выбросами в атмосферу радионуклидов, в частности изотопа йода – ^{131}I . Данные о выбросах ^{131}I в год приведены на рис. 1.

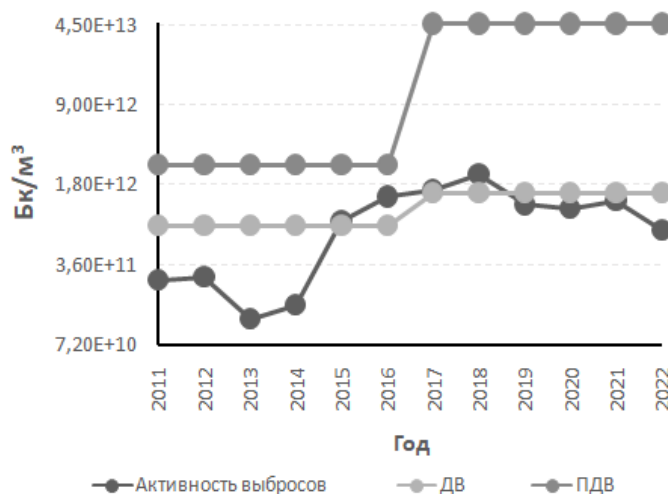


Рис. 1. Данные о выбросах в год

Контролируемые радиационные параметры, характеризующие состояние радиационной обстановки в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», не превышали годовых значений, установленных в нормативных документах.

Радиационные параметры: суммарная бета-активность в поверхностном слое почвы, плотность загрязнения снега, суммарная бета-активность растительности и мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) фотонного (гамма) ионизирующего излучения находятся в пределах фоновых значений для региона, в котором находится АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова».

Активность выбросов радионуклидов в атмосферу превысили допустимые выбросы, установленные для предприятия с 2015 по 2018 годы, что связано с увеличением производства на предприятии, в то же время ниже основного установленного норматива - предельно допустимого выброса.

Максимальные значения объемной активности ^{131}I в приземном слое атмосферы также были достигнуты с 2015 г. по 2018 г., и эти пиковые значения для санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения составили $4,9 \cdot 10^{-1}$ Бк/м³

и $3,1 \cdot 10^{-1}$ Бк/м³, что примерно в 15 раз ниже допустимой объемной активности ¹³¹I в приземном слое атмосферы для населения – 7,3 Бк/м³.

В результате выполненных мероприятий по снижению выбросов в атмосферу, после 2018 г. произошло значительное снижение значений радиационных параметров (активности выбросов радионуклидов в атмосферу и объемной активности ¹³¹I в приземном слое атмосферы).

1. Отчет по экологической безопасности АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», Обнинск.

УДК 621.4

Стрижак П.А., Шлегель Н.Е.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОГИДРАТОВ ИЗ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ВОЗГОРАНИЙ

Газовые гидраты могут использоваться в областях нефтяной промышленности и энергетики. Выбросы от сжигания традиционного топлива (особенно нефтепродуктов и угля) представляют угрозу для окружающей среды, загрязняя воздух [1–3], тем самым нанося вред климату, людям, животным и растениям [4,5]. Такие проблемы стимулировали поиск в природе и синтез в индустрии новых видов топлива [6,7]. Газовые гидраты обладают значительным потенциалом для использования в энергетической отрасли [8–10]. При совместном сжигании газогидратов с традиционными видами топлив образуются меньшие антропогенные выбросы (особенно при активном вовлечении отходов углеобогащения и нефтепереработки).

При возможном применении газогидратов в энергетической промышленности или же для повышения пожаровзрывобезопасности объектов целесообразно снижать временные характеристики синтеза гидрата метана и двуокиси углерода. Снижение таких характеристик позволит минимизировать затраты на собственные нужды, а также использовать природный газ с месторождения. Целью настоящего исследования являлось определение условий эффективного синтеза газогидратов метана и двуокиси углерода при интенсивном механическом перемешивании.

В настоящей работе разработана схема использования газогидратов для выработки тепловой энергии и формирования огнетушащего состава для локализации и ликвидации возгораний. Реактор производства газогидратов целесообразно располагать на скважине месторождения природного газа. Вместе с водой из подземных источников природный газ попадает в реактор, происходит их механическое перемешивание, образуется газогидрат. Так как

зачастую тепловые станции расположены достаточно далеко от месторождения газа (40-260 km), то существует необходимость его транспортировки. Произведенный в реакторе гидрат может быть перевезен при соблюдении стабильного равновесного состояния газа. При доставке на станцию емкости с гидратом, ее необходимо подключить к магистрали котла. Вследствие того, что емкость находится под давлением (около 24.3 bar), происходит произвольная инжекция газа в котел. При этом, в ходе диссоциации гидрата вода очищается. Она может использоваться для собственных нужд тепловой станции, а также для нужд в потреблении пресной воды персоналом. После сжигания топлива образуются дымовые газы, которые приводят к парниковому эффекту. Для их утилизации можно использовать реактор гидратообразования и изготавливать гидрат, например, двуокиси углерода. После изготовления такого гидрата его можно в течение длительного периода времени хранить в условиях равновесного состояния двуокиси углерода. При возгорании на промышленном предприятии или пожара в лесном массиве такой гидрат можно использовать для ликвидации пожаров.

На основе полученных результатов экспериментальных исследований разработана концептуальная схема применения газогидратов метана и двуокиси углерода в нефтегазовой и энергетической промышленности, а также для локализации и ликвидации возгораний на таких предприятиях и в лесной полосе. Установлено, что использование такой схемы может позволить сэкономить около миллиарда долларов, а также получить побочные продукт в виде очищенной от примесей воды. При изготовлении газогидратов из дымовых газов, полученных при выработке тепловой и электрической энергии, существует возможность снизить антропогенные выбросы и количество парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу.

Библиографический список

1. Shakya S.R. et al. Estimation of air pollutant emissions from captive diesel generators and its mitigation potential through microgrid and solar energy // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 3251–3262.
2. Wang Y. et al. Life cycle assessment of combustion-based electricity generation technologies integrated with carbon capture and storage: A review // *Environ. Res.* 2022. Vol. 207. P. 112219.
3. Kumar Kadian A. et al. Performance enhancement and emissions mitigation of DI-CI engine fuelled with ternary blends of jatropha biodiesel-diesel-heptanol // *Mater. Sci. Energy Technol.* 2022. Vol. 5. P. 145–154.
4. Ibrahim M.F. et al. Children's exposure to air pollution in a natural gas industrial area and their risk of hospital admission for respiratory diseases // *Environ. Res.* 2022. Vol. 210. P. 112966.
5. Hojjati-Najafabadi A. et al. Magnetic-MXene-based nanocomposites for water and wastewater treatment: A review // *J. Water Process Eng.* 2022. Vol. 47. P.

102696.

6. Gajanayake S.M. et al. Natural gas hydrates – Insights into a paradigm-shifting energy resource // *Energy Rev.* 2023. Vol. 2, № 1. P. 100013.

7. Yang J. et al. Flue gas injection into gas hydrate reservoirs for methane recovery and carbon dioxide sequestration // *Energy Convers. Manag.* 2017. Vol. 136. P. 431–438.

8. Antonov D. V et al. Dissociation and combustion of mixed methane-ethane hydrate // *Fuel.* 2022. Vol. 325. P. 124771.

9. Gaidukova O.S. et al. Co-combustion of methane hydrate and conventional fuels // *Fuel.* 2023. Vol. 344. P. 128046.

10. Antonov D. V et al. Dissociation characteristics and anthropogenic emissions from the combustion of double gas hydrates // *Environ. Res.* 2022. Vol. 214. P. 113990.

Исследование выполнено при поддержке программы Национального исследовательского Томского политехнического университета (проект № Приоритет-2030-НИИ/ЭБ-006-375-2023).

СЕКЦИЯ 10. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ

УДК 532,533,536

Данилова-Третьяк С.М.

Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск

АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ ИНСТИТУТА ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМ. А.В. ЛЫКОВА НАН БЕЛАРУСИ В ОБЛАСТИ ТЕПЛОФИЗИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

В Беларуси активно развиваются научные направления, отвечающие мировым тенденциям развития науки, такие как проблемы горения и взрыва, химическая физика, физика неравновесных и быстропротекающих процессов, механика жидкостей, газов и плазмы, аэрокосмические исследования, тепло- и массоперенос в многофазных системах и средах, плазмотермическая переработка отходов, возобновляемые источники энергии, синтез новых материалов, мембранные технологии, новые методы диагностики тепловых и гидродинамических явлений. К решению любой задачи применяется комплексный подход, подразумевающий создание адекватных физико-математических моделей рассматриваемого процесса или явления, проведение базовых экспериментальных исследований и измерений в условиях, максимально приближенных к реальным, разработку технологий или оборудования, реализующего технологический процесс.

Классическим направлением исследований, проводимых в Институте, является многофазный теплообмен. Глубокие фундаментальные и экспериментально подтвержденные результаты получены при изучении процессов переноса и фазовых переходов в средах со стохастической структурой, фазовых превращений при течениях в микроканалах, физико-химических процессов при синтезе наноматериалов, физико-химических явлений и охлаждения в распылах микрокапель, процессов сушки и др.

Благодаря этим результатам Институт занял передовые позиции в разработке и создании систем охлаждения различных устройств, от скафандров космонавтов до миниатюрных тепловых труб для отвода тепла от элементов микросистемной техники. Разработаны тонкие (толщиной от 1 до 3 мм) и ультратонкие (толщиной от 400 микрон до 1 мм) паровые камеры для систем охлаждения теплонагруженных труднодоступных электронных компонентов и устройств, в том числе мобильных телефонов и планшетов.

Развивается принципиально новое для Института направление – создание высокотемпературных изделий из керамических композитов на основе карбида кремния. Разработана технология получения композитного материала, который

по механическим, массогабаритным и теплофизическим характеристикам сопоставим с материалами-аналогами. Вариант использования технологии – изготовление тиглей (пеналов) для долговременного хранения радиоактивных отходов. Планируется развитие технологий получения и изучение свойств различных тугоплавких керамических материалов специального назначения с уникальными характеристиками, а также совершенствование экспериментальной базы для синтеза мелкодисперсных порошков тугоплавких соединений и их применения в высокотехнологичных производствах, в том числе на основе аддитивных технологий.

Химическая физика, физика горения и взрыва – еще одно традиционное направление исследований Института. В первую очередь, это задачи горения и детонации в сверхзвуковых потоках, горения в гетерогенных системах, твердо-топливного горения, экологически чистого горения, разработка новых видов двигателей. Для исследования кинетики воспламенения и горения газов и жидких топлив при высоких температурах и давлениях в Институте создана мощная экспериментальная база, включающая комплекс ударных и детонационных труб, установку быстрого сжатия, диагностические методы. Изучены практически все значимые топливные составы, начиная от водорода, и заканчивая авиационным керосином и дизельным топливом, определены их кинетические характеристики и параметрические режимы горения.

Значимые результаты в области плазменных технологий позволили предложить новые экологически чистые эффективные способы переработки отходов органического и минерального происхождения. Разработаны принципы получения высокоэнергетических компрессионных плазменных потоков в квазистационарных плазменных ускорителях, работающих в режиме ионного токопереноса, что имеет значение для исследования задач управляемого термоядерного синтеза и поверхностной металлургии.

Ведутся исследования в области теплоэнергетики (создана технология двухстадийного сжигания твердых биотоплив в кипящем слое, развиваются эффективные термические методы утилизации органополимерных и сельскохозяйственных отходов), атомной энергетики (реализуется комплекс работ по созданию инструмента для прогнозирования аварийных ситуаций с точки зрения оценки уровня взрывобезопасности пароводородовоздушных смесей, а также теплогидравлических параметров ВВЭР), водородной энергетики (созданы реактор каталитического гидролиза борогидрида натрия для генерации водорода производительностью 3-6 м³/ч, реактор частичного каталитического окисления природного газа для получения водорода производительностью 10 м³/ч, мобильный источник водорода).

Кроме научных исследований и разработок в области энергетических систем, процессов и технологий важным элементом функционирования Института является подготовка высококвалифицированных кадров в области теплофизики, химической физики, физики горения и взрыва, экстремальных состо-

яний вещества, физики плазмы, механики жидкостей, газов и плазмы, тепло-энергетики.

УДК 004.04

Куприянов В.М., Белоусов П.А., Разинькова Т.Н.
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОГО ОПИСАНИЯ ЯДЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ

Обсуждаются существующие современные подходы к формализованному представлению и фиксации в информационно-вычислительной среде, наборов данных о ядерно-физических и теплофизических свойствах конструкционных материалов для АЭС. Рассмотрены требования как к обеспечению реальных технологических расчетов, так и использованию в учебных процедурах при подготовке специалистов. Обсуждаются особенности процедурного, дата-ориентированного и онтологического подходов при описании знаний о взаимосвязях данных различной природы.

Целью предлагаемого подхода является удовлетворение требований цифровизации при описании и использовании ядерно-технологических данных о свойствах конструкционных веществ и материалов путем построения комплексного структурированного объекта.

Объект должен содержать согласованные между собой описания понятий, входящих в объект, унифицированные определения своих элементов, числовые значения характеристик и, если необходимо, используемые формулы, а также библиографические описания источников информации входящей в объект. В качестве инструментального средства для описания объекта предлагается использовать стандарт языка JSON и соответствующие языковые средства, полностью поддерживающие межмашинный (m2m) обмен данными.

Предложено для обсуждения новое понятие – «элементарный объект знания» в качестве средства ограничения степени детализации представления технологических знаний в обеспечение сбалансированности требований к достоверности знаний в системах хранения технологических данных и облегчения восприятия понятий моделирования данных в учебном процессе.

Возможная структура и состав такого объекта представлена на рис.1.

Особенностью формирования объекта знаний является прежде всего устранение известной всем двусмысленности (дуальности) значения любого понятия в представлении технических знаний, связанной с тем, что каждый термин в языке обозначает и понятие, и значение этого понятия. Например, «теплоемкость свинца» имеет смысловое значение <...связь между приращени-

ем температуры и количеством запасенной энергии...», и некоторое численное значение, $\langle \sim 130 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \rangle$.



Рис. 1. Шаблон возможного элементарного объекта знаний

Основной сложностью разработки шаблона структуры элементарного объекта знаний оказалась унификация узлов таксономии для любого объекта знания в заданной предметной области.

Общесистемный подход обсуждался ранее [1], инструментальные аспекты описания обсуждались в [2].

Библиографический список

1. О.Л. Голицына, В.М. Куприянов, Н.В. Максимов, Информационные и технологические решения в задачах управления знаниями, В Сб. Научно-техническая информация, ВИНТИ РАН, Москва, 2015, Сер 1, №8, стр.1,
2. А.О. Еркимбаев, А. Б. Жижченко, В.Ю. Зицерман, Г.А. Кобзев, Э.Е. Сон, А.Н. Сотников, Интеграция баз данных по свойствам вещества.
3. Подходы и технологии. Научно-техническая информация, ВИНТИ РАН, Москва, 2015, Сер 2, №8, стр.1.

ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ОТ ИССЛЕДОВАНИЙ К ВНЕДРЕНИЮ – 2023

УДК 621.039

Киндра В.О., Максимов И.А., Брызгунов П.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТОИМОСТИ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛЫХ МОЩНОСТИ

В мире существует устойчивый тренд на увеличение доли распределенной генерации. Объемы ввода автономных источников энергии непрерывно растут, причем в будущем прогнозируется увеличение темпов роста. В свою очередь, требования к эффективности и экологической безопасности новых энергоустановок также постоянно повышаются. В этой связи одним из перспективных направлений развития распределенной энергетики является переход к атомным станциям малой мощности (АСММ) [1]. Наряду с ветряными и солнечными электростанциями работа АСММ не сопровождается образованием выбросов токсичных веществ и парниковых газов в атмосферу. Кроме того, АСММ потребляют гораздо меньший объем и массу топлива по сравнению с традиционными установками малой мощности, работающими на органических топливах.

Для широкого применения АСММ в распределённой электрогенерации себестоимость отпуска электроэнергии на базе энергоблоков должна быть конкурентоспособна при сопоставлении с традиционными видами источников энергии.

В настоящей работе был проведён анализ и сравнение нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) различных источников электроснабжения, включая традиционные энергоустановки на ископаемом топливе и перспективные атомные станции малой мощности. На рис. 1 приведён график зависимости LCOE от стоимости топлива, из которого видно, что цена на энергоносители (включая стоимость поставки топлива) является одним из ключевых факторов, определяющих экономическую эффективность традиционных энергоблоков. В свою очередь, АСММ, работающие на базе малых модульных реакторов КЛТ-40С, РИТМ-200 и СВБР-100, характеризуются низкой периодичностью замены

топлива и могут автономно работать продолжительное время. При ценах на топливо от 30 USD/МВт·ч возведение АСММ с реакторами СВБР-100 может быть выгоднее с экономической точки зрения, чем паротурбинной ТЭС, при 40 USD/МВт·ч – чем газотурбинной, а 45 USD/МВт·ч – газопоршневой. Для АСММ с реакторами РИТМ-200, характеризующихся более высоким потолком себестоимости электроэнергии, уровень цен на энергоносители, при котором появляется возможность конкурирования с традиционными энергоблоками, составляет 45, 60 и 70 USD/МВт·ч для ПТУ, ГТУ и ГПУ соответственно.

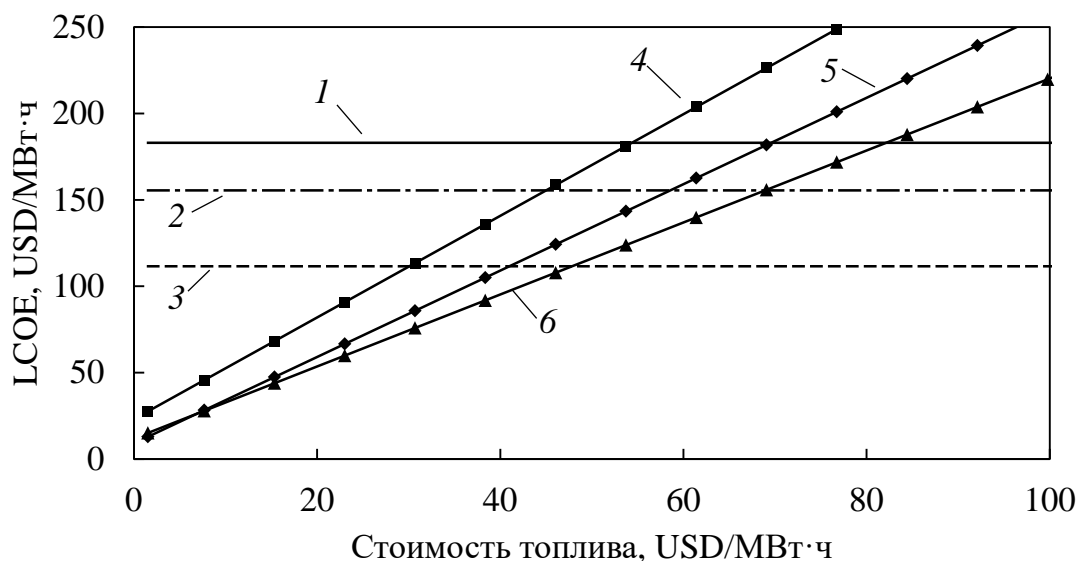


Рис. 1. График зависимости нормированной стоимости электроэнергии от стоимости топлива: 1 – КЛТ-40С; 2 – РИТМ-200; 3 – СВБР-100; 4 – ПТУ К-100; 5 – ГТУ SGT-800; 6 – ГПУ J902

Таким образом, экономический эффект от применения АСММ будет во многом определяться стоимостью отпуска электроэнергии в удалённых регионах, где не развита энергетическая инфраструктура и отсутствуют газотранспортные системы.

1. Rogalev N., Rogalev A., Kindra V., Zlyvko O., Osipov S. An Overview of Small Nuclear Power Plants for Clean Energy Production: Comparative Analysis of Distributed Generation Technologies and Future Perspectives: 13 // Energies. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. — 2023. — Т. 16. — № 13. — с. 4899.

Исследование выполнено в Национальном исследовательском университете МЭИ за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10235, <https://rscf.ru/project/23-79-10235/>

УДК 537.85

Бондаренко А.А.^{1,2}, Колесниченко И.В.^{1,2}

Институт механики сплошных сред УрО РАН¹

Пермский национальный исследовательский политехнический университет²

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА УРОВНЯ

В атомных реакторах на быстрых нейтронах теплоносителем является жидкий металл — натрий, свинец или сплавы на их основе. Важной задачей как на исследовательских и испытательных стендах, так и на реакторах является бесконтактный контроль уровня жидкого металла в хранилище. Существующие технологии основаны на погружаемых внутрь металла датчиках уровня. Одним из вариантов является использование внешних датчиков, принцип работы которых опирается на явление электромагнитной индукции. Конфигурации лабораторных образцов датчика приведены в работах [1, С. 2] [2, С. 2-3] [3, С. 64-65], его математическое моделирование описывается в работе [1, С. 3-6], а в работе [4, С. 43-45] внимание уделяется сравнению показаний датчика с данными, полученными ультразвуковым доплеровским анемометром. Методика расчета, описанная в работе [1, С. 5-6], основана на анализе мнимой части индукции магнитного поля и имеет некоторые особенности. В данной работе для оценки работоспособности и точности датчика применяется более совершенная методика, максимально приближенная к той, что применяется в эксперименте.

Описанный в рассмотренных работах датчик уровня – это три коаксиально расположенных катушки, намотанные на непроводящий каркас. Находящаяся в центре катушка играет роль генерирующей, она подключена к источнику переменного тока, а крайние являются измерительными. Выходной сигнал определяется как разность среднеквадратичных отклонений значений напряжения на измерительных катушках.

Если в области датчика отсутствуют электропроводящие тела, то значения напряжения на измерительных катушках будут одинаковыми, значит выходной сигнал равен нулю. При попадании в рабочую область электропроводной материи, показания датчика изменяются, так как вихревые токи в среде создают

вторичное магнитное поле. Его направление противоположно в отношении первичного поля генерирующей катушки, поэтому показания на том измерительном соленоиде, что наиболее удален от среды, станут больше, чем на том, что расположен ближе.

В данном исследовании численное моделирование проводилось методом конечных элементов в пакете Ansys Mechanical (модуль Emag). Для написания программы использован язык программирования APDL. Общие геометрические размеры рассматриваемой модели датчика равны $70 \times 40 \times 60 \text{ мм}^3$. Роль электропроводящей среды играет половина дюралюминиевого цилиндра радиусом 86 мм и высотой 200 мм.

Проведены три серии расчетов с целью верификации модели на данных, полученных ранее экспериментально. Сначала определялась чувствительность выходного сигнала устройства от расстояния до цилиндра при различных частотах переменного тока. Полученная зависимость экспоненциально убывает и на качественном уровне согласуется с экспериментом. Подтверждено, что для обеспечения лучшей точности измерений датчик следует располагать как можно ближе к электропроводящему объему.

Вторая часть расчетов проводилась с целью исследования зависимости выходного сигнала при изменении положения датчика по вертикали относительно границы электропроводящего цилиндра для некоторого диапазона частот переменного тока. Перемещение тела по вертикали имитирует изменение уровня металла в хранилище. Если заранее знать максимальные и минимальные отклики для известного объема среды, то положение границы электропроводящей среды определяется по нормированной зависимости.

В третьей серии были определены зависимости отклика устройства от электропроводности материала цилиндра, которая соответствовала значению данной величины для таких материалов, как дюралюминий, медь и сталь.

Можно сделать вывод, что результаты вычислений согласуются с экспериментальными данными. Модель и датчик можно использовать для совершенствования методики контроля уровня электропроводящей среды в хранилище.

Библиографический список

1. Eltishchev V., Mandrykin S., Kolesnichenko I. Induction level sensor: experiment and calculation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. V. 950. P. 012014.
2. V Eltishchev et al. Inductive methods of detection the boundary of electrically conductive media in experiment // 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 581 012004

3. Лосев Г. Л., Ельтищев В. А. Электромагнитные измерения уровня и проводимости цветных металлов // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 4. С. 63–68.

4. Eltishchev V., Losev G., Kolesnichenko I. Oscillations of free surface of rotating liquid metal in cylindrical cell // Magnetohydrodynamics, 2021. V. 57. P. 41-50.

УДК 621.039

Мелькова А.С., Пильковская М.Р.

Белорусский национальный технический университет

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

Атомная энергетика – одна из важных отраслей энергетики, которой принадлежат более 17 % производства мировой электроэнергии. Вопрос о обеспечении безопасности АЭС существовал с самого момента ее создания.

Сейчас АЭС являются одними из самых безопасных и надежных объектов в мире, но в истории атомной энергетики известны несчастные случаи, отрицательно повлиявшие на людей и окружающую среду. Опыт аварий на АЭС «Фукусима-дайити» и на Чернобыльской АЭС оказал значительное влияние на современные системы безопасности атомной энергетики.

Сегодня для получения лицензии на строительство новых электростанций требуется, чтобы последствия любой аварии с расплавлением активной зоны ограничивались самой станцией без необходимости эвакуации близлежащих жителей.

Операторы атомной станции регулярно контролируют радиацию окружающей среды вокруг своего объекта и радиоактивность в пробах окружающей среды, измеряют дозу радиации в воздухе с помощью систем радиационного контроля, чтобы подтвердить отсутствие вредного воздействия на окружающую среду.

Меры безопасности включают в себя ряд физических барьеров между активной зоной радиоактивного реактора и окружающей средой, а также наличие нескольких систем безопасности, каждая из которых имеет резервную копию и предназначена для предотвращения человеческих ошибок. Новые конструкции реакторов обладают активными и пассивными системами безопасности, способными противостоять даже самым серьезным стихийным бедствиям [1]. Пассивная безопасность не требует активного контроля или оперативного вмешательства в случае аварии. В отсутствие электроэнергии они полагаются на естественную конвекцию, гравитацию или устойчивость к высоким температурам, чтобы обеспечить бесперебойную работу.

В дополнение к инженерным разработкам и процедурам, которые снижают риск и тяжесть аварий, на всех станциях имеются руководства по управлению или смягчению последствий тяжелых аварий (SAM). Это особенно проявилось после аварии на Фукусиме, когда персонал столкнулся с огромными проблемами из-за отсутствия электроэнергии и отключенных систем охлаждения из-за повреждений, нанесенных цунами. Атомные электростанции оснащены датчиками, которые автоматически отключают их в случае землетрясения, и это жизненно важно во многих частях мира.

Одной из ключевых технологий, которые помогли сделать атомные электростанции более безопасными, является искусственный интеллект (ИИ). Еще до строительства электростанции модели искусственного интеллекта можно использовать для моделирования поведения ядерных реакторов и использовать собранные данные для улучшения безопасности реактора, а также его конструкции, производительности и загрузки топлива.

На действующей атомной электростанции ИИ может — с помощью комбинации машинного обучения и физических моделей, собирающих данные с датчиков, — предсказывать возможные аварии и предупреждать персонал о неисправностях оборудования, которые могут их вызвать. С помощью машинного обучения ученые могут анализировать значительные объемы вычислительных данных для более эффективного моделирования поведения реактора [2].

Так же развитие получили виртуальные АЭС, которые могут быть подключены к системе управления атомной электростанцией для моделирования аварий и предупреждения о них, для проверки эффективности плана действий работников в экстренных условиях, а также для обучения персонала. Атомные станции хорошо защищены от киберугроз и представляют собой островки управления, отключенные от Интернета.

Робототехника на АЭС используется в проведении исследований и разработке плана действия в случае аварийных или чрезвычайных ситуаций, а так же для работы на Чернобыльской и «Фукусиме-1» АЭС во время снятия их с эксплуатации. Это помогает преодолеть последствия аварии, не заражая при этом персонал радиацией.

Одной из причин аварии на Чернобыльской АЭС являются конструктивные недостатки реактора типа РБМК, одной из особенностей конструкции которого было то, что отказ теплоносителя мог привести к сильному увеличению выходной мощности в процессе деления. Авария разрушила реактор, а его горящее содержимое разнесло радионуклиды повсюду. Современные станции спроектированы с учетом внутренней безопасности, дополненной

надежными вторичными мерами безопасности. К таким станциям относится и БелАЭС: на ней установлены последние системы безопасности.

Ни одна отрасль не застрахована от несчастных случаев, но все отрасли учатся на них, атомная энергетика тому подтверждение.

Библиографический список

1. Безопасность российских АЭС [Электронный ресурс] \ безопасность российских АЭС. – Режим доступа: <https://rosatom.ru/about-nuclear-industry/safety-russian-npp/> /. Дата доступа: 09.09.2023.

2. Какими будут АЭС будущего [Электронный ресурс] \ какими будут АЭС будущего. – Режим доступа: <https://atomicexpert.com/>. Дата доступа: 09.09.2023.

УДК 004.05+006

Пильковская М. Р., Мелькова А. С.

Белорусский национальный технический университет

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ АЭС

Атомная энергетика претерпевает значительные преобразования, поскольку она внедряет цифровизацию для повышения своей операционной эффективности, безопасности и соответствия нормативным требованиям. Одной из наиболее перспективных технологий в этой цифровой революции является концепция цифровых двойников, которые представляют собой виртуальные копии физических активов, процессов или систем. Эти цифровые модели могут использоваться для моделирования, анализа и оптимизации различных аспектов работы атомной электростанции, тем самым улучшая ее общую производительность и снижая риск аварий или отказов. В этом контексте растущая роль цифровых двойников в соблюдении нормативных требований и надзоре за атомными электростанциями является событием, заслуживающим пристального внимания.

В последние годы технологии цифровых двойников применялись в атомной промышленности как в текущем парке легководных реакторов, так и для проектирования перспективных реакторов.

Министерство энергетики США объявило о выделении 27 млн. долл. федерального финансирования на девять проектов по разработке технологий "цифрового двойника" для новых перспективных конструкций реакторов,

включая Kairos, Xe-100 и BWRX-300, и достижению десятикратного снижения затрат на их эксплуатацию и обслуживание.

Два проекта будут поддержаны Kairos Power, разработчиком высокотемпературного реактора с охлаждением из фтористой соли. Аргоннская национальная лаборатория получит 2,2 миллиона долларов на сокращение затрат на эксплуатацию реактора за счет усовершенствованного зондирования и автоматизации.

Тем временем Мичиганский университет получит 5,2 миллиона долларов на разработку масштабируемого цифрового двойника, который сначала будет проверен на контуре расплавленной соли, работающем в кампусе, а затем применен к конструкции реактора Kairos, чтобы продемонстрировать, как технология может быть использована для оптимизации установки [1].

Некоторыми потенциальными областями применения цифровых двойников в атомной промышленности являются проектирование и лицензирование, строительство установок, учебные тренажеры, прогнозные операции и техническое обслуживание, автономная эксплуатация и контроль, прогнозирование отказов и деградации, получение информации из исторических данных станции, а также анализ безопасности и надежности. Текущие усилия в атомной отрасли сосредоточены на конкретных вспомогательных технологиях, необходимых для внедрения цифровых двойников, таких как усовершенствованные датчики, цифровые вычисления и инфраструктура связи.

Будущие исследования потенциальных применений двойных двойников могут включать машинное обучение и искусственный интеллект. Цифровые двойники могут поддерживать текущее стремление по продлению срока службы существующих атомных электростанций. По мере старения этих станций они могут сталкиваться с повышенными рисками деградации компонентов и отказов, что может создавать значительные проблемы для их дальнейшей безопасной и надежной эксплуатации. Цифровые двойники могут помочь операторам и регулирующим органам отслеживать состояние устаревающих компонентов и систем, позволяя им принимать своевременные и целенаправленные меры для устранения потенциальных проблем и обеспечения долгосрочной жизнеспособности станций [2].

Растущая роль цифровых двойников в надзоре за атомными электростанциями представляет собой значительную возможность для отрасли повысить свою безопасность, надежность и эффективность. Используя возможности цифровизации, операторы и регулирующие органы могут совместно решать сложные задачи, стоящие перед сектором атомной энергетики, и обеспечивать его постоянный вклад в устойчивое и безопасное энергетическое будущее. По мере того, как технология продолжает развиваться и ее внедрение становится все более распространенным, цифровые двойники готовы играть все более

важную роль в формировании будущего управления атомными электростанциями и соблюдения нормативных требований.

Библиографический список

1. Усовершенствованные проекты ядерных реакторов для получения цифровых двойников [Электронный ресурс] \ Усовершенствованные проекты ядерных реакторов для получения цифровых двойников. – Режим доступа: <https://leg.co.ua/stati/usovershenstvovannye-proekty-yadernyh-reaktorov-dlya-polucheniya-cifrovyyh-dvoynikov.html>. Дата доступа: 09.09.2023.

2. Цифровые двойники для атомных электростанций и сооружений [Электронный ресурс] \ Цифровые двойники для атомных электростанций и сооружений. – Режим доступа: <https://link.springer.com/>. Дата доступа: 08.09.2023.

УДК 004.04

Куприянов В.М.¹, Белоусов П.А.¹, Разинькова Т.Н.¹

¹ Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ

ОБ УНИФИКАЦИИ ОБМЕННОГО ФОРМАТА ОПИСАНИЯ И ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ О СВОЙСТВАХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Расширение потребностей в использовании современных средств обработки и анализа данных (Data Science) о свойствах конструкционных материалов требует создания и использования соответствующих средств, содержательно наполняющих понятие «цифровизация». Прежде всего, к таким средствам относятся механизмы обеспечения межмашинного обмена данными (режим m2m), в том числе - унифицированные форматы.

В области ядерных данных это давно частично решается использованием таких стандартов как EXFOR [1], ENDF/B [2], но в области данных о свойствах конструкционных веществ и материалов (СВиМ) эти задачи только начинают осознаваться и решаться [3,4].

Необходимо выделить несколько главных задач, которые должны быть решены при реализации обменного формата данными.

Замещение представления данных, для «читающего оператора», например, представление таблиц в формате PDF, или WORD MS, которые хотя и предназначены для межмашинного обмена, не позволяют без дополнительной обработки воспринимать числовые данные.

Разработка и унификация средств, передающих содержательную информацию в виде графических особенностей строки текста, например, m^2 , сек^{-1} , $314 \cdot 10^{-2}$, 30% и т.п. Хотя такая информация может быть обработана соответствующей программой, это всякий раз потребует детального посимвольного разбора строки (парсинга), что совершенно неприемлемо во многих вычислительных задачах.

Объединение средств, передающих «понятия», определяющие физическую величину (например, «теплоёмкость», её спецификацию (размерность) «Дж/(кг·К)» и её численное значение в унифицированной форме представления.

Вся информация, относящаяся к конкретной задаче, должна иметь возможность размещения её в одном компьютерном файле.

В достаточно общем подходе соответствующее средство было создано как язык описания данных MatML и в настоящее время используется в ряде областей применения.

Возможности использования унифицированного средства для обмена данными в модели m2m для решения задач в среде Росатома в настоящее время обсуждаются специалистами в ходе работы Комиссии по аттестации стандартных справочных данных о физических константах и метрологии в области использования атомной энергии [5].

В настоящее время объектами обсуждения являются две основные темы.

Унификация понятийной стороны описания данных о СВиМ с учётом п. 2 и 3 настоящего текста.

Предметом обсуждения также является место и роль использования русскоязычных терминов совместно с их англоязычными аналогами, что необходимо для использования зарубежных источников данных в рамках отечественного обменного формата. В настоящее время модель СВиМ содержит 38 понятий, определяющих конкретный материал. Предполагается, что описание может допускать наличие неопределённых в настоящий момент значений.

При практической реализации в рамках расчётных задач, полномасштабное использование MatML избыточно и вычислительно неэффективно, поэтому, для реальных обменных файлов предлагается использовать отображение свойств объекта с помощью языка обменного формата JSON. Язык хорошо и широко известен. Конвертеры для его практического использования существуют как открытые библиотеки для всех используемых языков программирования. В языке Python имеется очень близкая по синтаксису собственная структура данных «Словарь» (Dictionary), что позволяет естественным образом отобразить модель MatML на реальный обменный формат.

В докладе обсуждается состояние работ и перспективы реализации формата, а также возможности вовлечения студентов старших курсов магистров и аспирантов к созданию данных о СВМ в обменном формате.

Библиографический список

1. IAEA-NDS-Documentation Series [Электронный ресурс]: Apr 2000; 126 p; BNL-NCS--63330(REV.APR2000); Also available on-line: <http://www-nds.iaea.org>
2. AEA-NDS-Documentation Series [Электронный ресурс]: Sep 1986; 586 p; Figs, tabs.
3. А.О. Еркимбаев, А. Б. Жижченко, В.Ю. Зицерман, Г.А. Кобзев, Э.Е. Сон, А.Н. Сотников, Интеграция баз данных по свойствам вещества. Подходы и технологии. Научно-техническая информация, ВИНТИ РАН, Москва, 2015, Сер 2, №8, стр.1.
4. Н. Н. Over, E. Wolfart, The Web-enabled ODIN Portal Useful Databases for the European Nuclear Society, International Conference Nuclear Energy for New Europe 2005 Bled, Slovenia, September 5-8, 2005
5. КАССД. Распоряжение ГК Росатом от 16.12.2020 № 1/8/814-р

УДК 536.7

Титов С.А.¹, Барбин Н.М.¹, Терентьев Д.И.¹

Уральский институт Государственной противопожарной службы
МЧС России¹

ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМАХ «РАДИОАКТИВНЫЙ ГРАФИТ O₂+ N₂» С УВЕЛИЧЕНИЕМ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА

Реактор большой мощности канальный (РБМК) серия энергетических ядерных реакторов, разработанных в Советском Союзе 1950-60-х годах. Реактор РБМК канальный, гетерогенный, графито-водный, кипящего типа, на тепловых нейтронах. Данные реакторы были использованы в нескольких атомных электростанциях, включая Чернобыльскую АЭС. РБМК имели определенные проблемы безопасности, что стало фактором в аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году. Реакторы РБМК постепенно выводятся из эксплуатации и заменяются на более современные и безопасные реакторы [1].

Анализ исследования был выполнен с помощью программы TERRA, обработка результатов производилась в программе Microsoft Excel [2].

В работе были определены термодинамические параметры из 7 обработанных систем с различным содержанием кислорода, данные которых представле-

ны в табл. 1. В интервале температур от 300 К до 3600 К с шагом 100 К, при давлении 0,1 МПа.

Таблица 1

Результаты обработанных данных

№ системы	Содержание кислорода в системе	Реакция	ΔT , К	ΔS , Дж/(кг·К).	ΔH , Дж/кг
1	6,816125001	$2\text{UOCl}_{2(\text{к.})} = \text{UCl}_4 + \text{UO}_{2(\text{к.})}$	700-900	271,717	213035,1
2	11,98770113		700-1000	254,631	202065,9
3	19,16561551		700-1000	208,198	173005,8
4	20,70793039		700-1000	186,253	161417,8
5	22,33272433		700-1000	175,478	158417,8
6	23,75761551		800-1000	174,996	158313,9
7	25,19614651		800-1000	174,996	158217,5

Изменение энтропии в системах представлено на рис. 1. Изменение энтальпии показано на рис. 2.

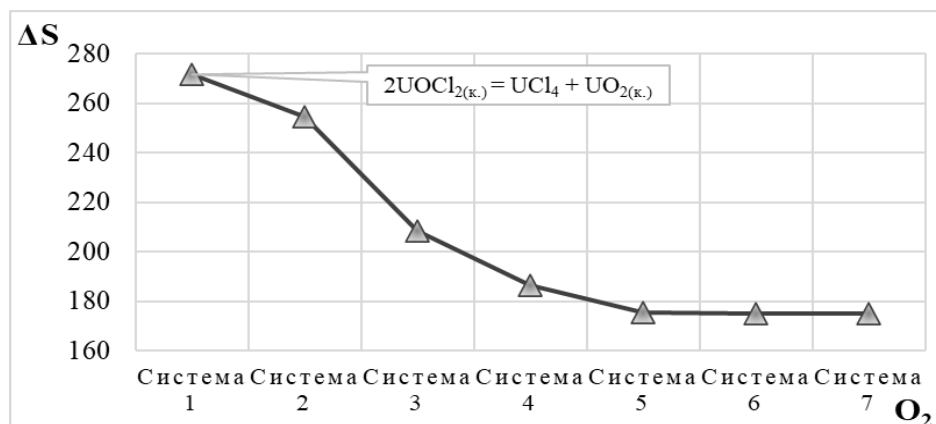


Рис. 1. Энтропия систем

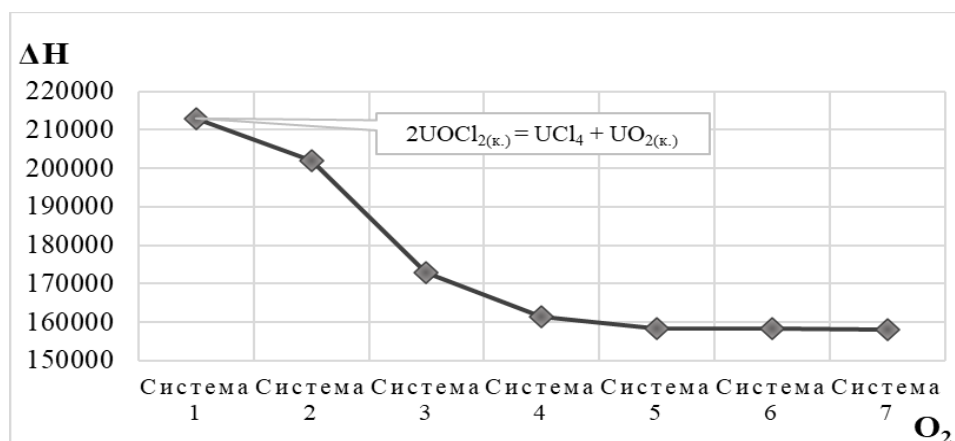


Рис. 2. Энтальпия систем

С увеличением в системах количества кислорода для реакции $2\text{UOCl}_{2(\text{к.})} = \text{UCl}_4 + \text{UO}_{2(\text{к.})}$ наблюдается снижение энтропии и энтальпии [3-4].

Библиографический список

1. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»: официальный сайт. Электронный ресурс: <http://www.rosatom.ru/> (дата доступа 02.09.2023).
2. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусков Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Металлургия, 1994. – 352 с.
3. Барбин Н. М., Кобелев А. М., Титов С. А., Терентьев Д. И. Термодинамический анализ состава продуктов горения радиоактивного графита в водяном паре или воздухе // Физика горения и взрыва. – 2022. – Т. 58. – № 4. – С. 24-31. – DOI 10.15372/FGV20220403.
4. Барбин Н. М., Титов С. А., Терентьев Д. И., Кобелев А. М. Термодинамическое моделирование термических процессов с участием радионуклидов урана, плутония, европия при нагреве радиоактивного графита в атмосфере-ре воздуха // Радиохимия. – 2023. – Т. 65, № 3. – С. 269-276. – DOI 10.31857/S0033831123030085.

621.039

**Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доронков Д.В.,
Доронкова Д.С., Добров А.А., Курицин Д.Д.,
Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.**

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ ТВС РЕАКТОРА ТИПА РИТМ

Важной задачей развития Российской Федерации является освоение ресурсов Арктики, значительная концентрация которых обусловила строительство промышленных предприятий в Арктическом регионе. На данный момент ведутся конструкторские работы по созданию АСММ с новейшей РУ РИТМ-200С [1-2]. Проектом РУ предусматривается кассетная активная зона с топливом повышенной ураноёмкости для увеличения энергоэффективности станции. ТВС новой активной зоны имеют ряд отличий от ТВС РУ атомных ледоколов [3].

Важным отличием, помимо изменения геометрии твэльного пучка, конструкции дистанционирующих решеток (ДР) и формы центрального вытеснителя, является форма и геометрия головки ТВС. Указанные факторы и обусловили необходимость дополнительного экспериментального обоснования конструкции головки ТВС.

В докладе приведены результаты экспериментальных исследований и сравнительного анализа гидродинамики теплоносителя в выходном участке ТВС за головками разной конструкции. Исследуемая конструкция ТВС предназначена для активной зоны реактора типа РИТМ атомной станции малой мощности наземного размещения. Цель работы заключается в исследовании распределения осевой скорости и расхода потока теплоносителя на выходе из твэльного пучка, за головками нескольких типов конструкции, перед трубой отбора теплоносителя и в отверстиях верхней опорной плиты, а также в определении областей пучка твэлов, из которых наиболее вероятно попадание потока теплоносителя в трубу отбора к термометру сопротивления [4].

Для достижения цели проведены эксперименты на исследовательском стенде с воздушной рабочей средой на модели выходного участка ТВС, включающей фрагмент выходной части пучка твэлов с дистанционирующими решетками, макеты головок двух типов конструкции, а также макеты верхней опорной плиты и трубы отбора теплоносителя. При изучении течения теплоносителя в выходной части ТВС использовались пневмометрический метод и метод впрыска контрастной примеси [5-7].

Измерения проводились по всему поперечному сечению модели. Гидродинамическая картина течения теплоносителя представлена картограммами распределения осевой скорости, расхода теплоносителя и контрастной примеси в поперечном сечении модели. Результаты исследований использованы при обосновании инженерных решений при проектировании новых активных зон реакторов РИТМ. Опытные данные, полученные в ходе экспериментов, собраны в базу данных и использованы при валидации импортозамещающей CFD программы ЛОГОС и одномерных теплогидравлических кодов, применяемых при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Библиографический список

1. Д.Л. Зверев [и др.] Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние // Атомная энергия, 2020. Т. 129. Вып. 1. С. 29–37.
2. Д.Л. Зверев [и др.] Активные зоны действующих атомных ледоколов // Судостроение, 2020. №1. С. 13–16.

3. В.М. Беляев [и др.] Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития // Атомная энергия, 2020. Т. 129. Вып. 1. С. 37–43.
4. В.В. Петрунин Реакторные установки для атомных станций малой мощности // Вестник Российской академии наук, 2021. Т. 91. Вып. 6. С. 528–540.
5. А.А. Баринов [и др.] К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов // Атомная энергия, 2016. Т. 120. Вып. 5. С. 270–275.
6. А.В. Варенцов [и др.] Экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя на масштабной модели кассетной ТВС реактора КЛТ-40С // Теплоэнергетика, 2016. №8. С41–48.
7. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа. 1973.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

УДК 621.039

**Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доронков Д.В.,
Доронкова Д.С., Добров А.А., Курицин Д.Д.,
Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.**

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

ГИДРОДИНАМИКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В ТВС РЕАКТОРА ТИПА РИТМ АСММ

Важной задачей развития Российской Федерации является освоение ресурсов Арктики, значительная концентрация которых обусловила строительство промышленных предприятий в Арктическом регионе. Для развития этого региона необходим энергоисточник, обладающий автономностью, надёжностью и маневренностью. Уникальный научный, конструкторский и производственный опыт, накопленный в атомной отрасли при создании судовых реакторных установок (РУ) [1] является основой развития приоритетного проекта Госкорпорации «Росатом» – атомных станций малой мощности (АСММ) [2].

На данный момент ведутся конструкторские работы по созданию АСММ с новейшей РУ РИТМ-200С [3], разработанной в АО «ОКБМ Африкантов». Проектом РУ предусматривается кассетная активная зона с топливом повышенной ураноёмкости для увеличения энергоэффективности станции. Конструкция

ТВС новой кассетной активной зоны базируется на опыте создания и эксплуатации топливных сборок РУ новых атомных ледоколов.

Конструктивные особенности ТВС кассетной активной зоны обусловили необходимость экспериментального определения влияния отдельных конструктивных элементов её входного участка, а именно дроссельной шайбы, на структуру поля аксиальной скорости потока теплоносителя на входе в активную часть твэльного пучка [4]. Особенности конструкции входного участка ТВС могут привести к изменению поля аксиальной скорости потока и, как следствие, к изменению условий работы элементной базы активной зоны, что в свою очередь может повлиять на её теплотехническую надежность.

В докладе представлены результаты экспериментального изучения особенностей формирования потока теплоносителя во входном участке ТВС кассетной активной зоны ректора типа РИТМ атомной станции малой мощности. Целью работы является исследование влияния разных элементов конструкции входного участка на перераспределение аксиальной скорости потока теплоносителя. Для достижения цели проведена серия экспериментов на масштабной экспериментальной модели, включающей элементы конструкции входного участка от тарировочной шайбы до узла крепления твэлов к диффузору, а также пролет твэльного пучка между поглощающей решеткой и первой дистанционирующей решеткой. Экспериментальные исследования проводились на аэродинамическом стенде в НГТУ им Р.Е. Алексеева, где моделирование течения рабочей среды осуществлялось воздушным теплоносителем основываясь на теории гидродинамического подобия [5]. Исследования проводились с использованием пневмометрического метода в нескольких характерных сечениях по длине модели. Расположение точек измерения охватывает все поперечное сечение модели. Особенности течения теплоносителя визуализированы картограммами аксиальной скорости потока рабочей среды, а также графиками аксиальной скорости по сечению пучка твэлов. Результаты экспериментального моделирования использованы при оптимизации гидравлического профилирования элементов конструкции входного участка ТВС. Полученная база опытных данных может использоваться для валидации отечественной CFD-программы ЛОГОС, а также для уточнения методик теплогидравлического расчета активных зон в попятном приближении.

Библиографический список

1. Зверев Д.Л. [и др.] Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние // Атомная энергия, 2020. Т. 129. № 1. С. 29-37.

2. Беляев В.М. [и др.] Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития \\\ Атомная энергия. 2020. Т. 129. № 1. С. 37–43.
3. Петрунин В.В. Реакторные установки для атомных станций малой мощности \\\ Вестник российской академии наук. 2021. Т. 91. № 6. С. 528–540.
4. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. Москва: Ленанд, 2020. 352 С.
5. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. Москва: Высшая школа, 1973. 296 С.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

УДК 539.16.04

**Цветкова И.А., Кочеткова Т.М., Воробьева В.А., Семененко А.Н.,
Басов А.А.**

Нижегородский государственный технический университет им.
Р.Е.Алексеева

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ОБЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА. АНАЛИЗ. МИНИМАЛИЗАЦИЯ

Явление радиоактивности было открыто в XIX веке. Тогда же люди, напрямую работающие с радиоактивными материалами, одни из первых столкнулись с влиянием радиации на здоровье человека. Однако после интенсивных испытаний ядерного оружия, использовании физики ядерного взрыва в военных целях, а также после ряда радиационных аварий на предприятиях атомной отрасли, в общественном сознании укоренилось мнение о том, что негативное влияние ионизирующего излучения на организм человека и окружающую среду в основном исходит только от выбрасываемых техногенных радионуклидов предприятиями ядерного топливного цикла. Но самые опасные источники облучения для большинства людей - естественные источники радиации, так как действуют на человека не только изнутри, попадая в организм, но и путем взаимодействия с окружающей средой.

В основном, внутреннее облучение составляет более $\frac{5}{6}$ годовой эффективной эквивалентной дозы, которую получает население. Доза облучения зависит от конкретного места проживания, образа жизни, использования газа для приготовления пищи, герметизации помещений, в которых находится и проживает человек, и прочих факторов. Для большой массы населения особый интерес

представляет достоверная научная информация о минимализации действия радиации на организм человека.

Космические лучи, достигая Земной поверхности и взаимодействуя с ее атмосферой, могут быть началом вторичного излучения и породить образование космогенных радионуклидов. Защитой от космического облучения является воздушная подушка, которая увеличивается по мере приближения к уровню моря. Таким образом, люди, живущие в горной местности, получают в несколько раз большую эффективную эквивалентную дозу, чем население, проживающее около морей.

Особое внимание следует уделить тяжелому инертному газу - радону. Данный инертный газ, высвобождаясь из земной коры и распадаясь, дает начало последовательному ряду радиоактивных веществ. В связи с этим человек получает $\frac{3}{4}$ части от годовой индивидуальной эффективной эквивалентной дозы. Основную часть дозы облучения население получает, находясь в закрытых, не проветриваемых помещениях, так как радон концентрируется в воздухе. Попадание газа в воздух помещения обусловлено двумя факторами: просачивание его через фундамент при высвобождении из грунта и эманировании из стройматериалов здания. К стройматериалам, обладающим повышенной удельной радиоактивностью, можно отнести гранит и пемзу.

Скорость воздухообмена в помещении существенно влияет на объемную активность радона в воздухе, а быстрота проникновения данного тяжелого газа зависит от толщины межэтажных перекрытий, целостности полов и стен помещения. Минимализировать данные факторы можно установкой вентиляционных установок в подвалах и нанесением какого-либо покрытия на стены.

Опасность также представляет собой вода из артезианских скважин и колодцев, и природный газ. После вдыхания паров воды, которое происходит преимущественно в ванной комнате или на кухне, значительная часть продуктов распада задерживается в легких и из-за этого происходит облучение их поверхности α -частицами. Концентрация радона в помещении от кухонных плит, отопительных и других нагревательных приборов, в которых сжигается природный газ, резко возрастает при отсутствии вытяжки, сообщенной с наружным воздухом.

Из многолетних расчетов были сделаны выводы о том, что если концентрация радона в здании не превышает $200 \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3}$, то данный газ не может вызвать серьезных последствий для организма человека.

Естественный радиационный фон неодинаков для различных точек планеты. Он зависит от концентрации радиоактивных изотопов в том или ином участке земной коры. Основная масса населения, согласно исследованиям, по-

лучает облучение от земной радиации примерно одного порядка, и это значение редко превышает допустимые нормы.

На данный момент влияние радиации на организм хорошо изучено. Исследования по минимализации и оценке рисков в данной области необходимы для разработок, которые направлены на защиту большинства населения.

1. Радиация. Дозы, эффекты, риск. / с английского, Ю.А. Банникова, Перевод. — Можайск : "Мир" В/О "Совэкспорткнига" , 1990. — 46 с. — Текст : непосредственный.

УДК 539.1

Пупынин В.А., Басов А.А., Егорова Е.С., Семененко А.Н.
Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ОХЛАЖДАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЯ В КАМЕРЕ ВИЛЬСОНА

Камера Вильсона – устройство, с помощью которого можно регистрировать наличие ионов и идентифицировать их. Важное условие работы камеры Вильсона – это наличие состояния пересыщения паров. Для этого необходимо поддерживать низкую температуру охлаждаемой поверхности. Достичь параметров, при которых в камере Вильсона будут стабильно видны треки частиц, и оптимизировать её для длительного наблюдения, является инженерной задачей. Охладитель является ключевой компонентой конструкции. Авторами были рассмотрены два способа: охлаждение с помощью элементов Пельтье и с помощью компрессорной холодильной машины.

Первый способ, рассматриваемый авторами, это охлаждение элементами Пельтье. Изучив предлагаемый ассортимент элементов Пельтье и проведя финансово-качественный анализ рынка, авторы предлагают использовать элементы Пельтье ТЕС1-12706 и ТЕС1-12710, имеющие характеристики, приведенные в табл. 1.

Чтобы добиться эффективной работы камеры Вильсона на элементах Пельтье их можно разместить в следующем порядке: элемент марки ТЕС1-12706 накладывается на более мощный элемент марки ТЕС1-12710, смазав при этом холодопередающие плоскости теплопроводной пастой. Отвод тепла от

элементов производится за счет закрытого контура водяного охлаждения, состоящего из теплообменников, вентиляторов и водяного насоса.

Таблица 1

Характеристики элементов Пельтье

Модель	I _{max} , А	U _{max} , В	ΔT _{max} , °С	P _{max} , Вт	Габариты, мм			Стоимость, руб
					L	W	H	
TEC1-12706	6.0	15.4	68	53.0	40	40	4.05	158,86
TEC1-12710	10.0	15.4	68	85.0	40	40	3.3	310,76

Способ охлаждения рабочего объема камеры Вильсона с помощью элементов Пельтье имеет следующие преимущества: небольшие размеры, простота сборки и быстрый выход на рабочий режим. К недостаткам же относятся: частый брак элементов Пельтье и относительная их недолговечность, более низкий коэффициент полезного действия, чем у компрессорных установок, что приводит к затрате большей мощности, для достижения необходимой разности температур. необходимость нескольких источников постоянного тока для питания различных типов элементов Пельтье.

Второй способ, рассмотренный авторами, является охлаждение с помощью компрессорной холодильной установки. Для достижения правильной работы камеры Вильсона, в качестве рабочей поверхности используется медная пластина, которую необходимо охладить до температуры -40°С и ниже. К пластине припаян теплообменник (испаритель) который соединен к компрессору, конденсатору и дросселирующему устройству.

Изучив разные виды хладагента (рабочее вещество холодильной машины) и произведя расчёт количественных и качественных характеристик установки, командой авторов был выбран фреон R23. Его физические характеристики приведены в табл.2.

Таблица 2

Физические характеристики хладагента R23

Параметр	Единица измерения	Значение при -40 °С (насыщ. жидк.)
Химическая формула		CHF ₃
Критическая температура	°С	26,3
Температура кипения при атм. Давлении (101 кПа)	°С	-82
Критическое давление	МПа	4,87
Вязкость	Мпа*с	0,108
Теплопроводность	Вт/(м*К)	0,082
Плотность	Кг/м ³	1106

Камера Вильсона, охлаждаемая компрессорной холодильной машиной, имеет следующие достоинства:

- продолжительное время активной работы (несколько часов),
- высокий коэффициент полезного действия;

Недостатки камеры Вильсона на компрессорной холодильной машине:

- сравнительно сложное устройство и трудоёмкость сборки камеры,
- длительное время выхода на рабочий режим (несколько часов),
- потенциальная возможность выхода из строя механических узлов (компрессора) при повышенных нагрузках.

1. В.Н. Белозерцев, С.О. Некрасова, Д.В. Сармин, Д.А. Угланов, А.А. Шиманов. Исследование основных характеристик термоэлектрического охладителя и генератора [текст] / В.Н. Белозерцев.– Самара: СГАУ, 2015.–77 с.

УДК 621.039

Воробьева В.А., Цветкова И.А., Кочеткова Т.М., Сатаев А.А.

Нижегородский государственный университет им. Р.Е. Алексеева

ЕСТЕСТВЕННАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ В РЕАКТОРЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

В реакторе естественная циркуляция играет важную роль, поскольку она может обеспечить охлаждение активной зоны после отключения источника питания, а также служить основным средством циркуляции теплоносителя первого контура при работе реактора на любом уровне мощности. В ЯЭУ используют несколько параметров для получения естественной циркуляции. Например, можно определить расход теплоносителя в каждом из контуров.

Расход – это объем теплоносителя, необходимый для подачи тепла нагревательным элементам установки. Условие установившегося режима естественной циркуляции с расходом является равенство движущего напора гидравлическому сопротивлению контура. Существует несколько способов определения данного параметра, но они не дают точных значений из-за получения очень малых расходов. Поэтому мы решили реализовать ультразвуковой способ измерения.

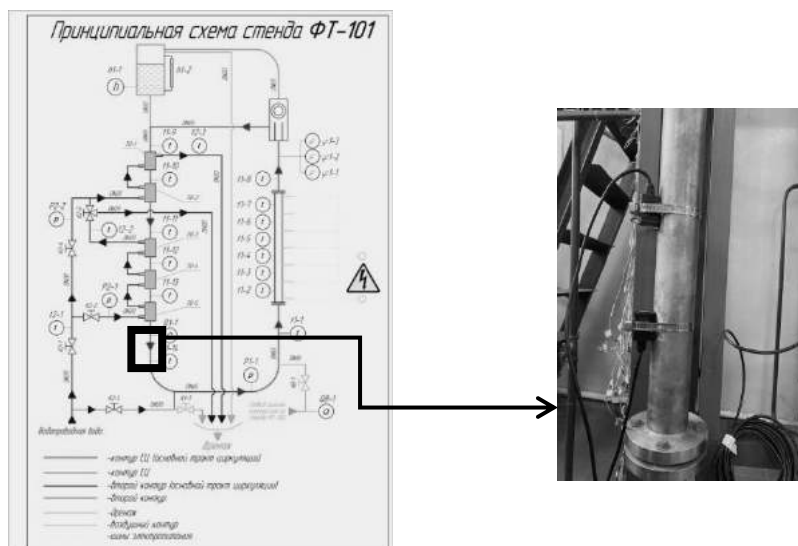


Рис. 1. Схема ультразвукового расходомера

Проведя ряд измерений с реальной установки (рис.1), были получены экспериментальные значения, которые в дальнейшем были сопоставлены с теоретическими

Таблица 1

Результаты

Теоретический расход	Экспериментальный расход	Отклонение, %
0,23	0,36	34,2

В современных ЯЭУ использование ЕЦ является важным свойством безопасности. Для проверки наличия ЕЦ можно экспериментально или теоретически найти расход теплоносителя, однако часто его значение может оказаться неточным, так как расчетная формула не учитывает изменение скорости по всем участкам контура.

1. Инженерные основы теории и эксплуатации судовых ядерных реакторов. Саркисов А.А.: учеб. пособие / Саркисов А.А., Гусев Л.Б., Калинин Р.И.. — Электрон. дан. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2011. — 549 с.»

Прытков Л.Н.¹, Барбин Н.М.¹, Терентьев Д.И.¹

Уральский институт Государственной противопожарной службы
МЧС России¹

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПЛУТОНИЯ В НАТРИЕВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Примеси при эксплуатации натрия в 1 и 2 контуре ядерной энергетической установки будут неизбежно присутствовать, образовываясь при взаимодействии с конструкционными материалами установки, за счет защитного газа, а также при взаимодействии с продуктами ядерных реакций. При разгерметизации контуров ядерного реактора и возгорании радиоактивного натрия создается угроза для участников тушения пожара [1].

Для изучения поведения примесей в натриевом теплоносителе применялся метод термодинамического моделирования, реализованный в программе ТЕР-РА [2 – 5]. Распределение плутония по фазам представлено на рис. 1.

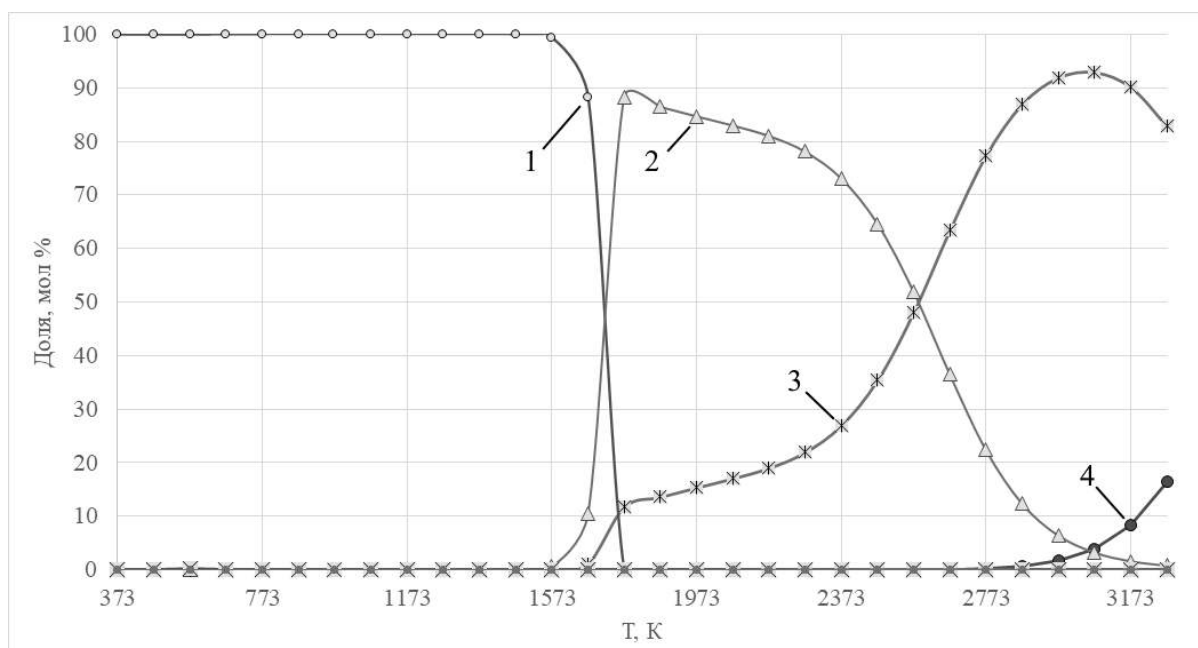


Рис. 1. Распределение плутония по фазам:
1 – $\text{PuO}_{2(\text{конд.})}$, 2 – $\text{PuO}_{2(\text{r})}$, 3 – $\text{PuO}_{(\text{r})}$, 4 – $\text{Pu}_{(\text{r})}$.

В диапазоне температур от 373 К до 1573 К значительных изменений состава фаз не наблюдается. Весь плутоний системы находится в виде конденсированного диоксида плутония $\text{PuO}_{2(\text{конд.})}$.

При достижении в системе температуры 1573 К происходит термическое испарение конденсированного диоксида плутония $\text{PuO}_{2(\text{конд.})}$ и при достижении

в системе температуры 1773 К конденсированный диоксид плутония испаряется, а содержание пара диоксида плутония $\text{PuO}_{2(g)}$ увеличивается до 88,31 мол% в соответствии с реакцией $\text{PuO}_{2(\text{конд.})} = \text{PuO}_{2(g)}$.

Интервал температур от 1573 К до 1773 К характеризуется увеличением содержания оксида плутония $\text{PuO}_{(г)}$ за счет термического испарения конденсированного диоксида плутония $\text{PuO}_{2(\text{конд.})}$, что может быть описано реакцией $\text{PuO}_{2(\text{конд.})} = \text{PuO}_{(г)} + \text{O}_{(г)}$.

В температурном диапазоне от 1773 К до 3073 К происходит термическая диссоциация паров диоксида плутония $\text{PuO}_{2(g)}$ при которой содержание оксида плутония $\text{PuO}_{(г)}$ возрастает с 11,69 мол% до 92,91 мол% в соответствии с реакцией $\text{PuO}_{2(g)} = \text{PuO}_{(г)} + \text{O}_{(г)}$.

При температуре 2773 К в системе содержание паров плутония $\text{Pu}_{(г)}$ начинает увеличиваться и при 3273 К составляет 16,42 мол% в соответствии с реакцией $\text{PuO}_{2(g)} = \text{Pu}_{(г)} + \text{O}_{(г)}$. Содержание в системе оксида плутония $\text{PuO}_{(г)}$ при достижении 2973 К начинает уменьшаться, что вероятнее всего связано с процессом термической диссоциации в паровой фазе оксида плутония $\text{PuO}_{(г)}$, при этом содержание пара плутония $\text{Pu}_{(г)}$ при 3273 К составляет 16,41 мол%. Данный химический процесс соответствует реакции $\text{PuO}_{(г)} = \text{Pu}_{(г)} + \text{O}_{(г)}$.

Библиографический список

1. Прытков, Л. Н., Барбин Н. М., Титов С.А. Радиационная и пожарная опасность натриевого теплоносителя // Пожаровзрывобезопасность. – 2023. – Т. 32, № 2. – С. 33-43. – DOI 10.22227/0869-7493.2023.32.02.33-43.
2. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Металлургия, 1994. – 352 с.
3. Прытков, Л. Н., Терентьев Д.И., Барбин Н.М. Поведение газовой фазы при запроектной аварии реактора на быстрых нейтронах // Техносферная безопасность. – 2022. – № 3(36). – С. 62-66.
4. Барбин Н.М., Тикина И.В., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. Термодинамическое моделирование паровой фазы при испарении расплавленного сплава Вуда при различных давлениях // Прикладная физика. – 2014. – № 3. – С.12-16.
5. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 96 с.

Пупынин В.А., Басов А.А., Егорова Е.С., Семенов А.Н.
Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКА ПУТЕМ ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА ТРЕКОВ ЧАСТИЦ В КАМЕРЕ ВИЛЬСОНА

Камера Вильсона, или туманная камера, представляет собой трековый детектор заряженных частиц, в котором используется способность ионов зарожать капли воды в переохлажденном перенасыщенном паре. В ней можно увидеть треки альфа-частиц, электронов, позитронов, мюонов, протонов и др. и проанализировать их движение. Траектория (трек) несет в себе обширную информацию о характеристиках и свойствах частиц, а именно:

- по направлению трека в магнитном поле можно судить о заряде частицы;
- при одинаковых зарядах ширина трека дает информацию о скорости движения частицы;
- длина траектории дает информацию о энергетических характеристиках частицы.

Поместив устройство в магнитное поле, можно наблюдать, как искривляется трек частицы. Его радиус кривизны зависит от заряда, модуля индукции магнитного поля, скорости частицы и ее массы. Измеряя радиус кривизны, и зная другие величины, можно вычислить отношение её заряда к массе. Это отношение является важной характеристикой частицы, позволяющей идентифицировать её.

Если в камере Вильсона произошла реакция распада ядра атома, то по продуктам распада можно определить, ядро какого элемента распалось.

Трековый анализ частиц может быть применён для решения задач по изучению изотопного состава урана и других исследуемых радионуклидов.

Изучение и анализ треков частиц в камере Вильсона играет огромную роль в изучении строения вещества. Исследование способов анализа треков привело к развитию нового метода, основанного на искусственном интеллекте.

В современном мире огромную роль играет искусственный интеллект. Он является мощным инструментом для выполнения различных задач. Для анализа треков авторами статьи предлагается применение искусственного интеллекта, обученного определять вид частицы по треку, анализировать активность радиоактивного источника, выявлять долю различных видов излучения в активности источника.

Искусственный интеллект (ИИ) проводит анализ с помощью камер, которые фиксируют треки частиц. Применяется два способа: плоский и объемный. Для первого способа достаточно одной камеры, которая будет регистрировать треки лишь в одной плоскости. Второй же способ может дать более точную информацию об источнике, потому что анализ будет проводиться в трех плоскостях. Для объемного способа требуется как минимум три камеры.

Обучение искусственного интеллекта проводится на основе эталонных снимков треков частиц в камере Вильсона. Каждая частица имеет свои отличительные свойства, например:

- α -частица – толстые прямые треки с коротким пробегом.
- β -частица – тонкие, беспорядочные треки.

Учитывая данные особенности, при помощи ИИ становится возможным дифференциация частиц и расчет их парциального состава. Кроме того, по длине трека α -частицы, используя алгоритмы ИИ, можно оценить её кинетическую энергию с помощью зависимости.

При помещении камеры Вильсона в магнитное поле, ИИ идентифицирует неизвестную частицу. Осуществляется это путем сравнения её удельного заряда q/m с удельным зарядом протона.

Отсюда видно, что отношение удельных зарядов частиц равно обратному отношению радиусов. Используя данную зависимость, ИИ может определить удельный заряд неизвестной частицы, что позволяет идентифицировать ее.

1. О.А. Барсуков. Основы физики атомного ядра. Ядерные технологии. [текст] / Барсуков О.А. –Москва:ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 560 с.

УДК 621.039

Торхова Д.А., Каверзнев М.М.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ SCO_2 -ЦИКЛА БРАЙТОНА НА АСММ С РУ РИТМ-200

Целью работы является анализ и расчетные оценки возможности использования в составе атомных станций малой мощности (АСММ) на базе реакторной установки (РУ) РИТМ-200 цикла Брайтона на сверхкритической углекислоте (далее SCO_2 -цикла Брайтона).

РИТМ-200 является основой новых проектов АСММ и транспортных систем, однако в этих проектах в составе II контура по-прежнему рассматривается

паросиловой цикл Ренкина, что приводит к большому весу и габаритам турбинного оборудования. В то же время, для АСММ вопросы компактизации и уменьшения веса стоят весьма остро, учитывая сложности транспортировки в удаленные регионы.

Одной альтернативой циклу Ренкина, активно исследуемой в последние годы, является сверхкритический цикл Брайтона на углекислом газе (SCO₂-цикл Брайтона), позволяющий, в силу свойств последнего, резко (на порядок) сократить массу и габариты турбины [1]. Цикл не лишен недостатков, в частности, превосходит цикл Ренкина по КПД только в области достаточно высоких температур (450 С и выше).

Однако, недавний анализ показал [2], что даже при параметрах РУ ВВЭР-440 на примере АЭС Моховце (Словакия), SCO₂-цикл Брайтона с развитой регенерацией дает не только радикальный выигрыш по массо-габаритным характеристикам (уменьшение длины машинного зала на 75%, уменьшение металлоемкости оборудования на 40% и объема, занимаемого установкой, в 8 раз), но и увеличение КПД на ~0,5%.

Параметры рабочего тела (РТ) РУ РИТМ-200 близки к параметрам ВВЭР-440, что позволяет вполне обоснованно предположить, что применение SCO₂-цикла Брайтона на АЭС с РУ РИТМ-200 может рассматриваться как вариант, представляющий интерес как с точки зрения термодинамики, так и экономики, включая вопросы транспортировки.

Однако остается вопрос о том, не потребует ли переход на новый цикл радикальной переделки основных элементов (корпуса) самой РУ, поскольку SCO₂ и вода радикально отличаются по своим теплофизическим свойствам [3].

Для ответа на этот вопрос в рамках работы были выполнены расчетные оценки нескольких вариантов модуля теплообменника на SCO₂. Работа была далека от мысли воспроизвести достойную легендарного Левши конструкцию модуля, предложенную (к тому же весьма скупо описанную в открытой печати) разработчиком, ограничившись рассмотрением упрощенной конструкции теплообменника с U-образными трубками.

Оценки показали, что, при некоторых конструктивных особенностях, необходимых для увеличения теплообменной поверхности в заданных габаритах (в частности, применения теплообменных труб меньшего диаметра), модуль вполне может быть вписан в габариты модуля парогенератора на воде (таблица 1), не требуя изменения высоты/диаметра корпуса реактора.

Одной из особенностей использования SCO₂ в качестве рабочего тела (РТ) является его на порядок больший расход, что значительно увеличивает мощность на прокачку РТ, а также требует патрубков большего проходного сечения для его подвода и отвода, т.е. модификации узла подвода и отвода РТ через корпус РУ.

Расчетные характеристики модуля теплообменника на SCO₂

тепловая мощность	14.58 МВт	т/о трубки (ПТ-7М)	8×1мм
число модулей	12	высота т/о части	1,93 м
расход ТН	76,7 кг/с	площадь поверхности	154,78 м ²
параметры ТН	15,7МПа, 277/313С	мощность на прокачку ТН	5,0 кВт
расход РТ	158,5 кг/с	мощность на прокачку РТ	83,8 кВт
параметры РТ	20МПа, 212/293С	масса модуля	903,6кг

Также очевидно потребуют модернизации системы безопасности РУ, поскольку РТ имеет давление выше давления 1-го контура, а само рабочее тело радикально отличается по своим характеристикам от воды.

Эти вопросы выходили за рамки работы.

Результаты работы могут представлять интерес для разработчиков новых вариантов АСММ на базе РУ РИТМ-200 и ее модификаций.

Библиографический список

1. Lorenzo Santini, Marco Ricotti. Comparison between several closed carbon dioxide cycle for nuclear power conversion. 63° Congresso Nazionale ATI – Palermo, CA - 63 - Palermo 23-26 September 2008. – 9pp.
2. Lorenzo Santini, Carlo Accornero, Andrea Cioncolini. On the adoption of carbon dioxide thermodynamic cycles for nuclear power conversion: A case study applied to Mochovce 3 Nuclear Power Plant // Applied Energy. 2016. – P. 446-463.
3. Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. Издательство стандартов – М., 1975. – 546 с.

УДК 621.039

Тарасюк А. В.

Белорусский национальный технический университет

ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

В современном мире, когда активно продвигается политика снижения выбросов углекислого газа, следует отметить, что ядерная энергетика, будучи формой чистой энергии, обладает уникальными достоинствами по сравнению с другими источниками энергии. Следует также учесть, что экспоненциальный рост технологий искусственного интеллекта (ИИ) в последние десятилетия привёл к возникновению новых перспектив и вызовов в области безопасности и

экономики, связанных с использованием ядерных реакторов. Атомные электростанции (АЭС) обладают высокими стандартами безопасности и обширными мерами предосторожности, но, несмотря на это, существует возможность аварий, которые несут негативные последствия для людей и окружающей среды. [1]

Использование искусственного интеллекта (ИИ) в атомных электростанциях помогает улучшить безопасность и эффективность этих установок. Перед началом строительства электростанции, моделирование, основанное на ИИ, позволяет анализировать поведение ядерных реакторов и оптимизировать конструкцию, производительность и системы безопасности. Собранные данные и анализ с использованием ИИ обеспечивают непрерывный мониторинг реакторов.

Использование искусственного интеллекта (ИИ) на ведённых в эксплуатацию атомных электростанциях может значительно улучшить безопасность и эффективность их работы. Вот какие практические приложения могут быть связаны с использованием ИИ на атомных электростанциях:

1. Предсказание аварий и обнаружение неисправностей: ИИ может анализировать данные, собираемые с датчиков на электростанции, и использовать комбинацию машинного обучения и физических моделей для предсказания возможных аварий или выявления неисправностей в оборудовании. Это позволяет оперативно реагировать на потенциальные угрозы безопасности.

2. Оптимизация процессов: ИИ может оптимизировать процессы на атомной электростанции, управляя реактором, регулируя параметры работы и минимизируя потребление ресурсов. Это может увеличить эффективность генерации электроэнергии.

3. Поддержка операторов: ИИ может предоставлять информацию и рекомендации операторам станции в режиме реального времени, помогая им принимать более информированные решения в условиях высокой ответственности.

4. Анализ больших данных: С помощью машинного обучения и анализа больших данных ученые могут исследовать и моделировать поведение реактора в различных условиях, что может привести к улучшению проектирования и безопасности атомных электростанций.

5. Управление ресурсами и обслуживание: ИИ может помогать в планировании регулярного обслуживания оборудования и оптимизации расходов на замену деталей.

В 2027 году Тяньваньская атомная электростанция, расположенная в провинции Цзянсу на восточном побережье Китая планирует стать самой крупной атомной электростанцией в регионе, обеспечивая электроэнергией миллионы жителей. Здесь инженеры активно применяют программное обеспечение для эффективного управления данными, с целью снижения рисков радиации и про-

дления срока службы оборудования. Они осуществляют мониторинг параметров производительности в реальном времени и сравнивают работу своей электростанции с другими в Китае. Полученная информация о производстве представлена в наглядных блок-схемах и информационных панелях, чтобы инженеры могли оперативно выявлять и реагировать на любые отклонения от ожидаемых результатов. Кроме того, они активно обмениваются своим опытом и уроками с коллегами и партнерами, способствуя обмену знаний и оптимизации производственных процессов. [2]

В целом, применение ИИ на атомных электростанциях может сделать работу этих объектов более безопасной, эффективной и экономически выгодной. Однако при этом необходимо уделять внимание аспектам безопасности и надежности системы управления, чтобы избежать потенциальных рисков, связанных с автоматизацией и использованием ИИ.

Библиографический список

1. Huang Q, Peng S, Deng J, Zeng H, Zhang Z, Liu Y, Yuan P. A review of the application of artificial intelligence to nuclear reactors: Where we are and what's next. *Heliyon*. 2023 Feb 22;9(3):e13883.

2. New Technologies Are Making Nuclear Energy Safer and More Efficient [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.powermag.com/new-technologies-are-making-nuclear-energy-safer-and-more-efficient/> – Дата доступа: 21.09.2023.

УДК 539

Егорова Е.С.¹, Гришин А.Л.², Пупынин В.А.¹

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е.Алексеева¹

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Кольская атомная станция»²

ИЗМЕРЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ТЕЛЕ ЧЕЛОВЕКА НА СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ «КОНТРОЛЬНЫЙ СИЧ», ГРАДУИРОВКА УСТАНОВКИ

Для дозиметрического контроля профессионального внутреннего облучения используют индивидуальный дозиметрический контроль персонала (ИДК).

На Кольской АЭС ИДК внутреннего облучения проводится с помощью спектрометра излучения человека (СИЧ) [1, с.12] для определения индивидуального поступления радионуклидов в легкие (^{60}Co), щитовидную железу (^{131}I)

и во все тело (^{137}Cs) с целью контроля индивидуальной ожидаемой эффективной дозы (ОЭД) внутреннего облучения персонала на соответствие допустимым пределам.

В ОРБ Кольской АЭС установлен СИЧ МКС01А с тремя блоками детектирования, двумя — в спинке кресла для регистрации излучения радионуклидов, депонированных в легких человека, и одним, расположенным под креслом, — для регистрации гамма-излучения радионуклидов, депонированных в мягких тканях.

Одной из важнейших характеристик детекторов ИИ является эффективность регистрации. Эффективность регистрации — это доля зарегистрированных частиц от полного числа частиц, прошедших через сцинтиллятор, функция энергии гамма-излучения, которая в диапазоне значений энергии 0,2 - 2 МэВ описывается зависимостью:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot E^{-\alpha} \quad (1)$$

где: E — значение энергии гамма-излучения, МэВ; ε_0 — эффективность регистрации для энергии 1 МэВ; α — коэффициент, определенный эмпирически согласно табл. 1. [2, с.25]

Таблица 1

Геометрия (детектор)	
Все тело (нижний детектор)	0,65
Легкие (детекторы в спинке)	0,75
Цитовидная железа	0,9

При проведении 19.07.2023 градуировки установки «Контрольный СИЧ» использовался набор сертифицированных закрытых радионуклидных источников для фантома груди ФЛТ-05. Источники представляют собой имитаторы правого и левого легких, зафиксированные в контейнере из полиуретана, с активностью радионуклидов 12,82 кБк и 15,49 кБк соответственно.

Для определения эффективности регистрации детекторов, фантом устанавливается в кресло и детекторы позиционируют так, чтобы указатель устройства позиционирования находился на уровне плеч фантома.

С помощью ПО «Прогресс» узнаем текущее установленное значение коэффициента $\varepsilon_0^{уст.л.} = 0,85 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon_0^{уст.п.} = 0,8 \cdot 10^{-3}$ для левого и правого детекторов соответственно.

Измерение активности производится в течение 1800 с. После чего записываются значения активности для левого детектора — 8433 Бк, а для правого — 8166 Бк.

Следующий шаг — расчет значения эффективности для энергии 1 МэВ в геометрии «Легкие» для левого и правого детекторов: [2, с.27]

$$\varepsilon_0^{л.} = \varepsilon_0^{уст.л.} \quad (2)$$

где $\varepsilon_0^{\text{уст.л.}}$ - значение коэффициента ε_0 , используемого программой для расчета активности; - сумма паспортных значений активности ^{60}Co фантома на дату калибровки источника; T – время, в годах, прошедшее после изготовления источника (дата калибровки (изготовления) фантома по паспорту 12.08.2014, период полураспада ^{60}Co — 5,27 лет).

$$\varepsilon_0^{\text{л.}} = 0,85 \cdot 10^{-3} = 0,82 \cdot 10^{-3};$$

$$\varepsilon_0^{\text{п.}} = 0,8 \cdot 10^{-3} = 0,75 \cdot 10^{-3}.$$

По результатам вычислений наблюдается уменьшение эффективности регистрации для детектора левого легкого на 3% и правого — на 6%. Такие показатели являются приемлемыми для дальнейшей эксплуатации установки.

Библиографический список

1. Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в условиях планируемого облучения: МУ 2.6.5.028: В.В. Романов. - М.: Государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование РФ: ввод 18.05.16, 2016. – с. 108.

2. Методика измерений содержания Co-60 и других радионуклидов в легких и во всем теле человека на установке «Контрольный СИЧ» Кольской АЭС: МВК 12.2(1)-18: утв. В.В. Омельчук: Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Кольская АЭС», 2018. – с. 32.

УДК 621.039

**Д.В. Доронков, А.А. Добров, А.Н. Пронин, Т.Д. Демкина,
А.В. Рязанов, Д.Д. Курицин**

Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СМЕШАННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР

Стратегическая цель программы модернизации действующих АЭС до 2035 г. — увеличение выработки электроэнергии в результате повышения мощности при безусловном приоритете безопасности атомных станций и их конкурентоспособности на федеральном рынке электроэнергии.

Энергоблоки атомных электростанций с реакторами типа ВВЭР спроектированы с большим запасом безопасности и надежности эксплуатации. Данный факт, по мере накопления опыта эксплуатации и аккумуляции знаний позволяет

внедрять новые методы повышения технико-экономических показателей установок

Одним из вариантов увеличения эффективности АЭС является повышение мощности реакторной установки. На реакторах типа ВВЭР-1000 существует практика отработки новых типов тепловыделяющих сборок (ТВС), когда в рамках плановых работ в активную зону к штатным загружают сборки уже новой модификации

Так, на АЭС «Темелин» были использованы 48 ТВСА-Т.mod.2, пришедшие на замену ТВСА-Т. В модернизированных ТВС применены перемешивающие решетки (ПР), которые обеспечивают более интенсивное перемешивание теплоносителя в поперечном сечении сборки и способствуют повышению критических тепловых потоков, что позволяет увеличить эксплуатационные характеристики реакторной установки [1].

Применение ТВС разного типа привело к возникновению смешанной активной зоны. Обоснование теплотехнической надежности и работоспособности подобной конфигурации активной зоны невозможно без достаточно точного прогнозирования гидродинамических процессов в теплоносителе первого контура.

Для этих целей на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева в лаборатории «Реакторная гидродинамика» был использован аэродинамический исследовательский стенд, представляющим собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух.

Исследование происходило в экспериментальных моделях (ЭМ), которые представляют из себя сегменты сборок ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2. Оба типа ТВСА являются бесчехловыми, поэтому перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними сборками.

Для исследования процесса перемешивания теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА-Т использовался метод инъекции контрастной примеси и пневмометрический метод измерения компонент вектора скорости. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X, Y, Z не превышали 7% от абсолютной скорости [2].

На основе результатов исследований распределения компонент вектора скорости потока определены следующие закономерности течения теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА-Т и ТВСА-Т mod. 2:

- в процессе обтекания теплоносителем расположенных на разных уровнях решеток с отличающимися значениями коэффициента гидравлического сопротивления возникают поперечные потоки различной интенсивности, оказывающие влияние на течение теплоносителя в смежных ТВСА. Поперечные потоки имеют следующую направленность: при обтекании теплоносителем КДР поперечный поток направлен в ТВСА-Т.mod.2, а перед ДР и ПР наоборот в ТВСА-Т.

- максимальная интенсивность поперечных течений теплоносителя между соседними ТВСА локализована в ряду ТВЭЛОВ, прилежащем к межкассетному зазору. Пиковые значения безразмерно поперечной скорости наблюдаются непосредственно перед КДР и ДР, расположенными на нижнем фрагменте ТВЭЛЬНОГО пучка и составляют перед 0,7, и 0,5 соответственно.

- поперечные потоки из соседних ТВСА, а также из-под уголков жесткости оказывают значительное влияние на конвективные направленные течения теплоносителя, созданные дефлекторами КДР и ПР, вплоть до изменения их направления, что может привести к снижению эффективности применения решеток интенсификаторов.

Библиографический список

1. Доронков, Д.В. Гидродинамика и перемешивание теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с тепловыделяющими сборками различных конструкций / С.М. Дмитриев [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2019. – Т. 26. – № 6. – С. 897-912.
2. Дмитриев С.М. Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов / С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 188-195.

УДК 536.3

Н.Ю. Косенкова, Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев
ФГБОУ ВО КНИТУ

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ МЕТАЛЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ СБОРОК ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

В последнее время уникальные физико-химические и теплофизические свойства ряда металлов Периодической системы нашли широкое применение при производстве элементов оборудования атомных электростанций различной мощности [1]. Особый интерес представляют собой металлы - цирконий и гафний. Знание излучательных характеристик этих металлов в широком диапазоне длин волн позволяет производить уточненные теплотехнические расчеты, необходимые для проектирования оборудования атомной энергетики.

Представлены результаты экспериментального исследования нормальной спектральной излучательной способности ε_λ технических циркония и гафния с содержанием основного элемента не менее 99,8 % в широком волновом диапазоне. Полученные результаты расширяют имеющиеся данные в [2].

Экспериментальная установка, методика проведения исследований, оценка погрешности были детально представлены авторами ранее в [3]. Метод измерения – радиационный. Оценка погрешности в экспериментах составила $5 \div 8$ %.

При спектральных исследованиях металлов применялись съемные узкополосные дисперсионные фильтры. Каждый применяемый фильтр имеет индивидуальные паспортные характеристики с выделенной максимальной полосой пропускания.

При исследовании циркония и гафния в твердой полированной фазе области точки плавления получены монотонно убывающие кривые ε_λ в зависимости от длины волны (рисунок).

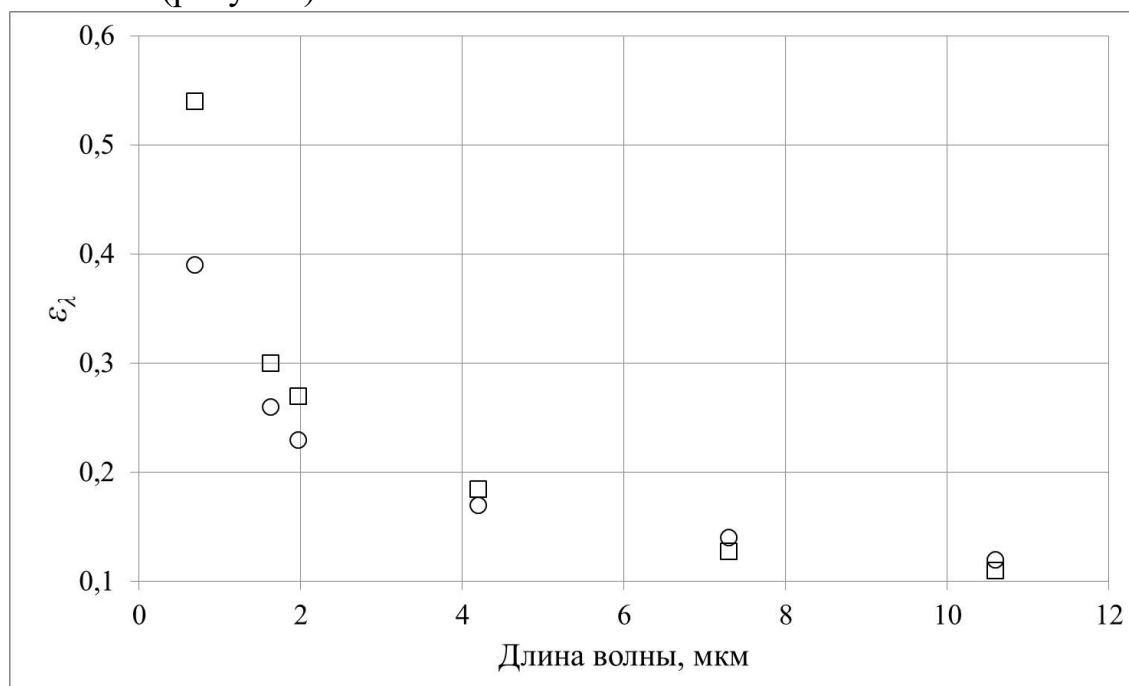


Рисунок. Зависимость ε_λ металла от длины волны:
○ – цирконий ($T_{\text{экс.}} = 2100$ К); □ – гафний ($T_{\text{экс.}} = 2490$ К)

Дисперсия интенсивности ε_λ циркония и гафния изменяется от длины волны, что может быть объяснено фактом наличия механизма изменения внутриволнового перехода коллективизированных электронов кристаллической решетки металлов с одного энергетического уровня на другой [4].

Библиографический список

1. Адамов Е.О., Драгунов Ю.Г., Орлов В.В. и др., Машиностроение. Машиностроение ядерной техники. Том 4. Книга 1, Машиностроение, Москва, 2005, 960 с.
2. Touloukian, Y. S., and DeWitt, D. P. Thermal radiative properties: Metallic elements and alloys. Vol. 7, Thermophysical Properties of Matter, Y. S. Touloukian and C. Y. Ho, Eds., IFI/Plenum, New York, 1970.
3. Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев, Степень черноты ряда металлов VIII группы периодической системы / Теплофизика и аэромеханика. 2021, т.28, в.6, с.951 - 956.
4. N.W. Ashcroft, N.D. Mermin, Solid State Physics, Saunders Collage Publishing, 1976.

УДК 621.039

**Сумин Р.В., Бокова Т.А., Мелузов А.Г., Маров А.Р., Волков Н.С.,
Зырянова Т.К., Погорелов М.Д.**

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ТЯЖЕЛОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Ядерные энергетические установки (ЯЭУ) с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) имеют свободный уровень теплоносителя из-за баковой компоновки [1]. Одной из важнейших проблем таких ЯЭУ является определение уровня теплоносителя.

Наиболее распространенным прибором контроля изменения свободного уровня теплоносителя в стендовых контурах с ТЖМТ является электроконтактный датчик. Основной проблемой такого уровнемера является потеря герметичности в уплотнении чувствительного элемента.

В НГТУ проводились эксперименты в обоснование возможности применения различных типов уровнемеров, конструкции которых позволяют изолировать газовый объем контура ТЖМТ: поплавково-дискретный уровнемер (ПДУ) [2], микроволновый рефлекс-радарный уровнемер [3].

В экспериментах с ПДУ подбиралась оптимальная конфигурация уровнемера, проводилась проверка работоспособности при разных температурных режимах. Выбран геркон марки МКА-14103 группы Б как наиболее термо-

стойкий из доступных на рынке, а также имеющий оптимальную величину магнитодвижущей силы.

Данное устройство применимо для различных экспериментальных стендов, ускорительно-управляемых систем с жидкометаллическими теплоносителями, работающими с ТЖМТ при температурах 210–230 °С.

Эксперименты с микроволновым рефлекс-радарным уровнемером показали, что уровнемер применим для контроля уровня жидкометаллического теплоносителя с достоверной точностью, подтверждена работоспособность для интервала температур 420–450°С. Наблюдалось также отсутствие влияния оксидной пленки на корпусе и электроде уровнемера на точность и работоспособность уровнемера.

Библиографический список

1. Безносков А.В. Оборудование, компоновка и режимы эксплуатации контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011 – 536 с.
2. Сумин Р.В. Возможность применения поплавково-дискретного уровнемера в среде тяжелого жидкометаллического теплоносителя / Р. В. Сумин, М. Д. Погорелов, Т. К. Зырянова [и др.] // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов Двадцать девятой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 16–18 марта 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2023. – С. 731.
3. Мельников В.И. Экспериментальное исследование микроволнового рефлекс-радарного уровнемера жидкометаллического теплоносителя / В. И. Мельников, Т. А. Бокова, В. В. Иванов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2022. – № 1. – С. 79-89.

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE–2023–0005 «Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

Д.М. Аношин, М.В. Гариевский

Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРЯДКИ
АККУМУЛЯТОРА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В СОСТАВЕ АЭС
ДЛЯ ТАМ LiNO_3 И СМЕСИ 18,5% NaNO_3 + 81,5% NaOH**

В Европейской части РФ прослеживается увеличение доли АЭС в структуре генерирующих мощностей. В условиях неравномерных графиков электропотребления эффективным путем развития маневренных мощностей может стать комбинирование АЭС с накопителями тепла на основе аккумуляторов фазового перехода (АФП) [1, 2]. Использование АФП в комбинации с двухконтурной АЭС с ВВЭР предполагает осуществление зарядки аккумулятора частью свежего пара в ночные часы снижения электропотребления. В режиме пиковых нагрузок при разрядке аккумулятора часть питательной воды после подогревателей высокого давления нагревается в АФП и затем подмешивается к питательной воде в основном тракте. За счет повышения температуры питательной воды на входе в парогенераторы при той же мощности реактора генерируется избыток свежего пара, который направляется на дополнительную паротурбинную установку (рис. 1) [3].

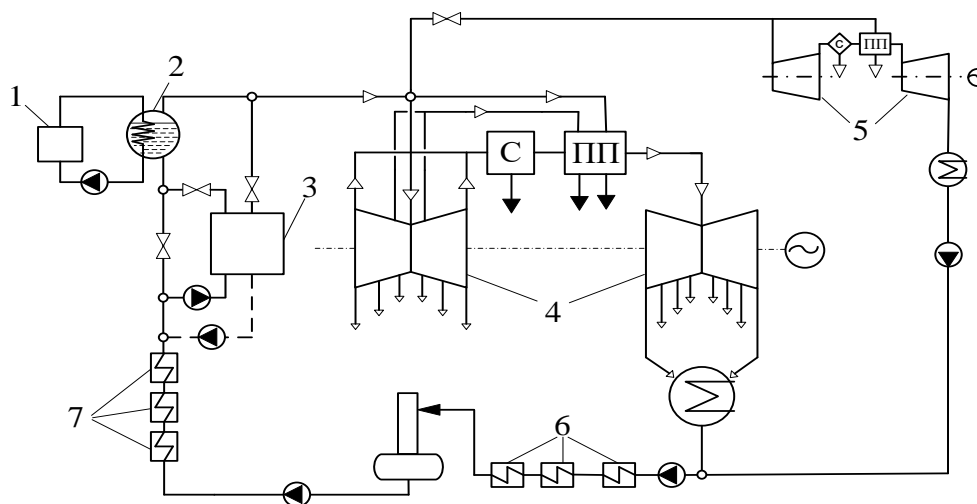


Рис. 1. Схема комбинирования энергоблока АЭС с ВВЭР и системы теплового аккумулирования с подогревом воды в АФП:
1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – АФП; 4 – основная паровая турбина;
5 – дополнительная(ые) паровая турбина; 6, 7 – ПНД и ПВД [3]

В качестве теплоаккумулирующего материала (ТАМ) возможно использование эвтектического состава нитрата натрия и гидроксид натрия 18.5 мол.% NaNO_3 + 81.5 мол.% NaOH (с температурой плавления 257°C , кристаллизации 254°C), а также нитрат лития LiNO_3 (температура плавления/кристаллизации 253°C). Для расчета температуры теплоносителя на выходе из АФП проведено математическое моделирование нестационарного теплообмена между теплоаккумулирующим материалом и водой через металлическую трубку методом конечных элементов в Ansys Fluent. Результаты расчета температуры воды (средней по потоку) на выходе из трубы элементарной ячейки при разрядке АФП приведены на рис. 2.

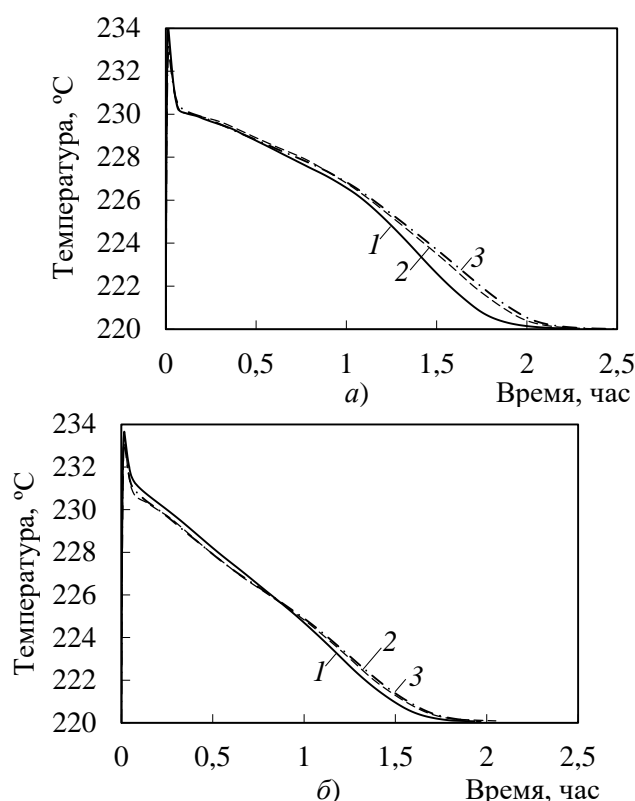


Рис. 2. Динамика температуры воды на выходе ячейки при разрядке АФП с LiNO_3 (а) 18,5% NaNO_3 + 81,5% NaOH (б) при различных типах оребрения:

1 – радиальное дисковое; 2 – продольное; 3 – продольное древовидное оребрение

Видно, что при использовании LiNO_3 средняя температура в процессе разрядки значительно выше, кроме того, сам процесс разрядки длится на 20% дольше, чем при использовании эвтектической смеси 18,5% NaNO_3 + 81,5% NaOH . Исходя из данного исследования можно сделать вывод, что LiNO_3 является более подходящим теплоаккумулирующим материалом, т.к. способен накопить значительно большее количество тепловой энергии.

Библиографический список

1. Аминов, Р. З. Применение многофункциональных систем с тепловыми аккумуляторами фазового перехода как путь повышения безопасности и эффективности АЭС / Р. З. Аминов // Теплоэнергетика. – 2022. – № 8. – С. 5-13.
2. Аминов, Р. З. Оценка эффективности АЭС при использовании аккумуляторов фазового перехода / Р. З. Аминов, М. В. Гариевский // Теплоэнергетика. – 2023. – № 2. – С. 78-89.
3. Патент № 2680380 С1 Российская Федерация, МПК G21D 5/00. Способ повышения мощности и безопасности энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР на основе теплового аккумулялирования : № 2017141963 : заявл. 01.12.2017 : опубл. 20.02.2019 / Р. З. Аминов, В. Е. Юрин, М. А. Муртазов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00090, <https://rscf.ru/project/22-29-00090/>

УДК 621.039

Д.А. Тимин, А.М. Анфимов, Д.В. Кузнецов
АО «ОКБМ Африкантов», Н. Новгород, Россия

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ НА РЕАКТОРАХ БН

В соответствии с требованиями нормативной документации в отчётах по обоснованию безопасности энергоблоков атомных станций (АС) должен быть представлен реалистический анализ запроектных аварий (ЗПА)[1]. Анализ ЗПА является реалистичным, если он отражает реальную работу систем и элементов АС и действия персонала по управлению ЗПА[2]. Вместе с этим анализы безопасности должны сопровождаться оценками погрешностей и неопределённостей получаемых результатов, а используемые при обосновании программные средства должны быть аттестованы[1].

Для соответствия расчётных анализов ЗПА нормативной документации используется методический подход, состоящий из нескольких этапов: разработка реалистического сценария ЗПА; выбор расчётных программ для анализа ЗПА; разработка расчётных моделей систем и оборудования АС; определение феноменологии аварии; анализ неопределённостей параметров, важных для безопасности; оценка возможности функционирования важного для управления ЗПА оборудования и систем; оценка доз облучения работников и населения, выводы необходимости мероприятий по защите персонала и населения.

С целью демонстрации используемого подхода в докладе представлены расчёты запроектной аварии с полным обесточиванием с отказом всех средств воздействия на реактивность.

Демонстрационные расчёты запроектной аварии с полным обесточиванием и с отказом всех средств воздействия на реактивность показали, что:

- в условиях рассматриваемой ЗПА может произойти разгерметизация оболочек ТВЭЛ и выброс радиоактивных веществ в окружающую среду;
- опасный рост температур оборудования РУ и выброс радиоактивных веществ ограничивается за счёт реализации персоналом мер по подключению системы аварийного расхолаживания;
- повреждение корпуса реактора и оборудования системы аварийного расхолаживания не ожидается;
- неопределённость выброса радиоактивных веществ может составлять около 2 раз (по отношению к номинальным параметрам расчётной модели);
- эвакуация и отселение населения не требуется.

Библиографический список

1. НП-001-15 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.
2. РБ-152-18 Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Комментарии к федеральным нормам и правилам «общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15)».

УДК 621.313.822.3

**Вознесенский М.В., Чернышев В.М., Седов А.Р.,
Касаткин Н.И., Басов А.А., Семененко А.Н.**

Нижегородский государственный технический университет
им Р.Е. Алексеева

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПОСТОЯННЫХ, РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МАГНИТОВ

В настоящее время наиболее надежным и перспективным электродвигателем, способным работать в атомной энергетике, является бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ). Он существенно лучше обычных двигателей постоянного тока за счет отсутствия электромеханического коллектора, создающего радиопомехи, снижающего надежность и т.д. Постоянный магнит являет-

ся главным элементом такого рода двигателей, так как определяет основные параметры его работы.

Другой немаловажной системой, обеспечивающей контроль, управление и прекращение цепной реакции в ядерном реакторе является исполнительный механизм (ИМ) системы управления и защиты (СУЗ). В него входит совокупность оборудования, которая создает условия для перемещения стержня поглотителя в режимах как автоматического, так и дистанционного управления. Поскольку на средства управления и защиты возложены ответственные функции, обеспечивающие ядерную безопасность, то и важнейшим требованием, предъявляемым к ИМ, является высокая надежность, точность, строгое выполнение предписанных процессов регулирования и контроля каждым элементом системы. Одним из этих элементов являются постоянные магниты, применяемые в системах индикации с датчиками угловых и линейных перемещений. Свое место они также нашли в магнитных муфтах, используемых по соображениям безопасности [1, с 63-69,100-107].

В данное время наиболее популярны магниты на основе редкоземельных металлов — неодима и самария. После открытия в (70-80)х годах и до сегодняшнего дня они активно применяются в различных отраслях промышленности. В том числе и в ядерной отрасли за счет высокой намагниченности.

Магниты из сплава самарий-кобальт () имеют наилучшую температурную стабильность, сопротивление к коррозии и устойчивость к окислению (нет необходимости в покрытии), а также высокие значения максимального энергетического произведения (240) и коэрцитивной силы (1275).

Магниты на основе неодима () обладают большим сроком службы, хорошей механической прочностью, небольшой массой и низкой стоимостью, что позволяет применять их повсеместно. Они также имеют высокие значения магнитной индукции (1,42), коэрцитивной силы (950) и максимального энергетического произведения (380).

Воздействие нейтронного излучения возможно является фактором, ведущим к изменению магнитных свойств рассматриваемых магнитов. Так как, в отличие от других типов излучений, нейтроны передают свою энергию исключительно посредством взаимодействия с ядрами атомов мишени. Взаимодействие частиц, не имеющих электрического заряда, с атомами решетки приближенно можно рассматривать как столкновение двух шаров, после которого атом решетки приобретает энергию [2, с 35-36]:

Если полученная от нейтрона энергия превысит пороговую энергию смещения атома, то происходит перемещение атома из узла кристаллической решетки в междоузлие. Образуется дефект.

Длительное воздействие нейтронного потока приводит к разрушению кристаллической структуры магнитного материала. Постепенно в веществе накап-

ливаются простые изолированные дефекты – вакансии и междоузельные атомы, а также сложные комплексы – «простой дефект + химическая примесь». Вследствие этого упорядоченная доменная структура магнита может перестроиться, а величина создаваемого магнитного потока упасть. В работе приведены результаты экспериментов проверяющих эту гипотезу.

При эксплуатации также необходимо учитывать нагрев магнита, поскольку материал теряет свои ферромагнитные свойства при достижении температуры близкой к точки Кюри. Максимальная рабочая температура для неодимовых магнитов достигает 150. У самарий-кобальтовых работоспособность сохраняется вплоть до 300 [3, с 9].

Библиографический список

1. **Емельянов, И.Я.** Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов / И.Я. Емельянов, В.В. Воскобойников, Б.А. Масленок. Под ред. чл.-кор. АН СССР И.Я. Емельянова. – 2-е изд. перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 232 с: ил.
2. **Власичев, Г.Н.** Физика ядерных реакторов: учеб. Пособие / Г.Н. Власичев; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е.Алексеева. Нижний Новгород, 2008. – 106 с.
3. **Liu, J.** Thermal stability and radiation resistance of SM-CO based permanent magnets / J. Liu, P. Vora, P. Dent et al. // Proceed. Space Nuclear Conf. – Boston, 2007.

УДК 543.522

**Вознесенский М.В., Седов А.Р., Чернышев В.М., Касаткин Н.И.,
Басов А.А., Семенов А.Н.**

Нижегородский государственный технический университет
им Р.Е. Алексеева

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА МЕТОДОМ АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕТЕКТОРОВ, СОСТОЯЩИХ ИЗ РОДИЯ, ИНДИЯ И СЕРЕБРА

Интенсивное развитие ядерной энергетики, а также широкий спектр применения ядерных энергетических установок для различных нужд человека, побуждают к необходимости эффективного решения проблем, основанных на прогнозировании последствий нейтронного облучения живых тканей, узлов ме-

ханизмов, конструкционных материалов установки, а также радиоэлектронных изделий. Исходя из этого, важно с достаточно высокой точностью определять основные характеристики поля излучения нейтронов различных энергий. Например, величину плотности потока нейтронов, благодаря которой можно определить флюенс нейтронов на облучаемой поверхности [1, с. 5-7].

Радиометрия нейтронных полей реальных ядерных энергетических установок довольно сложна, и не каждый метод будет работоспособным в реальных условиях применения. Кроме высокоинтенсивного нейтронного излучения, большое количество источников ионизирующих излучений в ядерной энергетике обладает также достаточно высоким уровнем гамма-фона. Данный факт определяет невозможность применения некоторых методов анализа нейтронных полей в реальных условиях, таких как, широко распространённого сцинтилляционного метода или метода водородных пропорциональных счётчиков. Поэтому в настоящей работе нами рассматривается метод активационного анализа нейтронного поля, лишенный этого недостатка. В качестве материалов детекторов используется родий, индий и серебро. В ходе их сравнительного анализа было определено вещество, обладающее наилучшими качествами по нескольким параметрам.

Суть активационного метода [2, с. 36-40], используемого в работе, заключается в том, что специальные вещества (детекторы) подвергаются облучению нейтронным потоком в течение определенного времени (времени активации). Под действием нейтронов в детекторах образуются радиоактивные изотопы, которые в дальнейшем претерпевают распад с выделением ионизирующих излучений. Количество частиц ионизирующего излучения пропорционально числу радиоактивных распадов (активности), которое, в свою очередь, пропорционально изначальному нейтронному потоку. Измеряя с помощью приборов наведенную бета-активность в детекторе, и используя справочную литературу [3, с. 231-271; 4, с. 300-302] в работе рассчитывается плотность потока нейтронов от исходного источника.

К детекторам выдвигается ряд требований [5, с. 53-56], основным из которых является период полураспада изотопов, возникающих в результате облучения нейтронным потоком. Слишком маленький период полураспада ведет к невозможности детектирования активности исследуемого образца, а при слишком большом периоде значительно возрастает время активации, которое в среднем составляет 3–4 периода полураспада. А также растет время выдержки детектора, которое необходимо для полного распада всех изотопов, чтобы их активность не повлияла на дальнейшие опыты. Вследствие этого увеличивается время измерений и эксперимента. Также детектор должен обладать высокой скоростью реакции в широком диапазоне энергий падающих нейтронов, называемой активационным интегралом. Эта величина характеризует число актов вза-

имодействия, происходящих в образце за одну секунду в расчете на одно ядро изотопа детектора. Еще немаловажными требованиями являются степень обрабатываемости и химическая чистота материала детектора.

Библиографический список

- 1. Крамер-Агеев Е.А.** Активационные методы спектрометрии нейтронов / Е.А. Крамер-Агеев, В.С. Трошин, Е.Г. Тихонов. - М.: Атомиздат, 1976. - 232 с.: ил. - Библиогр.: с.222-232.
- 2. Ломакин, С.С.** Радиометрия нейтронов активационным методом / С.С. Ломакин, В.И. Петров, П.С. Самойлов. - 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 141 с.
- 3. Маслов И.А.** Справочник по нейтронному активационному анализу / И.А. Маслов, В.А. Лукницкий; АН СССР, Отд-ние ядерной физики. - Л.: Наука. Ленингр.отд-ние, 1971. - 312 с.: граф. - Библиогр.: с.301-307.
- 4. Гордеев, И.В.** Ядерно-физические константы [Текст]: Справочник / И.В. Гордеев, Д.А. Кардашев, А. В. Малышев. - [2-е изд.]. – Москва: Госатомиздат, 1963. - 507 с.
- 5. Вандекастеле К.** Активационный анализ с использованием заряженных частиц: Пер.с англ. / К. Вандекастеле. - М.: Мир, 1991. - 208 с.: ил. - Библиогр.: с.190-191.

УДК 621.371.391.2

С.С.Румянцев

АО «Моринсис-Агат-КИП»

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ TDR В ПЕРВОМ КОНТУРЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Измерение уровня теплоносителя в первом контуре ядерных энергетических установок типа ВВРД является узкоспецифической технической задачей, которая связана с работой в условиях высокого уровня радиации, вибрационных нагрузок, а также повышенной температуры и давления. Первый контур непосредственно контактирует с активной зоной реактора, вследствие чего электронное оборудование невозможно разместить не только непосредственно в объеме самого контура, но также и вблизи его элементов: трубопроводов, резервуаров и т.д. Для безопасности эти части ядерной энергетической установки располагаются в отдельных закрытых помещениях.

Решение задачи измерения уровня теплоносителя предлагается путем использования технологии TDR (рефлектометрия во временной области). Метод основан на том, что зондирующий сигнал посылается в чувствительный элемент, и по времени задержки эхо-сигнала, отраженного от границы раздела среды, производится вычисление уровня жидкости в резервуаре. Электронный блок располагается в «чистой зоне» помещении с нормальным уровнем радиации и климатическими условиями. Подводящий кабель, соединяющий электронную часть с первичным преобразователем, длиной до 30 метров расположен в «грязной» зоне первого контура, причем его соединение с электронным блоком происходит с помощью переходной муфты – коаксиального перехода, вмурованного в стену, разделяющую «чистое» и «грязное» помещения. Непосредственно на корпусе резервуара первого контура ядерной энергетической установки располагается первичный преобразователь, в состав которого входят два изолятора и чувствительный элемент, представляющий собой жесткую фазостабильную коаксиальную линию, выполненную в виде стальной или титановой трубки со стержнем внутри. Модульная конструкция чувствительного элемента позволяет проводить монтаж в условиях ограниченного сверху пространства над резервуаром ядерной энергетической установки и при необходимости наращивать длину, в зависимости от конкретной задачи.

Предлагаемое решение позволяет обеспечить надежную работу системы измерения уровня в ядерной энергетической установке. При этом применение двойного изолятора исключает возможность разгерметизации за счёт двойного изолятора, одновременно выполняющих роль маркера начала чувствительного элемента на рефлектограмме, а электронный блок оказывается защищен от влияния радиоактивного излучения, высокой температуры, давления и других неблагоприятных факторов.

Библиографический список

- 1.Тренкаль Е.И. Измерение уровней жидкости методом импульсной рефлектометрии (обзор) / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лоцилов // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 67–73.
- 2.Корячко В.П. Математическая модель рефлектометрического уровнемера для измерения уровня воды в контуре ядерной энергетической установки / В.П.Корячко, С.С.Румянцев, Л.В.Аронов //Вестник РГРТУ. Рязань. РГРТУ. 2023. Вып. 2 (84). С. 157-165.
- 3.Корячко В.П. Имитационное моделирование калибровки импульсного рефлектометрического уровнемера с помощью реперных меток [Текст] / В.П.Корячко, С.С.Румянцев, Л.В.Аронов // Цифровая обработка сигналов – 2023. – № 2. – с. 64-69.

**Н.О. Заузолкова¹, Т.С. Сабурин¹, А.В. Пахомов¹,
А.Н. Семенов¹**
НГТУ им. Р.Е. Алексеева¹

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВОЙСТВ НЕЙТРИНО

В настоящее время свойства нейтрино представляют большой интерес как для научных исследований, так и для атомной промышленности (дистанционный контроль за наработкой плутония-239 в промышленных ядерных реакторах).

Как известно, бета-распад (β - распад) – это самопроизвольное превращение ядер, сопровождающееся испусканием (или поглощением) электрона и антинейтрино или позитрона и нейтрино [1]. Данный вид распада ядер, называвшийся первоначально процессом «испускания бета-лучей», открыт А. Беккерелем в 1896 году в цепочке радиоактивных превращений урана. В 1930 году В. Паули предположил, что при бета-распаде одновременно с электроном рождается очень лёгкая нейтральная частица. Эту частицу назвали – нейтрино [2].

Без малого сто лет человечеству известна эта частица и, в то же время, нам до сих пор не известны многие свойства нейтрино. Нейтрино относятся к классу лептонов и имеет очень малую, но не нулевую, массу (верхняя граница – 0,28 эВ, при этом, например, масса электрона составляет 511 кэВ). Особенностью нейтрино является крайне высокая проникающая способность при низких энергиях и значительное её уменьшение с возрастанием энергии. Высокая проникающая способность порождает низкое сечение захвата, поэтому, даже такие объекты как звёзды для нейтрино прозрачны. Основным источником потока нейтрино, падающего на Землю, является Солнце.

Исследования в области физики нейтрино проводятся с помощью использования современных энергетических ядерных реакторов, являющихся искусственными высокоинтенсивными источниками электронного антинейтрино. Успехи в детектировании антинейтрино большими детекторами позволили перейти к созданию компактных недорогих детекторов, направленных на внедрение в промышленную ядерную энергетику нейтринного метода контроля активной зоны ядерного реактора с целью обеспечения контроля безопасности эксплуатации ядерных установок и гарантий нераспространения ядерных материалов, особенно в странах, не обладающих ядерным оружием.

Возможных применений нейтрино в научно-практических областях много, однако для того, чтобы полноценно использовать все уникальные свойства этой загадочной частицы, необходимо исследовать и понять физику нейтрино, по-

нять механизмы взаимодействия в тех или иных случаях. При взаимодействии нейтрино высоких энергий с веществом длина свободного пробега и энергия частицы снижается относительно взаимодействия в веществе. В качестве примера можно рассмотреть поток космических нейтрино, входящих в атмосферу Земли, а затем поток нейтрино, прошедший через центр Земли и вступивший в реакции с веществом внутренних оболочек планеты [3]. На основе детектирования и сравнительного анализа этих потоков можно составить распределение плотных и неплотных компонентов вещества планеты.

Библиографический список

1. Бета-распад// studfile.net URL: <https://studfile.net/preview/6284241/page:120/> (дата обращения: 15.09.2023).
2. Гапонов Ю. В. БЕТА-РАСПАД // Большая российская энциклопедия. Том 3. Москва, 2005, стр. 432-433.
3. В чем уникальность нейтрино и какие тайны они могут нам открыть // strana-rosatom.ru URL: <https://strana-rosatom.ru/2019/12/04/neulovimye-nejtrino/> (дата обращения: 15.09.2023).

УДК 621.039

**М.Д. Погорелов, Т.А. Бокова, Н.С. Волков, А.Р. Маров,
Р.В. Сумин, Т.К. Зырянова**
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА ДВОЙНОГО ВЗАИМООБРАТНОГО ЦЕЛЕВОГО ДРОССЕЛИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЖМТ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ СПЛАВА 250 °С

Одним из наиболее важных вопросов при создании инновационных ядерных установок исследовательского или промышленного класса является обеспечение надёжной и безопасной работоспособности оборудования и его элементов. Ввиду особенностей тяжёлого жидкометаллического теплоносителя, – необходимости поддержания температуры и приемлемой термодинамической активности кислорода в контуре – становится необходимым рассмотрение и исследование поведения элементов основного оборудования для нормальных и аварийных режимов эксплуатации [1].

Существенную долю в составе контуров энергетических и исследовательских установок составляет насосное оборудование. В насосах для перекачки тяжёлых жидкометаллических теплоносителей наилучшим образом себя зарекомендовали гидростатические подшипники, однако целостной методики их расчёта для специфики используемого теплоносителя сформировано не было [2].

В целях корректировки уже имеющихся методов расчёта гидростатических подшипников для условий низких температур эксплуатации среды тяжёлых жидкометаллических теплоносителей – конкретно, свинец-висмутового теплоносителя, коллективом исследователей была проведена серия экспериментальных работ по данной теме, построена гидравлическая характеристика ГСП (рисунок 1) при не вращающемся вале, на основании которой в дальнейшем возможна корректировка расчетной методики гидростатического подшипника, отработана методика снятия гидравлических характеристик ГСП на исследовательском стенде.

Данный стенд обеспечивает циркуляцию эвтектического сплава свинец-висмут через модели ГСП и другие трассы, работоспособность систем газа, контроля, регулирования параметров и электроснабжения стенда и выполнение других операций согласно программам испытаний.

В дальнейших испытаниях будет построена гидравлическая характеристика ГСП при различных частотах вращения вала экспериментального участка, а также измерена грузоподъемность ГСП с помощью подготовленного устройства радиального нагружения вала ГСП.

Библиографический список

1. Безносков, А.В. Технологии и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями: учеб.пособие / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков ; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, Литера, 2016. – 488 с..
2. Исследования подшипников скольжения насосов реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем при относительно низких температурах / Т. А. Бокова, П. А. Боков, А. Р. Маров, Н. С. Волков // Трибология - машиностроению : Труды XIII Международной научно-технической конференции, Москва, 14–16 октября 2020 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2020. – С. 33-37.

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0005 «Особенности и специфика применения тяжёлых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

УДК 621.039.517.5

В.А. Горбунов, С.С. Теплякова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗА СЧЕТ ИХ КОНСТРУКТИВНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) является главным конструктивным элементом активной зоны ядерного реактора, представляющий собой герметичную трубку из сплава циркония с ниобием, которую заполняют таблетками из двуокиси урана (UO_2)[1].

В работе проведены исследования эффективности эксплуатации тепловыделяющих элементов активной зоны водо-водяных реакторов (ВВЭР), заполненных таблетками из диоксида урана (UO_2), а также трехмерное моделирование энерговыделения ТВЭЛОВ. Определяющими параметрами выбраны технические ограничения по безопасной эксплуатации тепловыделяющих сборок (ТВС). Работа выполнена с использованием численного пакета теплофизического моделирования – программного комплекса COMSOL Multiphysics [2].

В табл. 1 представлены результаты исследования влияния максимальной удельной мощности ТВЭЛА $Q_{уд}$, выделяемой в кубометре топлива, с учетом радиационного теплообмена в 3D-модели ТВЭЛА в зависимости от различных параметров.

Таблица 1

**Результаты исследования влияния
максимальной удельной мощности ТВЭЛА $Q_{уд}$, МВт/м³**

Диаметр отверстия в таблетке, мм	0	1,5	2,3	3	4	5
$Q_{уд}$ по температуре топлива, МВт/м ³	715	820	950	1118	1500	2275
$Q_{уд}$ по температуре оболочки, МВт/м ³	434	472	509	563	668	862
Объем топлива в ТВЭЛЕ, м ³	1,67E-4	1,60E-4	1,52E-4	1,41E-4	1,21E-4	9,47E-5

Доля увеличения содержания урана-235 UO_2 в топливе для сохранения запаса энергии в ТВЭЛе	1,000	1,040	1,100	1,180	1,380	1,760
$Q_{уд}$ по температуре топлива с одинаковым запасом энергии внутри ТВЭЛа, МВт/м ³	715,0	788,5	863,6	947,5	1087,0	1292,6
$Q_{уд}$ по температуре оболочки с одинаковым запасом энергии внутри ТВЭЛа, МВт/м ³	434,0	453,8	462,7	477,1	484,1	489,8

Расчеты показывают, что за счет дополнительного обогащения ураном-235 с увеличением диаметра отверстия топливных таблеток при фиксированной тепловой мощности ТВЭЛа снижается коэффициент неравномерности температурного поля по высоте активной зоны реактора.

На рис. 1 изображены зависимости удельной мощности, выделяемой в кубометре топлива и оболочке ТВЭЛа от диаметра его отверстия. Получены уравнения, отражающие зависимости удельной мощности, выделяемой на кубометр топлива от диаметра отверстия внутри таблеток топлива при максимальном тепловом потоке.

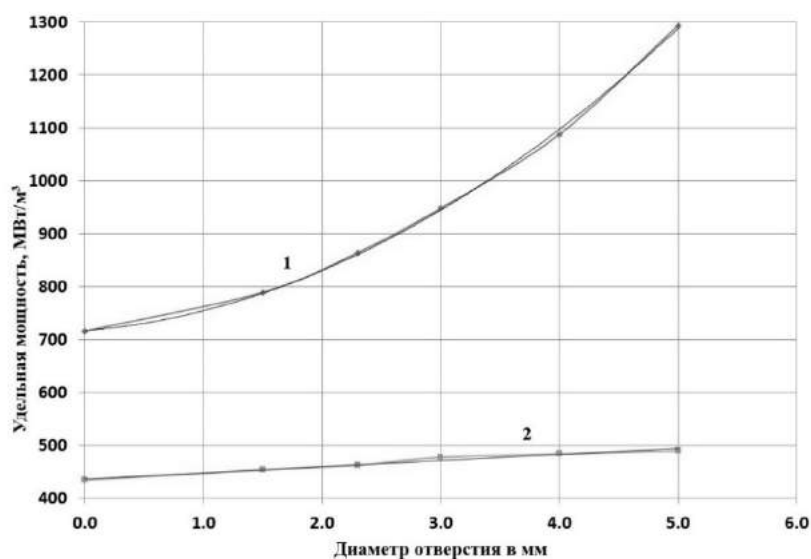


Рис. 1. Зависимости удельной мощности, выделяемой в кубометре топлива и оболочке ТВЭЛа от диаметра его отверстия:

- 1 – максимально допустимая удельная мощность, выделяемая в топливе UO_2 ;
- 2 – максимальная удельная мощность, выделяемая в ТВЭЛе, без превышения допустимой температуры его оболочки;

В результате исследования найдены оптимальные параметры ТВЭЛа, обеспечивающие минимальный коэффициент неравномерности по высоте активной зоны реактора: диаметр отверстия топливной таблетки составляет 5 мм, а доля обогащения топлива ураном-235 увеличена в 1,76 раза.

Библиографический список

1. Горбунов В.А., Андрианов С.Г., Коновальцева С.С. Оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей твэлов различного конструктивного исполнения // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2021. – № 2. – С. 23-31. – DOI 10.17588/2072-2672.2021.2.023-031.
2. Горбунов В.А., Теплякова С.С., Лоншаков Н.А., Андрианов С.Г., Минеев П.А. Исследование влияния конструктивного параметра тепловыделяющего элемента на коэффициент неравномерности теплового выделения по высоте реактора ВВЭР-1000 // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2023. – № 2. – С. 27-40. – DOI 10.26583/npe.2023.2.03.

УДК 620.9, 519.2

В.А. Горбунов, С.С. Теплякова, М.Н. Мечтаева, П.А. Минеев
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И.Ленина»

КЛАСТЕРНЫЙ И ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ В ПРОЦЕССЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА КАЛИНИНСКОЙ АЭС

В настоящее время большое внимание уделяется повышению эффективности эксплуатации турбопитательных насосов (ТПН). Для этого необходимо провести оценку влияния эксплуатационных параметров. Проблема состоит в том, что необходимо обработать большой массив данных. Решением этой проблемы является применение методики, которая позволяет выполнить количественную и качественную оценку эксплуатационных параметров [1,2].

В качестве исходных данных использовались данные 20 термодинамических и гидравлических параметров, регистрируемых во время промышленной эксплуатации оборудования ТПН и уравнения тепловых балансов для нахождения основных показателей эффективности работы ТПН. Для обработки данных используется комплекс многомерных статистических методов: кластерный и факторный анализ в программном пакете Statistica.

В соответствии с проведенным факторным и кластерным анализами определен ряд параметров, существенно влияющих на целевую функцию и эффективность эксплуатации части системы собственных нужд энергоблока – системы турбопитательных насосов.

К ним относится группа параметров:

- 1) Массовый расход питательной воды за питательным насосом ТПН;
- 2) Перепад давления воды на турбопитательном насосе ТПН;
- 3) Массовый расход конденсата приводной турбины ТПН;
- 4) Температура паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН;
- 5) Температура конденсата приводной турбины;
- 6) Температура пара на эжекторы ТПН от РОУ 14/6 и деаэраторов.
- 7) Давление пара в конденсаторе ТПН;
- 8) Температура пара перед ГПЗ ТПН;
- 9) Давление пара на эжекторы ТПН от РОУ 14/6 и деаэраторов;
- 10) Температура пара на уплотнения ТПН.

Системы регенеративного подогрева воды также относятся к системам нормальной эксплуатации, важным для безопасности на ТЭС и АЭС. Системы регенерации имеют структуру, которая включает в себя: подогреватели низкого давления, деаэратор, подогреватели высокого давления и перекачивающие конденсатные и питательные насосы.

Целью работы является анализ параметров, существенно влияющих на целевую функцию и эффективность эксплуатации системы регенеративного подогрева АЭС, а именно системы регенерации высокого давления. Объектом анализа являлась система подогревателей высокого давления, которая предназначена для работы в составе турбоустановки мощностью 1000 МВт с турбиной К-1000-60/3000.

Система регенерации высокого давления турбины К-1000-60/3000 выполнена с нагревом воды в двух параллельно включенных по пару и питательной воде и работающих независимо одно от другой группах ПВД типа К-2470-12-2,84 Подольского Машиностроительного завода.

В качестве исходных данных использовались данные 15 термодинамических и гидравлических параметров, регистрируемых во время промышленной эксплуатации оборудования. В ходе работы выполнен предварительный анализ экспериментальных параметров системы регенерации высокого давления. В качестве целевой функции предварительно выбраны: коэффициент изменения мощности (КИМ) и коэффициент ценности теплоты (КЦТ).

Результаты, полученные для системы турбопитательных насосов, показали отличную верификацию. Путем исследования были выявлены определен ряд параметров, существенно влияющих на целевую функцию и эффективность эксплуатации системы регенерации высокого давления.

К ним относится группа параметров:

- 1) Давление пара в подогревателе высокого давления;
- 2) Температура пара отбора на подогреватель высокого давления.

Полученные результаты будут применены для разработки наиболее экономичных режимов его работы на основе нейросетевого моделирования, что способствует повышению эффективности эксплуатации энергоблока АЭС.

Библиографический список

1. Давыдянец Д.Е., Жидков В.Е., Ядыкин В.С., Шейченко Ю.И., Жидков А.В. Методика факторного анализа влияния характеристик энергетического оборудования (коэффициента мощности и коэффициента полезного действия) на энергосбережение и энергоэффективность // Kant. – 2013. – № 2(8). – С. 51-57.
2. Горбунов В.А., Теплякова С.С., Лоншаков Н.А., Андрианов С.Г., Мечтаева М.Н., Минеев П.А. Методика оценки влияния эксплуатационных параметров на работу турбопитательного насоса // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 4. – С. 14-23.

УДК 620.9

**В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, С.С. Теплякова,
М.Н. Мечтаева, П.А. Минеев**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И.Ленина»

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВТОРОГО КОНТУРА АЭС

Одним из путей решения проблемы повышения энергоэффективности ТЭС и АЭС является создание цифровых двойников технологического оборудования и систем на основе архивных данных, накапливаемых в течение длительного срока эксплуатации электростанций. Информация, получаемая от разработанных цифровых двойников, позволит: исследовать возможности совершенствования режимов работы оборудования в различных эксплуатационных условиях, не требуя проведения активного промышленного эксперимента; проводить диагностику эффективности эксплуатации оборудования и систем в режиме реального времени; оказывать информационную поддержку эксплуатационному персоналу в режиме реального времени; определять технически обоснованные нормы расхода энергии потребителей собственных нужд; оценить качество проведения ремонтов и модернизации.

В работе приведены результаты создания и внедрения в опытно-промышленную эксплуатацию программных комплексов, вычислительными

модулями которых являются цифровые двойники питательных турбонасосов (ПТН) и вакуумных систем четырех энергоблоков АЭС (рис. 1).

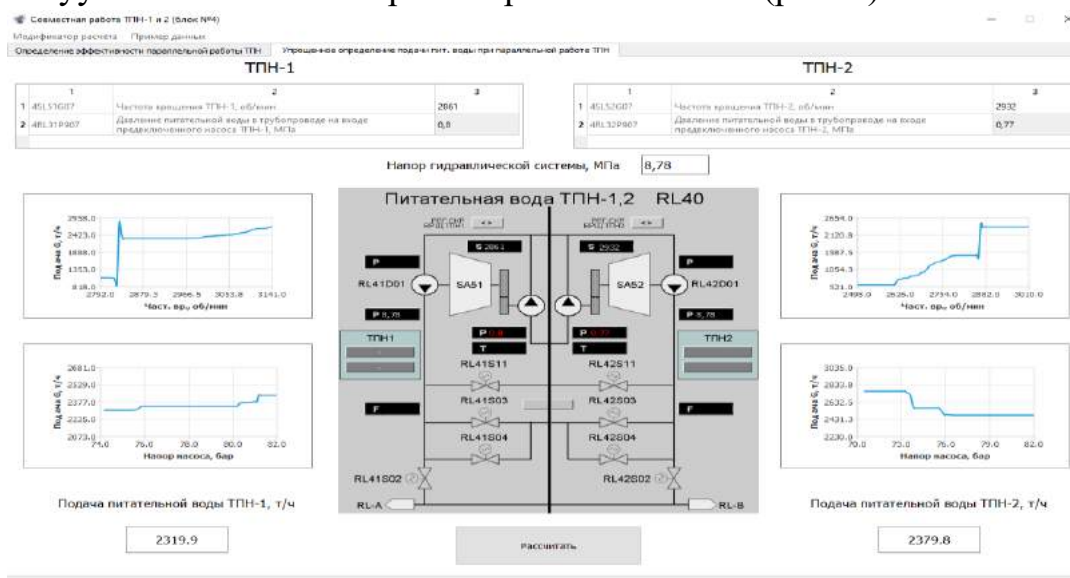


Рис.1. Интерфейс программного комплекса по анализу параллельной работы двух питательных турбонасосов одного энергоблока

Цифровые двойники разработаны на основе технологии машинного обучения, в частности использован метод создания и обучения искусственных нейронных сетей. Для удобства взаимодействия с полученными математическими моделями разработаны кроссплатформенные программные комплексы, обладающие базовым набором функций, востребованных в ходе промышленной эксплуатации на электростанции.

Эффективность эксплуатации питательных турбонасосов оценивалась по термодинамическому КПД и удельному расходу тепловой энергии брутто, отпускаемой на работу приводной турбины из отбора энергетической турбины блока или коллектора собственных нужд станции [1].

Критерием оценки вакуумной системы энергетической турбины энергоблока служила величина экономического вакуума, зависящая от времени года, расхода пара в конденсатор, работы пусковых и основных эжекторов и др.

В ходе анализа энергоэффективности работы питательных турбонасосов были определены технически обоснованные нормы для каждого ПТН с учетом индивидуальных особенностей эксплуатации (табл. 1).

На текущем этапе исследования установлена теоретическая возможность снижения затрат энергии собственных нужд, отпускаемых на работу ПТН, в среднем на 6%. Достижение экономического вакуума в конденсаторе энергетической турбины блока при различных эксплуатационных режимах даст среднюю прибавку к мощности в 7 МВт.

Таблица 1

Технически обоснованные нормы расхода тепловой энергии для четырех питательных турбонасосов двух блок электростанции

Оборудование	Средние удельные затраты тепловой энергии на работу, кДж/кг	Технически обоснованные средние удельные затраты тепловой энергии на работу, кДж/кг
ПТН №1 блок №1	50,46	46,23 (-8,4 %)
ПТН №2 блок №1	47,69	44,18 (-7,4 %)
ПТН №1 блок №2	54,68	51,92 (-5 %)
ПТН №2 блок №2	45,27	43,01 (-5 %)

1.Горбунов В.А., Теплякова С.С., Лоншаков Н.А., Андрианов С.Г., Мечтаева М.Н., Минеев П.А. Методика оценки влияния эксплуатационных параметров на работу турбопитательного насоса // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 4. – С. 14-23.

УДК 621.039

Андреев Т. А., Арбузова С. М., Власичев Г. Н.

Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева

**СПЕЦИФИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТВОРНОГО ЯДЕРНОГО
ТОПЛИВА В РЕАКТОРАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

В России данный вид топлива применяется в импульсных ядерных реакторах серии ВИР. В активной зоне (АЗ) реактора используется топливо на основе соли уранил-сульфат UO_2SO_4 , растворённой в воде. Делящимся материалом является уран с повышенным до 90 % содержанием изотопа ^{235}U . Во всех реакторах серии ВИР в течение всего времени их эксплуатации почти всегда используется один и тот же раствор соли UO_2SO_4 . Свойства данного топлива практически не изменились. Выгорания урана в топливе за срок его использования почти нет (менее 0,05 %). При работе реактора происходит радиолиз воды. Основной продукт радиолиза – гремучий газ, стехиометрическая смесь водорода и кислорода. При импульсах с энерговыделением ~ 60 МДж (и больше) выделение гремучего газа носит взрывной характер, что приводит к разлёту топлива, его удару по крышке корпуса АЗ и значительным кратковременным напряжениям в материале корпуса, способным вызвать остаточные деформации. Выделение гремучего газа – ключевой фактор при выработке требований по соблю-

дению условий генерации импульсов, выполнение которых снижает вероятность остаточных деформаций, при расчётах прочностных характеристик корпусов АЗ и при установлении их ресурсных показателей. Расчётные оценки срока службы корпуса АЗ (до 100 лет) и реально измеренные деформации корпуса позволяют прогнозировать полный срок его службы не менее 300 месяцев (25 лет). Давление гремучего газа, выделяющегося при работе реактора, пропорционально энерговыделению в АЗ, что позволяет контролировать величину энерговыделения. Для измерения давления гремучего газа и сжигания накапливающегося гремучего газа служит специальное оборудование. Сжигание гремучего газа осуществляется путём временного подключения к газовому объёму корпуса АЗ специальной камеры поджига, снабжённой искровыми или накаливаемыми электросвечами; вода, образующаяся при сжигании гремучего газа, возвращается обратно в раствор. При эксплуатации каждого реактора серии ВИР весь раствор всегда находится внутри корпуса АЗ. Постоянная компактность раствора определяет сравнительно неглубокую степень подкритичности заглушенного реактора, но зато сводит к нулю возможность ошибочного увеличения количества ядерного горючего и замедлителя в АЗ или возможность радиоактивного загрязнения при проливе раствора во время его регулярных сливов-заливов. Постоянное нахождение раствора внутри герметичного корпуса АЗ существенно снижает также потери воды раствора в виде пара или гремучего газа.

1. Харитон Ю. Б., Воинов А. М., Колесов В. Ф. и др. Апериодические исследовательские импульсные реакторы/ Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. Л: Наука, 1984. С. 103–119.

УДК 621.039

Д. А. Ожигин, Н. Г. Андреев, Громова П.Е.

Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева

**ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ
К ДВУХЦЕЛЕВЫМ ТРАНСПОРТНЫМ УПАКОВОЧНЫМ
КОМПЛЕКТАМ ДЛЯ РУ РИТМ-200Н**

Транспортировка и хранение отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) – необходимый этап эксплуатации атомной электростанции. Для этого проектируются и изготавливаются специальные контейнеры, различающиеся своими характеристиками и применяющиеся для транспортирования отработавших топливных сборок определенного типа.

Задание на разработку транспортного упаковочного комплекта (ТУК) для РУ РИТМ-200Н включает следующие требования:

1. ТУК должен удовлетворять общим требованиям безопасности по ГОСТ 12.2. [003-91](#) и ГОСТ 12.3. [002-2014](#).

2. Персонал, допущенный к работе с ТУК, должен пройти проверку знаний по его устройству и эксплуатации.

3. ТУК должен соответствовать требованиям безопасности, предусмотренным НП- [061-05](#), в части касающейся транспортирования и хранения ОЯТ в ТУК.

4. ТУК должен соответствовать требованиям безопасности упаковки при транспортировании в обычных, нормальных и аварийных условиях, изложенным в НП- [053-16](#) (требования к упаковкам типа В(U)) [1].

5. Температура внешней поверхности ТУК при перевозке и при хранении должна быть не более плюс 85 °С на условиях исключительного использования и не более плюс 60 °С при обращении на посту загрузки ТУК.

6. Требования к упаковке (ТУК) при временном технологическом хранении в части обеспечения радиационной защиты для нормальных условий эксплуатации: - максимальный уровень излучения не должен превышать 0,1 мЗв/ч на расстоянии 2 м от поверхности ТУК;

- максимальный уровень излучения в любой точке внешней поверхности упаковки не должен превышать 2 мЗв/ч;

- максимальный уровень излучения в любой точке внешней поверхности упаковки при перевозке на условиях исключительного использования должен быть не более 10 мЗв/ч.

Конструкциями чехлов должна быть обеспечена ядерная безопасность с $K_{эфф} < 0,95$ в условиях нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и проектных авариях.

7. Все работы, связанные с ТУК во время эксплуатации, должны проводиться с разрешения службы радиационной безопасности.

8. Конструкция ТУК и применяемые материалы должны обеспечивать минимальные объемы, массы и активности радиоактивных отходов, а также позволять проведение отмывки и дезактивации и полного удаления отмывочных и дезактивирующих растворов и внутренних полостей.

Соблюдение приведенных требований обеспечивает безопасность при эксплуатации ТУК, как при хранении, так и при транспортировании ОЯТ с атомной станции малой мощности с реакторной установкой РИТМ-200Н.

1. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов [Текст] : НП-053-16: утв. приказом Федеральной службы по эко-

логическому, технологическому и атомному надзору 15.09.2016 : ввод в действие с 05.02.2017. – М. : центрмаг, 2022. – 138 с.

УДК 621.039

РАКОВА Д.И., АНДРЕЕВ В.В., ТАРАСОВА Н.П.

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

**ПОЛУЧЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ
ДЛЯ УСКОРЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КРИВЫХ
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОНТУРОВ**

Одной из основных задач гидравлики является определение гидравлического сопротивления циркуляционного контура для того, чтобы определить требуемый напор насосов, или выбрать диаметр трубопроводов, обеспечивающих подачу требуемого количества жидкости при располагаемом напоре. Сопротивление трубопровода складывается из затрат энергии на преодоление трения жидкости о стенки трубы по всей ее длине и на преодоление сопротивления в отдельных местах потока, где наблюдается его деформация (задвижки, повороты, резкие сужения или расширения трубы и т. п.)

Экспериментами установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления зависит от числа Рейнольдса и от относительной шероховатости. Установлено, что при больших числах Рейнольдса и высокой шероховатости коэффициент гидравлического сопротивления в трубах практически не зависит от вязкости жидкости (числа Рейнольдса), а зависит только от относительной шероховатости. Трубы же, в которых коэффициент гидравлического сопротивления зависит только от числа Рейнольдса и не зависит от относительной шероховатости, называют гидравлически гладкими.

В практических условиях, при больших числах Рейнольдса, трубы не могут рассматриваться как гидравлически гладкие. Шероховатость стенок труб приводит к тому, что сопротивление получается более высоким, чем это следует из уже полученных формул для гладких труб.

При выполнении данной работы были собраны результаты различных экспериментов, опубликованных в литературе, по определению кривой гидравлического сопротивления для различных циркуляционных систем и сред, циркулирующих по этим системам. Рассматривая опубликованные в литературе зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для разных видов теплоносителей (газ, жидкий металл, вода и т.д.), а также для

различной геометрии канала можно видеть, что указанные зависимости в общем случае обладают определенным сходством. Результаты исследований показывают, что зависимость близка к логарифмической. Учитывая сходный характер поведения зависимостей гидравлического сопротивления, предприняты попытки обобщить имеющиеся данные. Формирование на основе этих результатов базы данных с величинами коэффициентов гидравлического сопротивления и соответствующими им числами Рейнольдса, позволит сопоставить эти значения для большого количества кривых гидравлического сопротивления, в результате чего могут быть получены функциональные зависимости приведенных параметров. В трёхмерной системе координат, образованной осями приведенное гидравлическое сопротивление, приведенное число Рейнольдса, и приведенное значение угла наклона кривой гидравлического сопротивления, спрямленной в логарифмической системе координат исходная кривая гидравлического сопротивления представляется в виде точки. Преобразовав, таким образом, большое количество кривых гидравлического сопротивления, можно получить совокупность точек в пространстве приведенных параметров гидравлического сопротивления в форме обобщенной зависимости. Такая зависимость позволяет сократить объем необходимых экспериментальных работ по определению гидравлического сопротивления при проектировании сложных контуров циркуляции

Библиографический список

1. **В. В. Андреев, В.О. Фурман, И.В. Демарев, Н.С. Любавин.** Прогнозирование показателей гидравлического сопротивления на основе методологии обобщённого анализа.
2. **Одельский Э. Х.** Гидравлический расчет трубопроводов разного назначения. Минск, «Вышэйш. школа», 1967. 103 стр.

УДК 621.039

Арбузова С. М., Андреев Т.А., Власичев Г. Н.

Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева

РАЗВИТИЕ КОРПУСОВ АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ СЕРИИ ВИР

Активная зона (АЗ) каждого реактора ВИР представляет собой композицию корпуса АЗ – герметичного толстостенного сосуда из нержавеющей стали

– с залитым в него объёмом топлива, в котором при определённых условиях можно инициировать управляемую цепную ядерную реакцию деления.

Кроме выполнения функции контейнента для топлива, задачами корпуса АЗ являются также:

– придание топливу компактной и легко повторимой формы для обеспечения заданных значений интенсивных потоков нейтронов и гамма-квантов при минимально возможном количестве ядерного материала;

– сведение к минимуму влияния внешнего окружения на реактивность АЗ;

– способность многие годы выдерживать высокие нагрузки, возникающие в топливном растворе в результате быстрого выделения большой энергии и гремучего газа при генерации мощных импульсов делений.

Через корпус АЗ любого реактора серии ВИР параллельно его оси проходят трубчатые каналы; часть из них («стержневые каналы») – для размещения стержней регулирования реактивности (СУР), в другую часть («экспериментальные каналы») можно загружать испытываемые объекты. Реактор ВИР-1 (работал меньше года) фактически был опытным вариантом реактора ВИР-1М (4 года); так же реактор ВИР-2 (кампания – около 8 лет) стал опытным вариантом реактора ВИР-2М; последний работает уже почти 30 лет и будет работать, по планам, ещё не менее 5 лет.

Конструкция корпусов АЗ реакторов изменялась в направлении увеличения объёмов внутренних экспериментальных полостей для размещения облучаемых объектов, а также в направлении обеспечения роста уровней реакторных излучений в этих полостях.

-
1. Харитон Ю. Б., Воинов А. М., Колесов В. Ф. и др. Апериодические исследовательские импульсные реакторы/ Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. Л: Наука, 1984. С. 103–119.

УДК 621.039

К.Г. Галстян, Н.Г. Катков, В.В. Андреев

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЁТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТУРОВ

Программное обеспечение для гидравлического расчета трубопроводов предоставляет инженерам инструменты для проведения точных и надежных расчетов, учитывая различные параметры и условия проекта. Оно помогает со-

кратить время и ресурсы, которые требуются для выполнения гидравлического расчета вручную и способствует более эффективному проектированию и эксплуатации трубопроводов.

Комплексный анализ программного обеспечения для расчета гидравлического сопротивления контуров включает в себя оценку функциональности, точности, удобства использования, гибкости, надежности, поддержки и обновлений, а также совместимости.

Программа «Гидросистема» позволяет проводить расчет скорости перекачиваемого продукта, потерь давления на трение и местные сопротивления, свойств продукта, кавитационного запаса и других параметров для каждого элемента трубопровода. Точность расчета обеспечивается автоматическим пересчетом свойств продукта и режимов течения на каждом участке, а также детальным расчетом прямых труб и местных сопротивлений с учетом режима течения в соответствии со справочником Идельчика и современными методами расчета многофазных течений. Результаты расчета можно визуализировать на расчетной схеме с использованием цветового выделения, показывающего элементы, ответственные за наибольшие гидравлические потери.

Рассмотренная программа, предлагают высокую точность расчетов гидравлического сопротивления и широкий выбор методов расчета. Однако, имеют свои недостатки, такие как сложный интерфейс, высокая стоимость программного обеспечения. Сложными для подсчетов также становятся трассы с нестандартными элементами, которые отсутствуют в каталогах программы.

При выборе программы для расчета гидравлического сопротивления необходимо учитывать эти факторы и выбирать программу, которая лучше соответствует конкретным потребностям и возможностям пользователя.

УДК 621.039

Кабиров Б. М., Аношкин Ю. И.

Нижегородский Государственный Технический Университет
им. Р. Е. Алексеева.

АККУМУЛЯТОРЫ ТЕПЛА, ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Выработка электрической энергии непосредственно связана с ее потреблением. Существуют способы ее запаса, но они реализуемы только при малом количестве энергии. Поэтому все выработанное электричество должны быть использовано в момент выработки, иначе это может привести к повышению частоты или напряжения в энергосети, что может негативно сказаться на потре-

бителях. Атомные электростанции изначально создавались для базисного режима работы. Это экономически оправдано большим капиталовложением. Однако использование ядерных реакторов на судовых установках, требуют развития увеличения диапазонов регулирования мощности. Атомный реактор вырабатывает огромное количество электроэнергии, но она не всегда может быть необходима. При этом снижение мощности вырабатываемой энергии негативно сказывается на технико-физических свойствах энергетической установки.

На данный момент существует несколько основных способов регулирования мощности это: вывод борной кислоты, системы управления и защиты, выгорающие поглотители и температурный эффект. Но данные способы регулирования нацелены, либо на поддержание заданной мощности, как выгорающие поглотители, либо имеют ряд негативных эффектов, таких как отравление активной зоны, не эффективное использование разделившихся нейтронов, термоциклические нагрузки.

Таким образом мы можем прийти к выводу, что нам необходимо новое техническое решение, которым могут стать аккумуляторы тепла.

Аккумулятором тепла называется устройство или совокупность устройств, обеспечивающее обратимые процессы накопления, хранения и выработки тепловой энергии в соответствии с требованиями потребителя. Процессы аккумуляции тепла происходят путем изменения физических параметров теплоаккумулирующего материала и за счет использования энергии связи атомов и молекул веществ.

В настоящее время основным теплоаккумулирующим материалом является вода из-за ряда преимуществ таких как: большая теплоемкость, низкая коррозионная активность, дешевизна. Но есть и значительные недостатки основным, из которых является малый диапазон рабочих температур. При атмосферном давлении от 0 °С до 100 °С, для увеличения температуры необходимо повышать давление в аккумуляторе тепла, что приводит к удорожанию установки. Исходя из этого можно сделать вывод, что вода является отличным теплоаккумулирующим материалом для работ в температурном диапазоне от 0 °С до 100 °С, но данный диапазон слишком мал для атомных станций, поэтому следует рассмотреть альтернативы.

На сегодняшний день в качестве теплоаккумулирующего материала рассматриваются синтетические масла, растворы солей, жидкие металлы, органические соединения. Все они имеют более широкий диапазон рабочих температур. Но при использовании данных материалов так же возникают трудности, такие как: распад из-за термоциклических нагрузок у масел и органических соединений, высокая коррозионная активность у большинства растворов солей и

жидких металлов, а также возможное загрязнение второго контура теплоаккумулирующим материалом.

Библиографический список

1. **Бажанов, В. В.** Исследование работы АЭС с аккумуляторами тепловой энергии при регулировании мощности турбины в режиме разрядки / В. В. Бажанов, И. И. Лощаков. – СПб.: Энергетика, 2013. – С. 47 - 56.

2. **Бабаев, Б. Д.** Принципы теплового аккумулярования и используемые теплоаккумулирующие материалы / Б. Д. Бабаев. – Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 5. С. 760.

УДК 621.039

Сухарев М.С., Сатаев А.А.

НГТУ им. Р.Е. Алексеева

ТЕРМИЧЕСКИЕ, СОРБЦИОННЫЕ, МЕМБРАННЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И ИХ РАЗЛИЧИЯ

Переработка жидких радиоактивных отходов (ЖРО) направлена на решение двух главных задач: очистки основной массы отходов от радионуклидов и концентрирования последних в минимальном объеме. Для этого используют как минимум три группы методов: термические, сорбционные, мембранные.

Основные термические методы – дистилляция (упаривание) и сушка. Сушка обычно используется для подготовки (обезвоживания) концентратов радиоактивных отходов к отверждению. Дистилляция (упаривание) – широко распространенный метод переработки жидких отходов. В отличие от других методов дистилляция позволяет очистить конденсат от радионуклидов, находящихся в любой форме: ионной, молекулярной или коллоидной. Ограничивает очистку в этом случае только летучесть радионуклидов.

Сорбционные методы, предполагают поглощение радионуклидов твердой фазой по любому механизму: адсорбция, ионный обмен, сокристаллизация, окклюзия, адгезия и т.п. Сорбция проводится как в динамических, так и в статических условиях. Динамическая сорбция предполагает осуществление ее путем непрерывного фильтрования очищаемого раствора через слой сорбента. Статическая сорбция исключает направленное движение сорбента и очищаемого раствора относительно друг друга, а предполагает временный разовый контакт фаз (при перемешивании) с последующим их разделением.

Из мембранных методов для переработки ЖРО наибольший интерес представляют обратный осмос, электродиализ и ультрафильтрация. Эти методы заимствованы из практики опреснения засоленных вод, где основная задача сводится к разделению воды и соли. Такое разделение достигается избирательным прохождением через мембраны ионов (электродиализ) или воды (обратный осмос) под воздействием соответственно разности электрических потенциалов или перепада давления.

Библиографический список

1. Громов Б.В. Химическая технология обучения ядерного топлива. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Сборник докладов II Международного симпозиума по цементированию РАО «NUECSEM-2014», Франция, Авиньон-Маркуль (ICSM), 2-6 июня 2014 г.

УДК 621.039

Н.Г. Катков, Галстян К.Г., Андреев В.В.

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОНТУРОВ

Гидравлическое сопротивление является важным параметром для реакторных установок, так как оно определяет их теплотехническую надежность и безопасность эксплуатации. В связи с этим, актуальной задачей является измерение гидравлических характеристик циркуляционных контуров и разработка методов прогнозирования показателей гидравлического сопротивления.

Для измерения гидравлических характеристик циркуляционных контуров требуется проведение сложных экспериментальных исследований. Эти исследования могут быть разделены на различные этапы и уровни, включая использование обобщенного анализа. Однако, из-за высокой стоимости получения экспериментальных данных, необходимо также разработать методы прогнозирования показателей гидравлического сопротивления.

В настоящей работе демонстрируется возможность уточнения методов прогнозирования кривых гидравлического сопротивления путем применения процедуры обобщения экспериментальных данных.

Получение экспериментальных данных о гидродинамических параметрах проточных частей теплообменного оборудования и реакторных установок является важным этапом обеспечения эффективного проектирования и надежной работы основного технологического оборудования ядерных энергетических установок. Разработка методов прогнозирования показателей гидравлического сопротивления и использование обобщенного анализа позволяют улучшить точность и надежность оценки показателей гидравлического сопротивления сложных циркуляционных контуров.

УДК 621.039

КОРОЛЕВ А. В., ПОЛУНИЧЕВ В. И.

Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПЕРВОГО КОНТУРА РУ С ВВР

Система компенсации давления (КД) предназначена для создания и поддержания давления в первом контуре. В РУ с ВВР нашли применение две системы компенсации – паровая и газовая. Паровая система используется в РУ энергетических установок всего мира и зарубежных судовых установках, газовая – в отечественных судовых РУ.

Выбор варианта системы компенсации проводится не только по параметрам, характеризующим работу системы, но и по воздействию ее на параметры энергетической установки в целом. Такими показателями могут являться:

- точность поддержания давления на рабочих режимах;
- динамические характеристики установки;
- массогабаритные характеристики;
- водно-химический и газовый режим воды первого контура.

В работе выполнены краткий обзор существующих систем компенсации давления, сравнительный анализ основных характеристик каждого типа системы. В частности рассмотрены паровые системы компенсации давления РУ атомного ледокола «Ленин», атомного грузопассажирского судна США «Саванна», судна ФРГ «Отто Ган» атомного судна Японии «Муцу», газовые системы современных отечественных атомных судов и станций малой мощности.

Библиографический список

1. Горбатов, С. А. Системы компенсации давления в первом контуре аэс с водо-водяным энергетическим реактором / С. А. Горбатов, В. И. Полуничев // Материалы 8-ой международной конференции: Физико-техническая информатика (СРТ2020). — Нижний Новгород : Автономная некоммерческая организация в области информационных технологий "Научно-исследовательский центр физико-технической информатики", 2020. — С. 204-207.

УДК 621.039

ГРОМОВА П. Е., ОЖИГИН Д. А., ПОЛУНИЧЕВ В. И.

Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАМПАНИЙ КАССЕТНОЙ И КАНАЛЬНОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Судовая энергетика - одна из важнейших составных частей всей ядерной энергетике России [1, с. 10]. В реакторных установках отечественных атомных судов нашли применение активные зоны как канального, так и кассетного типа. В первом случае активная зона состоит из системы каналов, по которым движется основная поток теплоносителя. Каналы образуются специальными чехловыми трубами, внутри которых находятся стержневые тепловыделяющие элементы. Кассетная активная зона водо-водяного реактора состоит из набора кассет с чехлами шестигранной или квадратной формы, внутри которых размещаются твэлы. Вода, находящаяся между кассетами, занимает малую долю от общего объема теплоносителя-замедлителя [1, с. 54]. Одной из главных характеристик реактора является продолжительность его работы. Был проведен расчет кампании реактора, при одинаковых основных входных параметрах. В таблице 1 приведены параметры канальной и кассетной активных зон, которые были применены для расчета, а также сам результат расчета- кампания реакторы.

Таблица 1

Параметры активных зон канального и кассетного типа

Параметр	Активная зона кассетного типа	Активная зона канального типа
Средняя линейная мощность твэлов, кВт/м	3	3
Обогащение топлива, %	5	5
Высота активной зоны, м	2,9	2,9

Наружный диаметр твэла, м	0,0091	0,0091
Радиус активной зоны, м	1,21	1,21
Толщина оболочки твэла, м	0,000585	0,000585
Тип топлива	Диоксид урана	Диоксид урана
Материал оболочки твэлов	цирконий	цирконий
Номинальная тепловая мощность реактора, МВт	850	850
Количество тепловыделяющих сборок, шт.	85	85
Кампания реактора, лет	9,1	10,6

По результатам расчетов, при одинаковых входных параметрах, кампания реактора с кассетной активной зоной оказалась выше канальной, объяснить это можно тем, что объем топлива в кассетах получается больше, чем в каналах из-за плотной «упаковки» кассет. Это в свою очередь влияет на продолжительность работы реактора до следующей перегрузки топлива. Вследствии этого можно сделать вывод об экономичности данного выбора активной зоны.

-
1. Деев В. И., Шукин Н. В., Черезов А. Л. Основы расчета судовых ЯЭУ: Учебное пособие / Под общей редакцией проф. В. И. Деева. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 256 с.



svuz2023.ntnu.ru

