

ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

АО «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»

Научно-техническая конференция

ТЕПЛОФИЗИКА РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА – 2024

Тезисы докладов

16 – 19 апреля 2024 года

Обнинск



УДК 536.24:621.039.524.4:621.039.58

Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2024) / Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2024)», 16 – 19 апреля 2024 г., г. Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». — Обнинск : АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2024. – 186 с.

Научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения» («Теплофизика – 2024») проводится с 16 по 19 апреля на базе Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации – физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), который входит в научный дивизион Госкорпорации «Росатом» – АО «Наука и инновации»). Тематика конференции отражает наиболее актуальные научные и технические вопросы обоснования технологических, конструкторских решений и безопасности реакторов, действующих и проектируемых в нашей стране и в мире, ядерных энергетических установок для атомных станций, флота и космоса на тепловых и быстрых нейтронах, в том числе, термоядерных установок. Сборник тезисов докладов включает результаты фундаментальных, поисковых и прикладных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований в области гидродинамики, тепломассообмена в различных средах, а также физической химии и технологии различных жидкометаллических теплоносителей (Na, Na-K, Pb, Pb-Bi), а также использование рассматриваемых технологий в неядерных областях экономики России. На пленарном заседании состоится обсуждение путей развития современной атомной энергетики, решения актуальных проблем теплофизических исследований. На заседаниях тематических секций будут представлены доклады, освещающие современное состояние и новые результаты по широкому кругу ключевых вопросов теплофизики ядерных энергетических установок (ЯЭУ), включая гидродинамику и теплообмен в водоохлаждаемых реакторных установках и с жидкометаллическими теплоносителями (ЖМТ), физическую химию и технологию ЖМТ, тепломассообмен, магнитную гидродинамику, вибрацию и акустику в энергетических установках. Большое число докладов посвящено результатам разработки и валидации расчетных моделей, теплофизических кодов, их верификации и данным численного моделирования гидродинамики и тепло- и массопереноса в номинальных и аварийных режимах в обоснование безопасности ЯЭУ, результатам разработки и испытаний датчиков, систем контроля и оборудования для реакторных установок. Доклады участников конференции в дальнейшем планируется опубликовать в виде статей в реферируемых журналах. Конференция явится хорошей школой для молодых ученых и специалистов, аспирантов и магистрантов, из АО «Атомэнергoproject», АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», АО «ОКБМ Африкантов», АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС», АО «НИКИЭТ», НИЦ «Курчатовский институт», ИБРАЭ РАН, ОИВТ РАН, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», НИЯУ МИФИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», НГТУ, КБГУ и других организаций и вузов.

Сборник составлен на основе материалов, поступивших от авторов, без научно-технического редактирования.

Под общей редакцией

докт. техн. наук А.П. Сорокина

Технический редактор Н.А. Денисова

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные доклады

Актуальные аспекты исследований теплогидравлических процессов в реакторах на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением	10
<i>Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Дельнов В.Н., Денисова Н.А.</i>	
Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в каналах судовых ядерных энергетических установок	13
<i>Митрофанова О.В., Федоринов А.В.</i>	
Развитие легководной технологии на базе энергетических реакторов ВВЭР-СКД	16
<i>Пустовалов С.Б., Котов Я.А., Невиница В.А., Седов А.А., Субботин С.А., Фомиченко П.А.</i>	
Эвтектический сплав натрия-калий: достижения и проблемы	17
<i>Логинов Н.И.</i>	
Исследования массопереноса трития в контурах с натриевым теплоносителем	18
<i>Алексеев В.В., Сорокин А.П., Кузина Ю.А.</i>	
Наработка, химические формы и миграция полония по первому контуру реакторной установки со свинцово-висмутовым теплоносителем	20
<i>Гончар Н.И.</i>	
Атомная энергетика России. Что надо и что не надо делать!	21
<i>Нигматулин Б.И.</i>	
Об опыте эксплуатации реакторов с теплоносителем свинец-висмут	22
<i>Троянов В.М., Василенко В.А., Колик М.В., Степанов В.С., Тошинский Г.И.</i>	
Секция 1. Физическая химия и технология жидкометаллических теплоносителей	
О распределении примеси кислорода в неизотермических циркуляционных контурах с ТЖМТ	24
<i>Асхадуллин Р.Ш., Ниязов С.-А.С., Садовничий Р.П., Легких А.Ю.</i>	
Источники металлических примесей в эвтектическом сплаве 44,5 % Pb – 55,5 % Bi. Подход к обоснованию технических условий на свинцово-висмутовый теплоноситель для реакторных установок нового поколения	28
<i>Асхадуллин Р.Ш., Харчук С.Е., Легких А.Ю.</i>	
Физико-химическое взаимодействие свинцово-висмутового теплоносителя с нитридным топливом и сталью оболочек ТВЭЛ	30
<i>Тимчук А.В., Крушинов Е.В., Шевченко Е.В., Шуваева Е.Б., Альмяшев В.И.</i>	
Возможности ионохроматографического метода в контроле примесного состава ЩЖМТ	32
<i>Цапко Ю.В., Яснев И.М., Харитонова Е.Ю., Борисова К.Г.</i>	
Подходы к выбору конструкций массообменного аппарата с твердофазным источником растворенного кислорода для установок с ТЖМТ	34
<i>Апальнов Е.А., Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю., Махова Т.В.</i>	
Теплофизические свойства топлива водоохлаждаемых ядерных реакторов	36
<i>Кузнецов В.И., Лысыков А.В., Федотов А.В., Миссорин Д.С., Тенишев А.В., Михальчик В.В., Лутков М.А.</i>	
Проблемы получения высокотемпературной стали с использованием термитных реакций	39
<i>Загорюлько Ю.И., Ганичев Н.С., Ильичева Н.С., Коновалов М.А., Чибисова А.С., Сурин В.И.</i>	

К вопросу о смачиваемости стали 12X18H9T жидким оловом.....	41
<i>Алчагиров Б.Б., Канаметова О.Х., Ширяев К.А., Дышекова Ф.Ф.</i>	
Оценка критической температуры эвтектического расплава натрий-калий.....	44
<i>Алчагиров Б.Б., Канаметова О.Х., Хабилов З.Ю., Дышекова Ф.Ф.</i>	
Оптимизация твердофазной технологии переработки РАО щелочных теплоносителей на полномасштабном образце установки «Минерал-100/150».....	47
<i>Смыков В.Б., Алексеев В.В., Легких К.Г., Жданов В.П., Коврежкин Н.В., Гуч И.В., Никитин Э.М., Семенов Д.А., Рыбин А.Н., Семин С.Д., Ермаков А.И.</i>	
Определение соответствия продукта твердофазного окисления отработавшего натриевого теплоносителя критериям приемлемости к длительному хранению.....	49
<i>Смыков В.Б., Легких К.Г., Трифанова Е.М., Грушичева Е.А.</i>	
Оценка относительной скорости дегазации в натриевом теплоносителе реактора на быстрых нейтронах.....	51
<i>Дмитриев Д.В., Гончар Н.И.</i>	
Влияние оксидных покрытий на работоспособность рефлекс-радарного уровнемера в среде Pb-Bi.....	52
<i>Зырянова Т.К., Сумин Р.В., Погорелов М.Д., Маров А.Р., Волков Н.С., Бокова Т.А.</i>	
Разработка способа переработки ЖРК цеха радиоактивных отходов АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».....	54
<i>Легких К.Г., Фокина Д.А.</i>	
Анализ методов предварительной очистки расплавов щелочных металлов и их сплавов.....	56
<i>Приказчикова А.А., Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С.</i>	
Изучение методов очистки натрий-калиевого сплава от примесей.....	59
<i>Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С., Приказчикова А.А.</i>	
Эталонная поверочная установка измерительных каналов контроля кислорода в расплаве свинца.....	61
<i>Дворецкий С.В., Садовничий Р.П., Асхадуллин Р.Ш., Лотов В.С., Харчук С.Е.</i>	
Водородная очистка для петлевых циркуляционных стендов с ТЖМТ.....	62
<i>Зюбанов В.А., Харчук С.Е.</i>	
Расчетно-экспериментальная оценка растворимости монооксида железа в расплавах тяжелых металлов.....	63
<i>Осипов А.А., Абдулазизов О.М.</i>	
К вопросу о растворимости оксида свинца в ТЖМТ.....	64
<i>Осипов А.А., Шелеметьев В.М., Лотов В.С., Мурашкин А.В.</i>	
Датчик термодинамической активности кислорода со встроенной термопарой.....	65
<i>Осипов А.А., Лотов В.С., Садовничий Р.П., Лазорцев А.С.</i>	
Секция 2. Гидродинамика и теплообмен в реакторных установках с ЖМТ	
Обобщение результатов экспериментального и численного моделирования кипения щелочных жидких металлов в активной зоне быстрых реакторов (картограмма режимов, теплоотдача).....	66
<i>Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Денисова Н.А., Сорокин Г.А.</i>	
Термические сопротивления и смачиваемость границ контакта жидкого металла и теплообменных поверхностей.....	68
<i>Круглов А.Б., Харитонов В.С., Паредес Л.П.</i>	

Теплогидравлический анализ ЖСР сжигателя трансураниевых элементов.....	70
<i>Гаца П.В., Игнатъев В.В.</i>	
Исследование магнитной гидродинамики и теплообмена жидкого металла в теплообменной системе «труба в канале» применительно к модулю blankets термоядерного реактора.....	71
<i>Лучинкин Н.А., Разуванов Н.Г., Полянская О.Н.</i>	
Исследование теплообмена и гидродинамики имитатора расплава соли в условиях, актуальных для реакторных установок нового поколения	73
<i>Белавина Е.А., Пятницкая Н.Ю., Рахимов Р.Ф., Бердюгин Д.А.</i>	
Параметрическая идентификация коэффициента теплоотдачи для трубопроводной системы при высокоэнтальпийной нагрузке	75
<i>Лосев М.И.</i>	
Адаптация модели турбулентности к теплообмену в пучке стержней	77
<i>Сергеенко К.М.</i>	
Исследование гидравлических характеристик гидростатического подшипника двойного взаимобратного щелевого дросселирования с наклонными камерами для свинец-висмутного теплоносителя	78
<i>Погорелов М.Д., Сумин Р.В., Маров А.Р., Волков Н.С., Бокова Т.А.</i>	
О теплогидравлике витого и прямотрубного парогенерирующих каналов – анализ экспериментальных данных.....	80
<i>Грабежная В.А., Михеев А.С., Ульянов В.В.</i>	
Анализ переходных процессов при переключении тока в электромагнитных преобразователях расхода жидких металлов на примере многофункционального магнитогидродинамического устройства.....	82
<i>Осипов А.А.</i>	
Периодическая мультифрактальная модель пульсаций температуры в жидких металлах	83
<i>Осипов А.А.</i>	
Расчетно-экспериментальное обоснование ресурса фильтроматериала для контуров с ТЖМТ.....	84
<i>Воронин И.А., Посажеников А.М., Асипенко Д.С., Зуборева М.В.</i>	
Обзор экспериментальных работ, посвященных вопросам гидродинамической неустойчивости в парогенерирующих трубах, обогреваемых жидким металлом	85
<i>Букреева А.Д., Грабежная В.А.</i>	
Секция 3. Гидродинамика и теплообмен в водоохлаждаемых реакторах	
Теплофизические аспекты применения борной кислоты в водо-водяных реакторах	87
<i>Лебезов А.А., Морозов А.В., Сахингареев А.Р., Шлёпкин А.С., Сошкина А.С.</i>	
Обзор серии расчётно-экспериментальных исследований процессов естественной циркуляции в несимметричных условиях теплоотвода от РУ на стенде ПСБ-ВВЭР	89
<i>Латкин Д.Ю., Крыжановская Т.И., Петкевич И.Г.</i>	
Экспериментально-расчетное обоснование тепловых схем РУ на основе использования трубчатых твэл	90
<i>Болтенко Э.А., Кочергин В.М., Носков А.В.</i>	
Особенности теплогидравлики тепловыделяющей сборки одноконтурной ядерной энергетической установки ВВЭР-СКД.....	92
<i>Баисов А.М., Чуркин А.Н.</i>	

Экспериментальное исследование однофазного течения и конвективной теплопередачи теплоносителя в пористой среде с внутренним тепловыделением.....	93
<i>Мишин Г.А., Попандопуло Х.Ю., Вершинина Ю.В.</i>	
Расчётное исследование эффективности охлаждения водным аэрозолем теплообменной трубки системы пассивного отвода тепла	96
<i>Смирнов А.М., Морозов А.В.</i>	
Особенности течения теплоносителя на выходе из тепловыделяющей сборки кассетного типа активной зоны реактора РИТМ атомной станции малой мощности	98
<i>Дмитриев С.М., Дёмкина Т.Д., Добров А.А., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Пронин А.Н., Рязанов А.В.</i>	
Особенности гидродинамики теплоносителя на входе тепловыделяющей сборки реактора РИТМ	101
<i>Дмитриев С.М., Дёмкина Т.Д., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Добров А.А., Пронин А.Н., Курицин Д.Д., Рязанов А.В., Николаев Д.С.</i>	
Разработка улучшенной модели турбулентного перемешивания для ячеечного кода SC-INT	104
<i>Арестова А.А., Олексюк Д.А.</i>	
Анализ расширенной валидации программы ПУЧОК-1000 на экспериментах по исследованию критических тепловых потоков.....	105
<i>Босенко С.В., Чуркин А.Н.</i>	
Расчетное моделирование процессов теплообмена в направляющих каналах ТВС реакторных установок ВВЭР	106
<i>Матюшин А.А., Чуркин А.Н.</i>	
Математическое моделирование теплогидравлических и химических процессов систем спецводоочистки и химводоочистки, применяемых в разработке полномасштабных тренажеров для проекта АЭС-2006 с РУ ВВЭР-1200	107
<i>Добони К.А.</i>	
Секция 4. Тепломассообмен, магнитная гидродинамика, вибрации и акустика в энергетических установках	
О разработке микрореактора с термофотоэлектрическим преобразованием энергии	108
<i>Логинов Н.И., Михеев А.С., Ульянов В.В.</i>	
МГД-эффект в каналах магнитных расходомеров для жидкометаллических теплоносителей	109
<i>Михайлова Ю.В., Судариков В.К.</i>	
Расчетно-экспериментальное исследование моделей передачи широкополосной вибрации через виброизолирующие развязки трубопроводов высокого давления с жидкостью	111
<i>Кирюхин А.В., Мильман О.О., Птахин А.В., Сержкин Л.Н.</i>	
О некоторых свойствах пульсаций температуры в жидких металлах	113
<i>Птахин А.В., Крылов В.С.</i>	
Квантовое моделирование теплофизических свойств жидких металлов	115
<i>Левашов П.Р., Минаков Д.В.</i>	
Современные технологии обработки данных с использованием искусственных нейронных сетей для решения практических задач теплофизики	117
<i>Шлёпкин А.С., Морозов А.В., Сахингареев А.Р.</i>	

Тепловые трубы в современных проектах ЯЭУ	119
<i>Верещагина Т.Н., Логинов Н.И.</i>	
Обоснование параметров аэродинамического стенда для исследования процесса перемешивания потоков теплоносителя в собирающем коллекторе ВТГР с применением CFD моделирования	120
<i>Дмитриев С.М., Добров А.А., Рязанов А.В.</i>	
К вопросу о ламинарном теплообмене в газовых смесях с низким числом Прандтля	122
<i>Сидоров А.Е., Бурцев С.А.</i>	
Термоакустические устройства в ЯЭУ	123
<i>Кудряева Ю.В., Верещагина Т.Н.</i>	
Преобразователи термоэлектрические с действительной (индивидуальной) статической характеристикой преобразования	124
<i>Логинов В.Н., Резанов Д.С.</i>	
Исследование режимов работы магнитного расходомера тяжелого жидкометаллического теплоносителя при регулировании содержания кислорода	125
<i>Сумин Р.В., Бокова Т.А., Волков Н.С., Маров А.Р., Зырянова Т.К., Погорелов М.Д.</i>	
Секция 5. Расчетные модели, коды и результаты численного моделирования	
Разработка, верификация и валидация специализированной версии системного расчетного кода КОРСАР/ЖМТ	126
<i>Волкова С.Н., Грицай А.С., Данилов И.Г., Мигров Ю.А., Мицкевич А.В., Попов А.О., Ярушина А.В.</i>	
Моделирование физических процессов при тяжелых авариях с использованием интегрального кода ЕВКЛИД/V2	128
<i>Усов Э.В., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Прибатурин Н.А.</i>	
Использование кода КУПОЛ-БР для анализа водородной безопасности установок с жидкометаллическими теплоносителями	130
<i>Иванова Е.А., Казанцев А.А., Супотницкая О.В., Мосеева Н.А.</i>	
Мультифизическое моделирование жидкосолевых реакторов	132
<i>Куприянов К.С., Колобовников И.П., Лучина К.А., Фейнберг О.С., Игнатьев В.В.</i>	
Моделирование трехмерных теплогидравлических процессов в активных зонах реакторов с жидкометаллическим теплоносителем в приближении анизотропного пористого тела	134
<i>Баясхаланов М.В., Меринов И.Г., Харитонов В.С., Корсун А.С.</i>	
Численное моделирование течений в раздаточно-коллекторной системе с применением RANS моделей	136
<i>Дудкин К.О., Марков П.В.</i>	
Ухудшение естественной циркуляции в контуре с гидрозатвором в результате выделения азота из растворенного состояния в воде в газообразное при нагреве	138
<i>Сергеев Вл.В., Казанцев А.А.</i>	
Моделирование температурно-влажностного режима в подызоляционном пространстве трубопроводов второго контура РУ БРЕСТ-ОД-300	140
<i>Матвеев Е.Л., Недайвозов А.В., Тутукин А.В., Черкасова М.С.</i>	

Поячейковый расчёт по программе MATADOR экспериментов, выполненных в рамках международного бенчмарка на стенде NACIE-UP	142
<i>Залесов А.С., Чуркин А.Н.</i>	
Моделирование течения теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок различного типа с помощью системы суперкомпьютерного сквозного моделирования «ЛОГОС-АТОМ»	144
<i>Данилов Е.А., Соловьев С.С.</i>	
Расчётно-экспериментальное исследование движения и тепломассопереноса закрученного потока в каналах сложной геометрии	145
<i>Соборнов А.Е., Дмитриев С.М.</i>	
Разработка и валидация модели переноса площади межфазной поверхности для кода STEG	147
<i>Мелихов В.И., Никулин А.С.</i>	
Кросс-верификационные расчёты теплогидравлических характеристик активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого реактора	149
<i>Диденко Д.В., Балувев Д.Е., Никаноров О.Л., Рогожкин С.А., Лубина А.С., Седов А.А., Фролов А.А.</i>	
Система замыкающих соотношений для расчета теплогидравлики реакторных установок с ЖМТ	151
<i>Мицкевич А.В., Попов А.О., Волкова С.Н., Грицай А.С.</i>	
База экспериментальных данных ППУ стендовой установки КМ-1 в обеспечение валидации расчетных кодов	152
<i>Бенедиктов Д.В., Вакарин А.В., Волкова С.Н., Мигров Ю.А., Ярушина А.В.</i>	
Валидация программного комплекса КОРСАР/ГП на основе результатов эксперимента по параметрическому исследованию естественной циркуляции с нарушением отвода тепла через один из парогенераторов	154
<i>Крыжановская Т.И., Латкин Д.Ю., Петкевич И.Г.</i>	
Применение Виртуальной АЭС для анализа разрыва теплообменных трубок парогенераторов	155
<i>Ивков М.И., Ахмедов Э.Г., Анищенко А.М., Гаврилов М.В., Третьяков Е.А., Образцов Е.П.</i>	
Математическая модель температурного расчета твэлов с оксидным и нитридным топливом в задачах оценки выхода продуктов деления	157
<i>Филимонов Е.В., Дмитриев Д.В., Жилкин А.С.</i>	
Моделирование аварийной ситуации на энергоблоке с реактором ВВЭР-1200 вследствие функционального отказа основного регулятора уровня в деаэраторе	159
<i>Фомин А.В., Сокуренок Е.Д., Горностаев Д.А., Логинов П.А.</i>	
Моделирование аварийного процесса LB LOCA при гильотинном разрыве холодного участка главного циркуляционного трубопровода РУ ВВЭР-СКД с помощью кода RELAP5	160
<i>Суджян А.М., Седов А.А.</i>	
Оценка влияния повторного залива активной зоны и включения спринклерной системы при тяжёлой аварии на РУ ВВЭР-1000 на водородную взрывобезопасность под гермооболочкой	162
<i>Ахмедов И.С., Киселев А.Е.</i>	
Результаты интегрального теплогидравлического расчёта аварии с двусторонним разрывом контура охлаждения дивертора на установке ИТЭР	164
<i>Гембицкий Н.Д., Долганов К.С.</i>	

Результаты расчетных исследований твэлов реакторов БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200 с жидкометаллическим подслоем	166
<i>Персиянова Е.И., Тарасов Б.А., Иванов А.Ю., Иванов Ю.А., Зборовский В.Г., Хоружий О.В., Лиханский В.В.</i>	
Модуль CONT_TH для расчета теплогидравлических параметров защитных оболочек РУ с водяным теплоносителем	167
<i>Томащук Д.Ю.</i>	
Термодинамическая модель расплава на днище корпуса реактора ВВЭР	168
<i>Мельников И.А., Голубев М.А., Шмельков Г.Б., Великанов А.В.</i>	
Обоснование применимости кода СОКРАТ для моделирования ЗПА в бассейне выдержки	169
<i>Федоров М.С., Меркулов В.В., Нацекин М.Д., Коновалов О.И.</i>	
Моделирование поведения радиоактивных продуктов деления при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР с учетом неопределенности исходных данных	171
<i>Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В.</i>	
Моделирование плотности радиоактивных аэрозолей при тяжелых авариях на АЭС с ВВЭР	172
<i>Савекин С.С., Шмельков Ю.Б.</i>	
Моделирование радиационного теплообмена применительно к анализу живучести устройства локализации расплава реактора ВВЭР-1200	173
<i>Мельников И.А., Шмельков Г.Б., Голубев М.А., Великанов А.В.</i>	
Оценка выхода водорода из воды приреакторного бассейна выдержки ОЯТ АЭС с реактором РБМК-1000 на начальной стадии аварии с полным обесточиванием	175
<i>Жулина Ю.К., Грязев А.С., Осипов А.М., Поляков В.В.</i>	
Расчетные исследования конденсационных гидравлических ударов в трубопроводе аварийного впрыска в компенсатор давления в ВЭР-1300	177
<i>Кучерова В.В., Чуркин А.Н.</i>	
Расчётный анализ аварии с блокировкой проходного сечения ТВС РУ БН с учетом погрешностей и неопределённостей	179
<i>Анфимов А.М., Кирилов И.Н.</i>	
Расчётный анализ теплогидравлических характеристик фильтр-ловушки перспективного реактора БН	180
<i>Пяткин Е.Р., Пахолков В.В., Рогожкин С.А.</i>	
Расчетный анализ аварии с разгерметизацией вытеснителя-нейтроновода реактора БН	181
<i>Самойлов А.М., Богданова Е.В., Пахолков В.В., Рогожкин С.А.</i>	
Разработка модели окисления карбида бора, учитывающей образование водорода и угарного газа	182
<i>Долженков Е.А.</i>	
Исследование теплофизических и физико-химических характеристик экспериментального стенда лаборатории KALLA	183
<i>Свирид К.О., Сергеенко К.М.</i>	
Авторский указатель	184

Пленарные доклады

Актуальные аспекты исследований теплогидравлических процессов в реакторах на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением

Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Дельнов В.Н., Денисова Н.А.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
apsorokin@ippe.ru*

Ключевые слова: быстрый реактор, натрий, теплогидравлика, безопасность, аварийные режимы, эксперимент, численное моделирование, активная зона, бак реактора, турбулентный перенос, стратификация, кипение щелочных металлов

Дальнейшее развитие атомной энергетики России, реализация стратегии двухкомпонентной атомной энергетики с замыканием топливного цикла с использованием реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, обеспечение ее конкурентоспособности и сохранения приоритета, которым обладает Россия по АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, требует продолжения комплекса проблемно-ориентированных теплогидравлических исследований.

В докладе изложены результаты экспериментальных и расчетных теплогидравлических исследований в обоснование характеристик и безопасности реакторов на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением для широкого круга задач, включая гидродинамику и теплообмен в каналах и тепловыделяющих сборках твэлов (ТВС) активной зоны, в том числе, в условиях формоизменения пучка твэлов в процессе кампании и блокировки части проходного сечения ТВС, внутрикорпусную циркуляцию и теплообмен стратифицированного теплоносителя в реакторе на быстрых нейтронах с интегральной компоновкой оборудования в номинальном режиме с вынужденной конвекцией и естественной конвекцией теплоносителя (аварийное расхолаживание).

В результате всесторонних и систематических исследований статистических характеристик полей температуры и скорости в турбулентных потоках воздуха и жидких металлов изучены характеристики пульсаций температуры и скорости, интенсивность пульсаций, корреляционные функции, спектральная плотность и распределение вероятностей. Распределение скорости по нормали к смоченному периметру описывается универсальным законом, если для расчета динамической скорости использовать локальное значение касательного напряжения. Наблюдается значительная интенсификация турбулентных пульсаций скорости в периферийной области ТВС по сравнению с бесконечной решеткой, которую можно объяснить воздействием вторичных вихрей.

В экспериментах по теплообмену в трубах показано, если концентрация примесей в теплоносителе не превышает их растворимость при температурах циркулирующего металла, на границе раздела теплоноситель – поверхность теплообмена термическое (контактное) сопротивление отсутствует. В этих условиях теплоотдача к жидким ме-

таллам Na, Na-K, Li, Hg, Pb-Bi в трубах описывается единой критериальной зависимостью, близкой к формуле Лайона.

Разработана теория приближенного теплового подобия твэлов, расположенных в правильных решетках, которая позволила моделировать твэлы многослойными трубками с электрообогревом изнутри. Демонстрируется, что температурный режим работы твэлов активной зоны быстрых реакторов определяется большим числом конструктивных, режимных, технологических факторов закономерного и статистического характера. Получены детальные экспериментальные данные по теплогидравлике в моделях активной зоны при наличии прогибов тепловыделяющих элементов, асимметричных сдвижек и деформаций элементов, перекрытии различных частей активной зоны, наличии встречных потоков.

В результате экспериментальные исследования и расчетно-теоретического анализа межканального обмена массой, импульсом и энергией в пучках гладких и оребренных спиральной проволочной навивкой твэлов созданы физически обоснованные методы и программы теплогидравлического расчета формоизмененных ТВС активной зоны реакторов на быстрых нейтронах.

Исследовано влияние на температурный режим ТВС геометрии и материалов твэлов, эффектов радиационного набухания и ползучести, выявлены особенности формирования температурного режима активной зоне в процессе эксплуатации (кампании) реакторов на быстрых нейтронах.

Расчеты по термомеханическому коду СДТ-МИФ для ТВС зоны большого обогащения топлива в реакторе типа БН-600 при выгорании 7 % тяжелых атомов (доза около 60 смещений на атом), показали, что для дозы свыше 42 сна, изменение площади каналов по высоте ТВС носит сложный характер. Различие максимальной температуры оболочек твэлов и неравномерности температуры по их периметру в начале первой и конце двенадцатой микрокампаний лежит в пределах 10–15 °С.

Изложены и анализируются результаты экспериментальных исследований на аэродинамическом стенде и гидрототке гидродинамики проточных частей коллекторных систем цилиндрического типа в реакторах и теплообменниках, закономерности которых зарегистрированы в качестве научных открытий как неизвестные ранее закономерность и явление, имеющие отношение к атомной, космической, металлургической и химической областям науки и техники.

Исследования при числах $Re > 10^4$ показали, что при равенстве значений числа Фруда, рассчитанных по параметрам экспериментальной модели и реактора ($Fr_m = Fr_p$), размеры застойных и рециркуляционных образований в камерах смешения не меняются, поэтому точного моделирования по числам Re не требуется. Критериями, определяющими подобие течений в устойчиво стратифицированных зонах теплоносителя, являются числами Fr , Pe и локальное градиентное число Ричардсона $Ri = g\beta(\partial t/\partial z)/(\partial w/\partial z)^2$. Характеристиками устойчиво стратифицированного течения теплоносителя являются частота Вайсяля – Брента $N^2 = (g/\rho)(\rho\partial/\partial z)$, где ρ – плотность среды, и масштаб плавучести $l_n = \rho(\partial\rho/\partial z)^{-1}$. В устойчиво стратифицированном турбулентном потоке максимальный размер вихрей не может превышать масштаб плавучести. Поэтому крупномасштабные вихри, большие, чем масштаб плавучести, подавляются и растекаются вдоль стратифицированной области раздела в виде внутренних волн, которые создают пульсации температуры в материале стенок оборудования с частотой $f \leq N$.

Приближенное моделирование режима естественной конвекции обеспечивалось по числу Эйлера $Eu = \Delta p/(\rho w^2)$, где Δp – разность давлений в двух характерных точках потока.

Результаты теплогидравлических исследований первого контура быстрого реактора с жидкометаллическим теплоносителем, выполненных на мелкомасштабной водяной модели быстрого реактора (масштаб 1:10) для режимов принудительной циркуляции, перехода к режиму расхолаживания и аварийного расхолаживания естественной конвекцией теплоносителя показали, что под воздействием термогравитационных сил в периферийной зоне верхней (горячей) камеры реактора над боковыми экранами, в холодной и напорной камерах, элеваторной выгородке, системе охлаждения корпуса реактора, на выходе из промежуточных и аварийных теплообменников в различных режимах их работы происходит температурное расслоение с возникновением застойных и рециркуляционных образований (стратификация теплоносителя), перестройка характера течения и температурного режима.

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов кипения и конденсации жидких металлов в большом объеме, а также экспериментов и численного моделирования кипения в ТВС активной зоны в аварийных режимах. Показана принципиальная возможность длительного охлаждения активной зоны в аварийных режимах с кипением жидких щелочных металлов. Изучена теплоотдача при кипении жидких щелочных металлов в пучках твэлов, исследовано воздействие шероховатости поверхности твэлов на развитие процесса кипения, построена картограмма режимов течения двухфазного потока жидких металлов в пучках твэлов.

Результаты расчетных исследований, выполненных по модернизированной версии поканального кода SABENA, реализующей двухжидкостную модель двухфазного потока жидкого металла в приближении равных давлений в паровой и жидкой фазах, воспроизводят ход температуры, развитие режимов течения однофазного потока, пульсации расхода жидкого металла, полученные в экспериментальных исследованиях, а также демонстрируют противофазные пульсации расхода теплоносителя в параллельных ТВС, межканальную неустойчивость, характеризующуюся значительным возрастанием амплитуды пульсаций расхода теплоносителя в параллельных ТВС.

Сравнение результатов расчетов и экспериментов показало возможность отвода тепла кипящим теплоносителем в модельной ТВС с новым техническим решением — «натриевой полостью» над участком энерговыделения при тепловых нагрузках 10–15 % и уровне расхода натрия около 5 % от номинальных значений.

Анализируется проблема пассивного (саморегулируемого) останова быстрых реакторов.

Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в каналах судовых ядерных энергетических установок

Митрофанова О.В., Федоринов А.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
omitr@yandex.ru

Ключевые слова: судовые ядерные энергетические установки, парогенератор, гидродинамика, теплообмен, турбулентность, численное моделирование, кризис закрученного потока, надежность, безопасность

Целью исследований, проводимых в настоящей работе, является разработка рекомендаций для повышения эксплуатационных характеристик трубопроводных систем парогенераторов судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ) нового поколения. Первым этапом работы являлись обоснование выбора модели турбулентности для расчета сложных закрученных течений и её верификация на основе сравнения результатов численных вычислений с экспериментальными данными по изучению процессов петлевого смешения потоков теплоносителя в корпусе судовой реакторной установки (РУ). Проведенное расчетно-теоретическое моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в сложных каналах парогенераторов выявил ряд факторов, влияющих на снижение эффективности и надежности работы судовых ЯЭУ блочного типа. На основе анализа полученных результатов предложен ряд рекомендаций для устранения выявленных негативных эффектов.

Строгие требования к массогабаритным характеристикам судовых ЯЭУ приводят к необходимости усложнения конструкций трубопроводных систем реакторной установки (РУ) и теплоэнергетического оборудования различных контуров циркуляции, включающих в себя множество криволинейных участков, изгибов различных направлений, сужений и расширений на ограниченном пространстве. При анализе эксплуатации основного оборудования судовых ЯЭУ было выявлено, что наибольшая часть проблем возникает именно из-за сложной геометрии теплогидравлического тракта РУ, и, в частности, парогенерирующих систем (ПГС). В связи с этим, актуальными являются вопросы расчетно-теоретического моделирования процессов гидродинамики и теплообмена на участках трубопроводов повышенной сложности с целью определения причин, вызывающих снижение теплогидравлической эффективности, надежности и безопасности работы различных элементов конструкции, и, соответственно, поиска научно-обоснованных возможностей устранения или минимизации негативных эффектов.

Верификация предложенного в рамках работы расчетного метода моделирования теплогидравлических процессов в сложных каналах осуществлялась на основе сравнения полученных с использованием программного комплекса (ПК) ANSYS CFX результатов расчетов с данными измерений, проведенных на экспериментальном стенде, представляющем собой модель корпуса судовой РУ. В качестве модели турбулентности использовалась Shear Stress Transport ($k-\omega$ SST), хорошо зарекомендовавшая себя для расчета закрученных течений. Эксперимент, описание которого приводится в работе [1], представлял собой изучение неравновесного смешения петлевых потоков теплоносителя внутри корпуса РУ. На один из четырех патрубков подавался раствор соли, а на другие три – дистиллированная вода. Отслеживание перемещения солевого потока осуществлялось с помощью стержневых датчиков проводимости. Особенность численного расчета заключалась в том, что вместо соли в качестве отслеживаемого параметра выступала температура T . Правомочность такой аналогии была обоснована авторами работы [1].

Результаты сравнения расчета и эксперимента, показанные на рисунке 1, подтвердили эффект формирования и перемещения «горячего пятна» в процессе смешения теплоносителя в опускной и нижней камерах реактора. На рис. 1а представлена картина распределения солевого раствора, полученная в эксперименте, а на рис. 1б – результат численного расчета распределения температуры теплоносителя перед входом в каналы-имитаторы активной зоны РУ.

Таким образом, сравнительный анализ результатов расчетов, проведенных с помощью модели турбулентности $k-\omega$ -SST, и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о приемлемости данной модели для качественного и количественного описания структуры течения жидкости в элементах теплогидравлического тракта сложной конструкции.

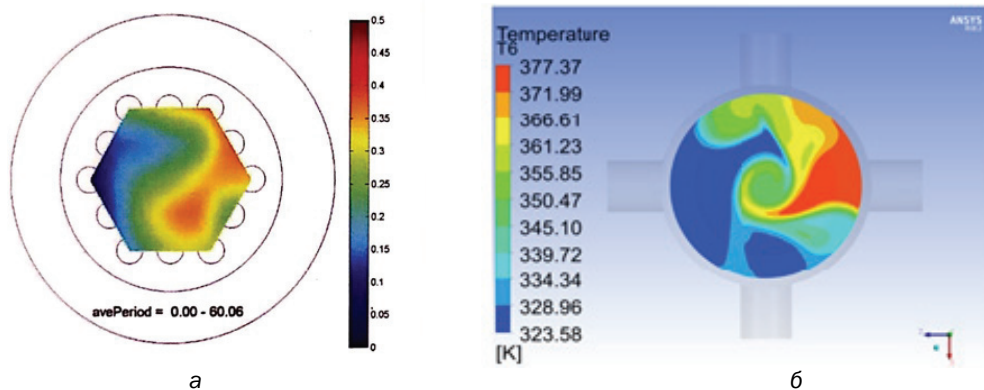


Рис. 1. Поля распределения концентрации солевого раствора и температуры теплоносителя в нижней напорной камере РУ: а – эксперимент; б – расчет

Данные эксплуатационного анализа, основанные на регистрации широкого комплекса теплофизических параметров в процессе мониторинга работы всех типов ПГС судовых ЯЭУ, свидетельствуют о проявлении следующего негативного эффекта – снижения теплогидравлической эффективности установок при увеличении мощности РУ выше 50 %. Это сказывается как на параметрах перегретого пара, так и на уровне гидравлических потерь второго контура судовой ЯЭУ.

Проведенное в настоящей работе численное моделирование теплогидравлических процессов в трубопроводах судового парогенератора ПГ-28 показало, что элементы опускных питательных труб, переходящих в змеевиковую часть теплообменных каналов, являются наиболее напряженными участками для движения среды второго контура с точки зрения резкого увеличения гидравлических потерь за счет формирования зон реверсивного закрученного течения. Характерная для каждого теплообменного канала парогенератора последовательная система гибов в вертикальной, а затем в горизонтальной плоскостях и наличие диффузорных расширений проходного сечения каналов способствуют возникновению явления, называемого «кризис закрученного потока» (рис. 2а). Это приводит к запирающему эффекту большей части проходного сечения канала зоной возвратного закрученного течения – так называемой вихревой пробки, механизм возникновения которой описан в работе [2]. Данный эффект нелинейно повышает потери давления рабочего тела второго контура, что увеличивает мощность на прокачку рабочего тела (рис. 2б) и способствует формированию низкочастотного спектра акустических колебаний.

В целях решения задач оптимизации геометрических и режимных параметров работы теплообменного оборудования судовых ЯЭУ в настоящей работе предлагается использовать критерий теплогидравлической эффективности, сформированный на ос-

нове анализа, данного в работе [3]. Используемый критерий дает возможность оценить соотношение теплообменной и гидравлической характеристик парогенератора и учитывает изменение коэффициента теплоотдачи, площади поверхности теплообмена и мощности на прокачку рабочего тела для усовершенствованного варианта парогенератора по отношению к тем же параметрам прототипа.

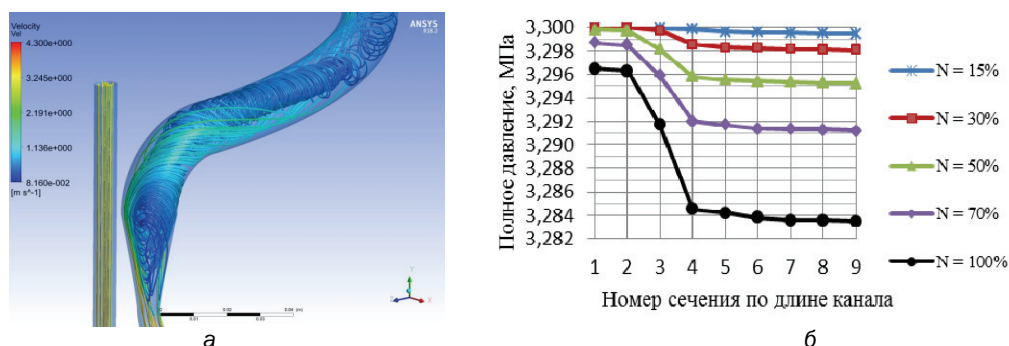


Рис. 2. Влияние кризиса закрученного потока на гидродинамические характеристики второго контура: а – линии тока в зоне возникновения реверсивного закрученного течения (вихревой пробки); б – потери давления в РУ на разных уровнях мощности N (сечения 2-4 находятся в области реверсивного течения – вихревой пробки)

В качестве примера решения оптимизационной задачи в целях повышения теплогидравлической эффективности парогенератора в настоящей работе была рассмотрена возможность применения конструкции теплообменных каналов в виде витых змеевиковых труб с поперечным сечением в форме овала. Как показали результаты численного моделирования, такое техническое решение позволяет снизить интенсивность кризиса закрученного потока, что в свою очередь, несмотря на более сложную геометрию, уменьшает уровень гидравлических потерь на экономайзерном участке трубопровода на 30%. Ранее в работе [4], где авторами исследовались теплообменные характеристики витых каналов овального и крестообразного профилей, было установлено, что наилучшей эффективностью из двух этих типов труб обладают витые трубы овального профиля, за счет использования которых в зависимости от относительного шага закрутки витой трубы может быть достигнуто увеличение уровня теплоотдачи до 15 %.

Литература

1. Баринов А.А. Расчетно-экспериментальное моделирование нестационарных процессов смешения потоков теплоносителя в перспективных ЯЭУ для АЭС малой мощности / А.А. Баринов: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.03. – Н.Н., 2020. – 192 с.
2. Митрофанова О.В., Ивлев О.А., Ургенов Д.С., Федоринов А.В. Оценка влияния кризисного течения закрученного потока на теплогидравлическую эффективность судовых ядерных энергетических установок // Тепловые процессы в технике. – 2019. – Т. 11. – № 6. – С. 242–249.
3. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. – М.: Физматлит, 2010. – 288 с.
4. Митрофанова О.В., Ивлев О.А., Федоринов А.В. О возможности применения сборок витых труб в парогенерирующих системах транспортных ядерных энергетических установок // Тепловые процессы в технике. – 2018. – Т. 10. – № 5–6. – С. 238–244.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда: грант РНФ № 23-29-00373, <http://rscf.ru/project/23-29-00373/>.

Развитие легководной технологии на базе энергетических реакторов ВВЭР-СКД

Пустовалов С.Б., Котов Я.А., Невиница В.А., Седов А.А.,
Субботин С.А., Фомиченко П.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
Sedov_AA@nrcki.ru

Ключевые слова: легководный теплоноситель, сверхкритические параметры, энергетический реактор, ВВЭР-СКД, теплогидравлика, нейтронная физика, топливный цикл, система атомной энергетики

Атомная энергетика (АЭ) в России базируется на энергетических реакторах, охлаждаемых легководным теплоносителем, доля которых в России составляет более 90 %. При этом указанные реакторы работают в открытом топливном цикле, что существенно ограничивает возможности расширения доли АЭ в энергобалансе России вследствие ускоренного потребления природного урана и его исчерпания. Поэтому в 2008–2011 гг. по заказу АО «Концерн Росэнергоатом» были выполнены научно-исследовательские работы по направлению Супер ВВЭР, в рамках которых была проведена разработка технических предложений различных вариантов ЯЭУ ВВЭР-СКД с более высокой эффективностью использования ядерного топлива, по сравнению с ВВЭР, при их работе в системе замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ).

На основе полученных результатов в 2018 году руководством ГК «Росатом» была утверждена Подпрограмма НИОКР на 2019–2028 гг. «Разработка технологий корпусного энергетического реактора с закритическими параметрами теплоносителя (ВВЭР-СКД)», в которой сформулированы основные системные требования к ЯЭУ ВВЭР-СКД:

- сверхкритические параметры легководного теплоносителя РУ, обеспечивающие высокий КПД преобразования энергии (в пределе до 45%);
- работа в замкнутом ЯТЦ в режиме самообеспечения топливом за счёт повышения коэффициента накопления (КН) делящихся нуклидов в реакторе (до 1,05);
- сокращение удельных капитальных затрат по сравнению с существующими АЭС (уровень требований МФП-4 к реакторам Поколения-4);
- высокий уровень безопасности (уровень требований МФП-4 к реакторам Поколения – 4).

По состоянию на сегодняшний день указанным системным требованиям наиболее полно отвечает вариант с двухконтурной ЯЭУ, принудительной циркуляцией теплоносителя в контуре реакторной установки и быстрым спектром нейтронов в активной зоне реактора.

В работе представлены перспективы развития атомной отрасли с введением в ее структуру 40–50 ГВт, мощностей энергоблоков с РУ ВВЭР-СКД. Представлены особенности и характеристики реактора и ЯЭУ ВВЭР-СКД, а также результаты оценки удельных характеристик по строительным площадям и объемам, а также по металлоемкости энергоблока с ВВЭР-СКД. Приведены основные результаты НИОКР 2019–2023 гг., а также положения действующей Подпрограммы НИОКР «Разработка технологий корпусного энергетического реактора с закритическими параметрами теплоносителя (ВВЭР-СКД)» и Подпрограммы НИОКР по подготовке проектирования многоцелевого тестового исследовательского реактора малой мощности (100 МВт_т) МТИР-СКД на период 2024–2035 гг. Также представлена Дорожная карта направления ВВЭР-СКД до 2035 и на перспективу до 2050 года.

Эвтектический сплав натрий-калий: достижения и проблемы

Логинов Н.И.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
loginov@ippe.ru*

Ключевые слова: теплоноситель, щелочной металл, сплав натрий-калий, технология, очистка,

Применение эвтектического сплава натрий-калий в качестве теплоносителя космических ядерных энергетических установок началось более полувека назад. В 1965 г. США испытали в космосе в течение 43 дней первую термоэлектрическую энергетическую установку SNAP-10A с ядерным реактором, охлаждаемым этим эвтектическим сплавом. Но исследования сплава с целью применения его в качестве теплоносителя, как за рубежом, так и в СССР, началось значительно раньше. Первые экспериментальные стенды с циркулирующим эвтектическим сплавом натрий-калий были созданы в Физико-энергетическом институте в 1952–53 гг. Первые русскоязычные публикации об этом теплоносителе, появившиеся 1958–59 гг., были основаны на иностранных данных.

В 1956–58 гг. в СССР были начаты работы по созданию бортовых космических ядерных энергетических установок (ЯЭУ) с термоэлектрическим и термоэмиссионным способами преобразования энергии, в которых в качестве теплоносителя использовался сплав натрий-калий (установки БУК и ТОПАЗ). На стенде, моделирующем установку БУК, была отработана технология подготовки штатных ЯЭУ и теплоносителя для их заполнения, обосновано применение циркония в качестве геттера для очистки от примесей в штатных установках. На основе проведенных исследований была создана и внедрена технология теплоносителя натрий-калий. В 1975 г. в ГНЦ РФ – ФЭИ были разработаны первые технические условия на этот теплоноситель, согласованные руководителями ряда предприятий в 1978 г.

На основании разработанной технологии проводилась очистка сплава и заполнение им космических энергетических установок БУК, ТОПАЗ, «Енисей». При испытаниях и работе многочисленных наземных прототипов и 35 космических ЯЭУ с натрий-калиевым теплоносителем не было никаких замечаний к теплоносителю и инцидентов, связанных с ним. Разработанная технология была внедрена в смежных предприятиях при непосредственном участии специалистов ГНЦ РФ – ФЭИ.

В последние 20 лет прошлого века исследования сплава натрий-калий носили, в основном, фундаментальный характер: исследовалось состояние и поведение примесей в сплаве, структура сплава и примесных химических соединений, с измерением термодинамической активности кислорода в неизотермическом циркуляционном контуре с помощью электрохимических ячеек.

В докладе представлены результаты обзора открытых публикаций, выполненных за период с 1958 по 2002 г., а также научно-технической и патентной литературы за последние 20 лет в области технологии сплава натрий-калий эвтектического состава.

Показаны задачи, которые необходимо решить для создания современных ядерных энергетических установок повышенной мощности, способных длительно работать без обслуживания при высокой температуре. Отмечены недостаточно проработанные вопросы, важные для обоснования работоспособности и технических характеристик системы охлаждения перспективных ядерных и неядерных установок, в которых предполагается использовать эвтектический сплав натрий-калий в качестве теплоносителя.

Исследования массопереноса трития в контурах с натриевым теплоносителем

Алексеев В.В., Сорокин А.П., Кузина Ю.А.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
alexeev@ippe.ru

Ключевые слова: натриевый теплоноситель, тритий, водород, аргон, защитный газ, температура, холодная ловушка, массоперенос, концентрация, проницаемость изотопов водорода

Перенос трития в контурах ЯЭУ приводит к увеличению дозовой нагрузки для обслуживающего персонала и дополнительному загрязнению окружающей среды. Поэтому важно иметь оценки распределения трития в контурах быстрых реакторов и его выхода через стенки натриевых контуров в другие среды, а также его накопления в холодных ловушках.

Перенос и распределение трития в натриевых контурах прямо связаны с содержанием протия в натрии. В связи с этим одновременно с тритием существует необходимость оценки поступления и массопереноса водорода в контурах с натрием.

В докладе представлен анализ основных закономерностей поведения трития в натриевых контурах быстрых реакторов. Содержатся данные о распределении трития в контурах ЯЭУ, поступлении в третий контур и окружающую среду, накоплении в холодных ловушках. Приведены результаты расчетов для установок БН-350, БН-600, БН-1200, МБИР.

Как следует из расчетов для БН-600 основное количество трития, образующегося в реакторе, поступает в холодные ловушки первого контура и второго контуров, причем в ловушки первого контура примерно в полтора раза больше, $3,22 \cdot 10^{-11}$ кг/с и $1,95 \cdot 10^{-11}$ кг/с соответственно. В третий контур через парогенераторы выносятся примерно на два порядка меньше трития, чем в холодные ловушки, $2,72 \cdot 10^{-13}$ кг/с, а через стенки натриевых контуров в атмосферу на четыре порядка меньше. Потоки трития через стенки натриевых контуров и в третий контур могут оказаться еще меньше, что зависит от особенностей формирования оксидных пленок на стальных поверхностях со стороны атмосферного воздуха или пароводяного контура. Концентрация трития в воде 3-го контура составляет $(7-35) \cdot 10^3$ Бк/л в зависимости от величины продувки третьего контура (50–10) т/ч. Предварительные оценки для БН-1200 и МБИР дали близкие к указанным значения, $10,3 \cdot 10^3$ Бк/л и $9,0 \cdot 10^3$ Бк/л соответственно.

Расчет массопереноса трития проводился для АЭС с карнотизированной газотурбинной установкой (АТЭС БН ГТ-300/130 мощностью 300 МВт эл.) во втором контуре и с натриевым теплоносителем в первом контуре. В стационарном режиме работы установки с КЗГТУ при производительности источника водорода $1,5 \cdot 10^{-8}$ кг/с и трития $2,6 \cdot 10^{-11}$ кг/с в первом контуре при учете наличия оксидных пленок на поверхности теплообменника газ-вода концентрация трития в воде системы охлаждения составит $1,1 \cdot 10^{-2}$ Бк/л, что существенно меньше допустимого значения 1,0 Бк/л (НРБ –99/2009).

Во второй части доклада приведены результаты экспериментального исследования массопереноса трития в циркуляционном натриевом контуре.

Концентрация трития в натрии определялась по результатам измерений его активности в газе-носителе, омывающем водородопроницаемую мембрану, погруженную

одной стороной в теплоноситель. Количественное определение трития осуществлялось газовым проточным пропорциональным счетчиком.

Проведены измерения содержания трития в аргоне газовой полости бака насоса и проницаемости трития через конструкционные материалы. Имеет место существенное расхождение между расчетной и измеренной активностью трития в защитном газе. В газовой полости натриевого контура повышенное содержание водорода приводит к увеличению поступления трития из натрия и повышению его концентрации в защитном газе до величины, более чем на порядок превышающей расчетные значения.

Температурная зависимость константы проницаемости трития через мембрану из армко-железа находится в хорошем соответствии с данными других авторов. Температурная зависимость константы проницаемости трития в стали X18H10T в несколько раз выше, чем это рассчитано на основании известных литературных данных для водорода, пересчитанных для трития.

Наработка, химические формы и миграция полония по первому контуру реакторной установки со свинцово-висмутовым теплоносителем

Гончар Н.И.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
nigon@ippe.ru

Ключевые слова: свинцово-висмутовый теплоноситель, полониевая активность, полонид свинца, коэффициент термодинамической активности, эффективное давление полония, выход в газовую фазу, сравнение расчётных и экспериментальных данных

Для содержащих свинец и висмут тяжёлых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) характерно образование изотопов альфа-излучателей: ^{210}Po ($T_{1/2} = 138,4$ сут.), ^{209}Po ($T_{1/2} = 102$ года) и $^{210\text{m}}\text{Bi}$ ($T_{1/2} = 3,6 \cdot 10^6$ лет). Из них наиболее радиотоксичен ^{210}Po . При распаде он излучает альфа-частицу с энергией 5,3 МэВ и превращается в ^{206}Pb .

Изотоп ^{210}Po образуется в результате распада ^{210}Bi , продукта активации природного изотопа ^{209}Bi . Поскольку период полураспада ^{210}Po намного больше, чем у ^{210}Bi , он будет накапливаться в теплоносителе, и его активность постепенно достигнет стационарного значения, которое во время работы реактора, охлаждаемого СВТ, и при малой выдержке после остановки может достигать порядка 10^{11} Бк/кг, а в свинцовом теплоносителе её величина на несколько порядков меньше.

Гамма-излучение ^{210}Po незначительно – 0,803 МэВ на 10^4 распадов, в качестве внешнего излучателя он не считается опасным. Наибольшее поражение вызывает поступление ^{210}Po в организм пероральным и ингаляционным путём, также опасно попадание на слизистые оболочки и кожу. Поэтому при моделировании миграции полониевой активности и разработке способов и средств защиты персонала особое внимание уделяют аэрозолям и газообразному соединению полония – PoH_2 , которое образуется при взаимодействии соединений полония с водяным паром.

Для обоснования радиационной безопасности и прогнозирования последствий проектных аварий, например разгерметизации газового контура или пролива теплоносителя, необходима проверенная по экспериментальным данным модель миграции полония по первому контуру в нормальных условиях эксплуатации и в аварийных ситуациях. Ключевое звено такой модели – выход полония из теплоносителя в газовую фазу. В работе представлен анализ накопленного материала, даны характеристики свойств полония и его соединений, приведена модель для оценки его выхода в газовую фазу.

В 1995 г. в ГНЦ РФ – ФЭИ были выполнены лабораторные исследования испарения полония из содержащих свинец тяжёлых жидкометаллических теплоносителей. По результатам экспериментов определены эффективное давление и коэффициенты термодинамической активности полония – параметры, определяющие скорость выхода полониевой активности в газовую фазу. Сравнение с результатами других исследователей показывает хорошую сходимость.

Атомная энергетика России. Что надо и что не надо делать!

Нигматулин Б.И.

*Институт проблем энергетики, Москва
nb@geotar.ru*

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, БН, БРЕСТ-300, НИОКР, конкурентоспособная технология, модульный реактор малой мощности

– Как служить государю?

– Говорить правду и не давать покоя.

Конфуций (2500 лет тому назад)

В докладе сформулированы выводы и рекомендации для дальнейшего развития гражданской части Росатома, которая практически полностью определяется единственным продуктом – АЭС:

1. Приоритетное финансирование работ по повышению конкурентоспособности АЭС с ВВЭР, что сегодня является главной задачей Росатома в гражданской атомной энергетике. Довести проект ВВЭР по соответствующим объемам строительства до уровня китайских и корейских проектов.

2. Отказаться от преждевременного строительства «коммерческих» АЭС БН/БР, требующих субсидий из госбюджета. При этом ограничиться НИОКР для создания экономически конкурентоспособной технологии к ~ 2040–2050 и международным сотрудничеством по данной тематике, чтобы обеспечить доступ к разработкам потенциальных конкурентов и/или партнёров.

3. Разработать несколько проектов модульных реакторов малой мощности до 200 МВт тепловых конкурентоспособных зарубежным аналогам по физическому объёму капитальных затрат и оборудованию.

4. Подготовить программу действия научного сообщества по снижению ущерба имиджевого и материального от провала проекта «ПРОРЫВ» и неработающего реактора БРЕСТ-300 с 700 МВт тепловой мощности.

5. Необходимо проводить широкую дискуссию по всем поставленным вопросам и не бояться критики оппонентов.

Об опыте эксплуатации реакторов с теплоносителем свинец-висмут

Троянов В.М.¹, Василенко В.А.,² Колик М.В.³, Степанов В.С.³,
Тошинский Г.И.^{1, 4}

¹ Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск;

² Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова» (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»), Сосновый Бор;

³ Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), Подольск;

⁴ АО «АКМЭ-инжиниринг», Москва
toshinsky@ippe.ru

Ключевые слова: свинцово-висмутовый теплоноситель, атомная подводная лодка, реакторная установка, опыт эксплуатации, аварии, технология теплоносителя, радиационная безопасность, коррозионная стойкость

В докладе рассмотрен опыт эксплуатации реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ), начиная с периода освоения тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ) и заканчивая периодом успешной эксплуатации на серийных атомных подводных лодках (АПЛ) проектов 705 и 705 К [1], на базе которого в настоящее время ведется разработка реакторов с ТЖМТ нового поколения, лишённых выявленных при эксплуатации недостатков.

Весь период эксплуатации с 1960 по 1996 год разделяется на два этапа: этап освоения, проходивший в условиях отсутствия необходимых знаний и опыта и сжатых директивных сроков создания АПЛ, сопровождавшийся рядом аварий, и этап устойчивой эксплуатации серийных АПЛ.

Анализируются аварии и аварийные ситуации, имевшие место на реакторных установках (РУ) с СВТ на АПЛ и наземных стендах-прототипах. Все аварии и аварийные ситуации, рассмотренные в докладе, систематизированы по исходным событиям, для каждого из которого рассмотрены причины, последствия и мероприятия, выработанные для их предотвращения.

Анализ показывает, что наиболее серьезные аварии имели место в начальный период эксплуатации, когда отсутствовали необходимые знания и опыт. Среди всех аварий только одна непосредственно связана с применением СВТ. Причины остальных аварий связаны с недостатками конструкции оборудования, ошибками, допущенными при монтажных работах и при изготовлении оборудования, а также с неправильными действиями персонала, что характерно и для периода освоения водоохлаждаемых реакторов, как военного (АПЛ), так и гражданского назначения, а также для реакторов на быстрых нейтронах, для авиации, ракетной техники и др. Последующий опыт эксплуатации РУ с СВТ показал, что после устранения причин аварий и аварийных ситуаций ни на одной РУ их повторения не было.

В ходе освоения реакторной технологии был решен ряд важных научно-технических проблем, решение которых обеспечило надежную и безопасную эксплуатацию РУ, в том числе: обеспечение необходимого качества СВТ и коррозионной стойкости конструкционных материалов; обеспечение радиационной безопасности (полоний-210); обеспечение работоспособности парогенераторов; сохранение работоспособности оборудования при замораживании/размораживании СВТ. Обзор этих проблем и путей их решения приведен в работе [2].

В условиях РУ АПЛ освоена уникальная в мире реакторная ТЖМТ-технология. Реакторы с ТЖМТ отнесены к проектам IV поколения в связи с химической инертностью ТЖМТ и низким давлением в 1-м контуре. Отсутствие таких факторов опасности как высокое давление и образование водорода позволяет одновременно повысить безопасность и улучшить экономику.

Такой анализ необходим потому, что реакторы с ТЖМТ на основе свинца разрабатываются в настоящее время во многих странах мира (в России это СВБР-100 с СВТ и БРЕСТ ОД-300 со свинцовым теплоносителем). Знание опыта, которым обладает только Россия, позволит разработчикам избежать ошибок первопроходцев. Более детальное изложение этого опыта представлено в монографии [3].

Литература

1. Тошинский Г.И., Степанов В.Н., Никитин Л.Б. Анализ опыта эксплуатации реакторных установок с теплоносителем свинец-висмут и имевших место аварий // Труды первой международной конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ – 98). – Обнинск, 1999. – Т. 1. – С. 63-69 (см. также в книге Georgii Toshinskii, Lead-Bismuth Cooled Fast Reactors. Collection of Selected Articles and Papers, LAMBERT Academic Publishing).
2. Троянов В.М., Тошинский Г.И., Степанов В.С., Петроченко В.В. Свинцово-висмутовые реакторы: история создания и перспективы развития. Часть 1, История создания // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 4. – С. 5–18.
3. Тошинский Г.И. Свинцово-висмутовые реакторы: между прошлым и будущим, живая история. Полемика, интервью, воспоминания. – Москва: Издательство ПРОСПЕКТ, 2022.

Секция 1.

Физическая химия и технология жидкометаллических теплоносителей

О распределении примеси кислорода в неизотермических циркуляционных контурах с ТЖМТ

Асхадуллин Р.Ш., Ниязов С.-А.С., Садовничий Р.П., Легких А.Ю.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
raskhadullin@ippe.ru

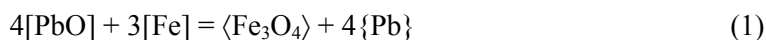
Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель (ТЖМТ), свинец-висмут, свинец, датчик термодинамической активности кислорода

Содержание примеси кислорода в ТЖМТ является одним из главных факторов, влияющих на интенсивность и направление процессов массопереноса в циркуляционных контурах с теплоносителями Pb и Pb-Bi.

Оптимальные концентрации кислорода могут во многом определяться видом распределения примесей в циркулирующем теплоносителе. Поэтому вопрос о виде распределения кислорода является чрезвычайно важным.

В реальном контуре с ТЖМТ все примеси в теплоносителе тем или иным образом взаимодействуют друг с другом. Поэтому распределение термодинамических активностей примесей в расплавах Pb (Pb-Bi), циркулирующих в неизотермическом контуре, не всегда соответствует изоконцентрационному распределению.

Влияние металлических и оксидных примесей на распределение кислорода в циркулирующем теплоносителе можно рассмотреть на примере взаимодействия примесей железа и кислорода в жидком свинце



где вид скобок соответствует агрегатному состоянию реагентов и продуктов реакции: «[...]» – растворенное (жидкое); «<...>» – твердое; «{...}» – расплав (жидкое).

Константа равновесия данной реакции

$$k_p = \frac{a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \cdot a_{\text{Pb}}^4}{a_{\text{Fe}}^3 \cdot a_{\text{PbO}}^4}, \quad (2)$$

где a – термодинамическая активность (с соответствующими индексами для реагентов и продуктов реакции (1)).

При наличии защитных оксидных покрытий на конструкционных сталях контура, т. е. при существовании твердой фазы Fe_3O_4 , можно принять $a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 1$ и $a_{\text{Pb}} \approx 1$. Поэтому выражение для константы равновесия примет вид

$$k_p = \frac{1}{a_{\text{Fe}}^3 \cdot a_{\text{PbO}}^4}. \quad (3)$$

При этом надо иметь в виду, что содержание растворенного [PbO] в свинце (свинце-висмуте) определяет содержание растворенного кислорода в ТЖМТ.

Зная термодинамические свойства Fe_3O_4 , PbO, растворимости железа и кислорода в свинце, можно (в условиях термодинамического равновесия) каждой концентрации кислорода сопоставить соответствующую концентрацию растворенного железа.

Рассмотрим в общем виде поведение системы «кислород – железо – свинец (свинце-висмут)» в условиях неизотермического контура. В системе, находящейся в термодинамическом равновесии, активности растворенных железа и кислорода связаны уравнением

$$a_{\text{Fe}} = a_{\text{O}}^{-4/3} \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot \Delta G_{\text{PbO}}^0 - \Delta G_{\text{Fe}_3\text{O}_4}^0}{3RT}\right), \quad (4)$$

где: ΔG^0 – стандартный изобарно-изотермический потенциал образования вещества; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

В соответствии с этим уравнением в свинце (свинце-висмуте) устанавливаются равновесные концентрации растворенного железа и кислорода. Очевидно, что при переходе теплоносителя с одной температуры T_1 на другую T_2 начальные концентрации железа и кислорода в новых условиях будут равны исходным равновесным концентрациям при температуре T_1 .

Однако при этом система выйдет из термодинамического равновесия, так как с изменением температуры изменяются термодинамические потенциалы Гиббса оксидов железа и свинца, а также изменяются растворимости насыщения железа и кислорода. Новое термодинамическое равновесие установится после соответствующего обмена кислорода по реакции



в том или ином направлении, в зависимости от направления изменения температуры.

В результате перехода системы в новое термодинамическое равновесие и соответствующего обмена кислородом концентрация растворенного железа в ТЖМТ изменится на величину $C_{\text{SFe}} \cdot (a_{\text{Fe}}^0 - a_{\text{Fe}})$, а концентрация растворенного кислорода в ТЖМТ изменится на величину $C_{\text{SO}} \cdot (a_{\text{O}}^0 - a_{\text{O}})$. Здесь C_{SFe} и C_{SO} – концентрации насыщения железа и кислорода в ТЖМТ, а a_{Fe}^0 и a_{O}^0 – термодинамические активности железа и кислорода в ТЖМТ при начальном термодинамическом равновесии.

Естественно предположить, что отношение этих двух выражений можно определить через стехиометрию реакции (5).

Таким образом, для определения двух неизвестных a_{Fe} и a_{O} в новом при T_2 термодинамически равновесном состоянии можно составить систему двух уравнений:

$$\begin{cases} a_{\text{Fe}} = a_{\text{O}}^{-4/3} \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot \Delta G_{\text{PbO}}^0 - \Delta G_{\text{Fe}_3\text{O}_4}^0}{3RT}\right); \\ \frac{167,54}{64} = \frac{C_{\text{SFe}} \cdot (a_{\text{Fe}}^0 - a_{\text{Fe}})}{C_{\text{SO}} \cdot (a_{\text{O}}^0 - a_{\text{O}})} \end{cases} \quad (6)$$

Решая ее относительно a_{O} , получим:

$$a_{\text{O}} + b \cdot a_{\text{O}}^{-4/3} + c = 0, \quad (7)$$

где b , c – константы, вычисляемые по справочным данным [1] в зависимости от начальной температуры T_1 , конечной температуры T_2 и исходной равновесной концентрации кислорода при температуре T_1 .

Рассчитанные с использованием уравнения (7) возможные показания датчиков ТДА кислорода приведены на рис. 1.

Из приведенных результатов видно, что по мере раскисления теплоносителя показания датчиков кислорода переходят от линий изоконцентраций кислорода к линиям параллельным изоконцентрациям железа, равновесным с растворенным кислородом. Уменьшение концентрации кислорода и увеличение концентрации железа в свинце приводит к тому, что примесь железа начинает определять вид распределения примеси кислорода в раскисленном свинце.

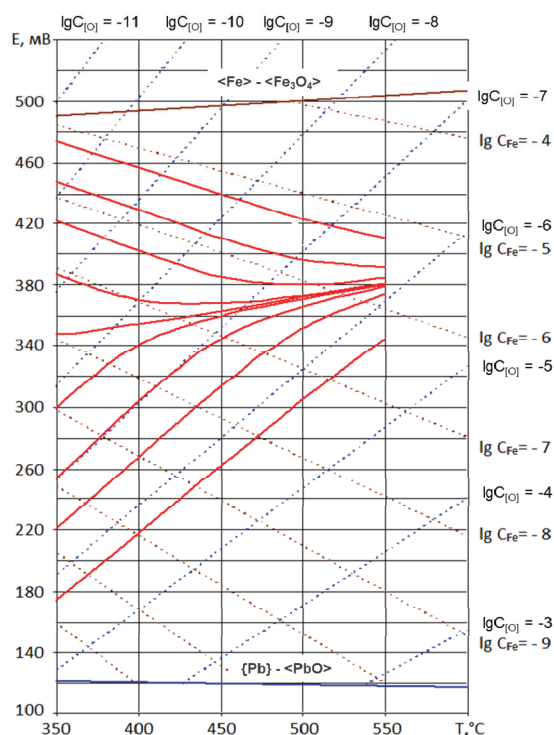


Рис. 1. Расчетные показания датчиков ТДА кислорода (электрод сравнения – Bi-Bi₂O₃) в свинце

Аналогичным образом выполняются расчеты для сплава свинец-висмут. Их результаты приведены на рис. 2.

Основными факторами, влияющими на характер распределения кислорода в ТЖМТ [2 – 7], являются:

- взаимодействие растворенных в теплоносителе кислорода и металлических примесей;
- распад и образование оксидных фаз;
- присутствие в контуре источников кислорода (например, оксид PbO) и его стоков (например, окисление диффузионно-выходящих из стали компонентов, окисление поверхностей стали);
- максимальная и минимальная температуры теплоносителя в контуре и величина их перепада;
- скорость циркуляции теплоносителя и скорость изменения температуры в контуре в целом и в его отдельных зонах;

– общее содержание кислорода и металлических примесей в теплоносителе и многое другое.

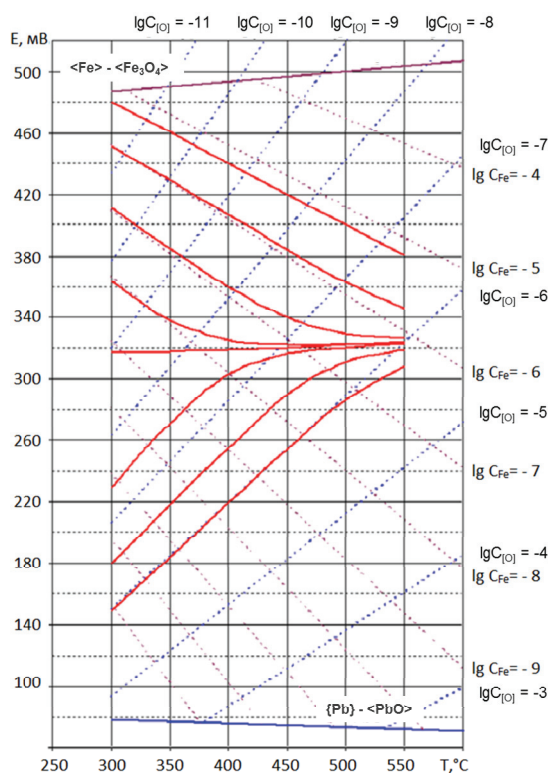


Рис. 2. Расчетные показания ДАК (электрод сравнения – Bi-Bi₂O₃) в расплаве Pb – Bi

Литература

1. Зефиров А.П. Термодинамические свойства неорганических веществ. – М.: Атомиздат, 1965. – 233 с.
2. Шматко Б.А., Троянов В.М., Русанов А.Е. Комплексная диагностика неизотермических свинцовых циркуляционных стендов методами активометрии // Сборник тезисов докладов конференции «Тепломассоперенос и свойства жидких металлов». – Обнинск, 2002. – Т. 1. – С. 27–29.
3. Шматко Б.А., Русанов А.Е. Структура окислительного потенциала в потоке свинца в момент регулирования активности кислорода // Сборник тезисов докл. конф. «Тепломассоперенос и свойства жидких металлов». – Обнинск, 2002. – Т. 1. – С. 176–178.
4. Гулевский В.А., Орлов Ю.И., Ефанов А.Д., Мартынов П.Н., Левченко Ю.Д., Ульянов В.В. Гидродинамические проблемы технологии ТЖМТ в РУ петлевой и моноблочной конструкций // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2008. – № 4. – С. 15–33.
5. Гулевский В.А., Мартынов П.Н., Орлов Ю.И., Проворов А.А., Тепляков Ю.А., Чернов М.Е. Перспективные методы контроля состояния тяжелых теплоносителей // Сборник тезисов докл. конф. «Тепломассоперенос и свойства жидких металлов». – Обнинск, 2002. – Т. 1. – С. 190–192.
6. Гулевский В.А., Мартынов П.Н., Орлов Ю.И., Чернов М.Е., Емельянцева З.И., Леонов В.Н. Обобщение результатов экспериментальных исследований поведения примеси кислорода в циркуляционных контурах с тяжелыми теплоносителями // Сборник тезисов докл. конф. «Тепломассоперенос и свойства жидких металлов». – Обнинск, 2002. – Т. 1. – С. 163–164.

Источники металлических примесей в эвтектическом сплаве 44,5 % Pb – 55,5 % Bi.

Подход к обоснованию технических условий на свинцово- висмутовый теплоноситель для реакторных установок нового поколения

Асхадулин Р.Ш., Харчук С.Е., Легких А.Ю.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
raskhadullin@ippe.ru*

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель (ТЖМТ), свинец-висмут, металлические примеси, реакторная установка нового поколения, технические условия на теплоноситель

Жидкометаллические теплоносители представляют собой раствор, основным компонентом которого является расплавленный металл-основа, а микрокомпонентами – различные примеси.

Поступление примесей в металл-основу может осуществляться двумя основными путями: генетически-производственным и эксплуатационным.

Первый путь поступления в свинец-висмут (свинец) характерен для примесей, которые находятся в свинце и висмуте по причине природного сопутствия или попадают в металлы в процессе их производства из исходного сырья. Так, например, содержание примесей производственного характера в эвтектическом сплаве 44,5% Pb – 55,5% Bi (свинце) лимитируется их содержанием в марках свинца и висмута, выпускаемых по соответствующим ГОСТ [1, 2].

Второй путь поступления примесей в теплоносители определяется условиями работы жидкометаллических контуров. К числу металлических примесей эксплуатационного характера в свинцово-висмутовом (свинцовом) теплоносителях относятся: железо, хром, никель (компоненты конструкционных сталей жидкометаллических контуров), кобальт, марганец и другие примеси, являющиеся либо легирующими добавками конструкционных сталей, либо продуктами активации теплоносителя и находящихся в нем примесей, либо продуктами деления ядерного топлива [3].

Примеси присутствуют в жидкометаллических контурах в трех основных физических состояниях: в растворенной форме, в виде избыточной твердой фазы и в виде шлаков на границе раздела жидкого металла с защитной газовой средой и отложениями на внутренних поверхностях трубопроводов. Соотношение содержаний примеси в указанных формах определяется природой примеси и условиями эксплуатации теплоносителя. Кроме того, примеси находятся в контуре в различных химических формах: в элементарной форме и в форме химических соединений [3].

О состоянии растворенной в расплаве жидкого металла примеси существуют различные мнения. Считают, что молекулы, в состав которых входят примеси, при растворении в металлическом расплаве диссоциируют на атомы или ионы. Причем, ионной форме отдается большее предпочтение [4, 5]. Температура и термическая устойчивость молекул примесей определяют степень их диссоциации в расплаве металла. Примеси, находящиеся в диссоциированной форме, как правило, более химически активны.

Если атомы или ионы, находящиеся в расплаве, обладают значительным химическим средством к другим примесным атомам, то они образуют в расплаве группиров-

ки, в пределах которых на определенный период времени возникают направленные связи.

Существование ассоциационных-диссоциационных процессов в системе расплав-примесь приводит к установлению определенной величины термодинамической активности примеси в расплаве.

Примесь, присутствующая в виде твердой фазы, может находиться в элементарном виде и в виде химических соединений. Последние образуются при взаимодействии примеси с основным компонентом расплава (Pb, Bi) или с другими примесями, компонентами конструкционных материалов. Опыт эксплуатации жидкометаллических реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем показал, что все металлические элементы-примеси (в основном являющиеся продуктами коррозии и деления ядерного топлива), сродство которых к кислороду больше, чем у свинца, образуя нерастворимые в расплаве оксиды, высаждаются на конструкционных материалах контура или концентрируются на поверхности раздела «теплоноситель – защитный газ» по причине меньшей плотности по сравнению со свинцом или свинцом-висмутом [3]. Присутствие примесей в отложениях объясняется процессами кристаллизации примесей и их соединений из теплоносителя, адгезионными и гидродинамическими явлениями.

При обосновании Технических условий на свинцово-висмутовый теплоноситель реакторных установок нового поколения следует использовать подход, заключающийся в рассмотрении следующих факторов:

- расчёта активации примесей генетическо-производственного характера и оценки минимальных значений таких примесей в загружаемом в реакторную установку теплоносителя;

- консервативной оценки минимальных значений эксплуатационных примесей (железа, хрома, никеля) в свинце-висмуте исходя из имеющихся открытых данных по пробам свинца-висмута, отобранных со стендов АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» и др. организаций ранее;

- экономическими показателями производства компонентов эвтектики (рассмотрение стоимости получения свинца марок С2, С1, С0, С00 и висмута Ви-00, Ви-1 на конкретных предприятиях);

- возможностями входного и эксплуатационного контроля примесного состава теплоносителя в условиях реакторных установок (переаттестация существующих методик химико-спектрального анализа свинца-висмута, оснащение реакторной установки приборами для проведения химического анализа проб теплоносителя и др.).

Литература

1. ГОСТ 3778-98. Свинец. Технические условия.
2. ГОСТ 10928-90. Висмут. Технические условия.
3. Асхадуллин Р.Ш. Сорбционная очистка жидкометаллических теплоносителей ядерных установок (галлий, свинец-висмут, свинец): диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Обнинск, 1997. – 161 с.
4. Морозов В.А., Шимкевич А.Л., Шматко Б.А. О формах существования примеси кислорода в жидких металлах // Сборник докладов конференции «Термодинамические и молекулярно-кинетические исследования металлических и шлаковых расплавов». – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. – С. 77–86.
5. Громов Б.Ф., Шматко Б.А. Физико-химические свойства расплавов свинец-висмут // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1996. – № 4. – С. 35–41.

Физико-химическое взаимодействие свинцово-висмутового теплоносителя с нитридным топливом и сталью оболочек ТВЭЛ

**Тимчук А.В.^{1, 2}, Крушинов Е.В.¹, Шевченко Е.В.¹, Шуваева Е.Б.¹,
Альмяшев В.И.^{1, 2}**

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова» (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»), Сосновый Бор;

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург
email: avtimchuk@etu.ru

Ключевые слова: свинцово-висмутовый теплоноситель, ТЖМТ, нитридное топливо, сталь оболочек ТВЭЛ, тяжелые аварии

Тяжелые аварии на Чернобыльской АЭС, АЭС Три-Майл-Айленд и Фукусима-1 наглядно продемонстрировали необходимость исследования запроектных аварий на АЭС. Впоследствии были проведены многочисленные экспериментальные исследования, разработаны численные модели и создана значительная расчетно-экспериментальная база для анализа и прогнозирования сценариев тяжелых аварий с потерей теплоносителя для водо-водяных реакторов. Эти знания лежат в основе материаловедческих, конструкторских и методических решений, обеспечивающих безопасность существующих и проектируемых ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

Для новых типов ЯЭУ с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ), плотным топливом и стальными оболочками ТВЭЛ существует недостаток знаний, необходимых для обоснования безопасности в условиях гипотетической тяжелой аварии. О температурных пределах устойчивости материалов и продуктах их высокотемпературного взаимодействия можно лишь косвенно судить исходя из данных о фазовых равновесиях между компонентами материалов [1, 2].

Представленное в работе экспериментальное исследование проведено с целью восполнения недостатка знаний о процессах взаимодействия материалов активной зоны реактора с ТЖМТ, нитридным топливом и стальными оболочками ТВЭЛ в ходе гипотетической тяжелой аварии. Работа выполнена в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» на комплексе экспериментальных установок «Расплав» с применением метода индукционной плавки в холодном тигле. Исходные условия для экспериментального моделирования: перегрев топлива и плавление стали оболочек ТВЭЛ с разгерметизацией активной зоны. Материалы: свинцово-висмутовая эвтектика в качестве теплоносителя (СВТ), модельное топливо на основе моонитрида урана (изготовитель АО «НИИ НПО «ЛУЧ»), ферритно-мартенситная сталь оболочек ТВЭЛ ЭП823-Ш. Моделирование условий разгерметизации обеспечивалось созданием окислительной атмосферы ($Ar + 2,5 \text{ об. } \% O_2$) над расплавом.

В ходе эксперимента была сформирована ванна двухжидкостного расплава на основе стали и СВТ в инертной атмосфере (аргон). Температура расплава была зафиксирована на уровне 1550 °С (примерно на 50 ° выше температуры плавления стали). В двухслойный расплав введена таблетка модельного нитридного топлива, после чего инертная атмосфера была заменена на аргон-кислородную смесь. В течение 15 минут расплав выдерживался при заданной температуре. Затем индукционный нагрев был отключен и двухслойный расплав с введенной топливной таблеткой был охлажден и закристаллизован в окислительной атмосфере.

Полученный слиток был фрагментирован и исследован методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Установлено образование полупрозрачного нитрида и смешанного нитрида урана-хрома на поверхности фрагментов топливной таблетки, обнаруженных в слое на основе СВТ. Проанализирован характер взаимодействия моноснитрида урана с расплавом стали. Определен состав оксидной корки на поверхности слитка.

Литература

1. Timchuk A.V. Review of phase equilibria in the Pb-Bi-Fe-Cr-Ni-UN system – Basis for a “Heavy liquid metal coolant – Fuel cladding steel – Nitride fuel” interactions / A.V. Timchuk, M.E. Kurguzkina, E.B. Shuvaeva, V.I. Almjashhev // Journal of Nuclear Materials. – 2024. – V. 589. – P. 154852. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154852>.
2. Анализ фазовых равновесий в системе материалов активной зоны реакторов с ТЖМТ и нитридным топливом / А.В. Тимчук, М.Е. Кургузкина, А.А. Андропова, Е.Б. Шуваева, В.И. Альмяшев // Научно-технический сборник «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок». – 2023. – № 3 (33). – С. 66–95. https://doi.org/10.52069/2414-5726_2023_3_33_66.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01493).

Возможности ионохроматографического метода в контроле примесного состава ЩЖМТ

Цапко Ю.В.^{1, 2}, Яснев И.М.¹, Харитонов Е.Ю.¹, Борисова К.Г.¹

¹Федеральное государственное унитарное учреждение «НИТИ им. А.П. Александрова»
(ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»), Сосновый Бор;

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого), Сосновый Бор,
iotachaos1@gmail.com

Ключевые слова: щелочные металлы, жидкометаллические теплоносители, эвтектический сплав, химический контроль, физико-химические методы анализа, реакторные установки на быстрых нейтронах

Щелочные металлы, в особенности натрий, нашли широкое применение в качестве теплоносителя для реакторных установок на быстрых нейтронах благодаря удачному сочетанию физических, теплофизических и коррозионных свойств.

Примеси, неизбежно присутствующие в теплоносителе и постоянно поступающие в него могут вызывать эффекты, усложняющие эксплуатацию установок: отложение примесей на поверхностях, повышение коррозионных эффектов, ухудшение радиационной обстановки и т. д. Поэтому к жидкометаллическим теплоносителям ядерных энергетических установок предъявляются повышенные требования по содержанию примесей.

На уровне принятого в настоящее время стандарта организации [1] на натрий реакторной чистоты для реакторов БН, для определения содержания хлора в виде хлоридов принято применение прямого потенциометрического метода. Данный подход при наличии относительной простоты применяемого оборудования обуславливает ряд недостатков, таких как рутинность подготовительных и измерительных процедур, недостаточно высокую чувствительность и селективность получаемых результатов. Последний фактор особенно критичен в условиях содержания мешающих ионов, влияющих на формирование мембранного потенциала хлорид-селективного электрода, в следствие чего, результат может существенно завышаться.

В течение уже длительного времени на отечественных АЭС с ВВЭР и РБМК широко применяется метод ионной хроматографии (ИХ), что закреплено отраслевыми стандартами [2]. Основные преимущества метода заключаются в высокой чувствительности, селективности и надежности получаемых результатов. Метод легко автоматизируем, что особенно важно в условиях проведения анализа образцов радиоактивных проб. Однако применение ИХ в контроле нормируемых показателей для АЭС с реакторами на быстрых нейтронах ограничивается только анализом водных технологических сред.

Целью настоящей работы являлось проведение исследований возможностей ионохроматографического метода для определения галогенид-ионов, в основном хлорид-ионов, а также азота в щелочных металлах. Поскольку в целом проводимая нами работа направлена на разработку методик анализа теплоносителя на основе калия и натрия, исследования проводились на их примере. Для этого использовались исходный натрий, калий и образцы эвтектического сплава, приготовленного на их основе.

Как показывают проведенные нами эксперименты направленные на решение задачи контроля качества эвтектического сплава натрий/калий ионохроматографическая схема обладает высоким потенциалом благодаря установленным нами широким возможностям определения как соотношения массовых долей натрия и калия, так и опре-

деления примесей натрия в калии и примесей калия в натрии, что в условиях, возникающих при анализе существенных спектральных помех при применении для таких задач атомной спектроскопии, безусловно, оказывается преимуществом метода.

Проведенные нами эксперименты показали, что применение ионохроматографического метода по сравнению с потенциометрическим методом позволяет существенно повысить достоверность получаемых результатов с снижением минимально определяемой концентрации хлорид-ионов почти на порядок величины: $1 \cdot 10^{-4}$ против $1 \cdot 10^{-3} \%_{\text{масс.}}$ без изменения методической схемы. Кроме того, использование ионной хроматографии позволяет определять и другие анионные примеси, что позволит получать более полную информацию о качестве теплоносителя, что может иметь большое значение как при постановке и проведении технологических процессов, особенно, в случае постановки производственного процесса с использованием новой сырьевой базы.

Задача определения азота в соответствии с принятой на уровне ОСТ [1] схемой в настоящий момент решается применением фотометрической методики с применением ртутьсодержащего реактива Несслера специфичного к аммиаку – продукту восстановительного гидролиза щелочных металлов и содержащихся в нем форм азота. Нами опробована модифицированная упрощенная схема с предварительным газоабсорбционным переносом аммиака в подкисленный раствор из высокощелочного раствора, образующегося при пробоподготовке методом прямого растворения навески щелочного металла или сплава, с ИХ определением. По сравнению с применяемым подходом, аналитическая схема существенно упрощается. Также получены положительные результаты по прямому определению аммиака в исходных растворах без стадии газоабсорбционного переноса.

Однако при проведении исследований выявлены и определенные методические проблемы применения ионохроматографического метода, в частности, как собственно влияния высокого содержания гидроксидов натрия и калия в растворах, так и связанного с этим, процесса поступления углекислого газа из окружающей атмосферы. В докладе уделено внимание решению возникших методических проблем. Предложена схема автоматизации ионохроматографического анализа примесей ЩЖМТ на примере натрия и его эвтектического сплава с калием.

Результаты исследований указывают на необходимость дальнейшего совершенствования методов анализа щелочных металлов с применением ионохроматографического метода.

Литература

1. Натрий реакторной чистоты для реакторов БН. Технические требования и методы контроля примесей. Стандарт отрасли. ОСТ 95 10582–2003. – Обнинск: ФЭИ, 2003. 75 с.
2. Лабораторный химический анализ водных сред атомных электростанций с водородным энергетическим реактором. Методики выполнения измерений. СТО 1.1.1.07.003.0727-2009. – Москва: ВНИИАЭС, 2009. 396 с.

Подходы к выбору конструкций массообменного аппарата с твердофазным источником растворенного кислорода для установок с ТЖМТ

Апальнов Е.А., Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю., Махова Т.В.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
eaapalnov@ippe.ru

***Ключевые слова:** конструкция, массообменный аппарат, растворенный кислород, регулирование, разработка, твердофазный окислитель, тяжелый жидкометаллический теплоноситель*

В тяжелом жидкометаллическом теплоносителе (Pb, Pb-Bi) для обеспечения условий формирования и поддержания в процессе эксплуатации защитных оксидных пленок на поверхностях конструкционных сталей, контактирующих с теплоносителем, необходимо регулируемое дозирование растворенного кислорода в теплоноситель. При отсутствии подпитки тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ) растворенным кислородом, окислительный потенциал теплоносителя может уменьшиться до значений, при которых начинается развитие коррозионно-эрозионных процессов. Специалистами АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» разработаны и экспериментально обоснованы конструкции массообменных аппаратов, которые позволяют реализовать твердофазный метод регулирования окислительного потенциала в ТЖМТ для различных установок.

Твердофазный метод регулирования, в отличие от газофазных методов, обеспечивает:

- отсутствие образования твердой фазы оксидов теплоносителя в процессе ввода растворенного кислорода (в отличие от использования газообразного кислорода или его смесей с инертным газом);
- возможность точного управления скоростью ввода растворенного кислорода в теплоноситель (производительностью по кислороду), что крайне проблематично реализовать с помощью газофазных методов.

Твердофазный метод регулирования окислительного потенциала ТЖМТ рекомендуется специалистами АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» в качестве основного метода поддержания заданного кислородного режима в реакторных установках с ТЖМТ.

В настоящее время создаются и эксплуатируются совершенно разные установки с ТЖМТ, которые имеют разное назначение и отличаются конструкцией, объемом теплоносителя, температурами и другими техническими параметрами. К ним можно отнести экспериментальные стенды для исследования массопереноса в ТЖМТ, испытаний конструкционных материалов, испытаний оборудования (моделей насосов, парогенераторов, имитаторов тепловыделяющих сборок и др.), фундаментальных исследований, в том числе исследований в обоснование использования ТЖМТ в термоядерных установках. Не зависимо от конструкции и назначения установки с ТЖМТ, в ней необходимо обеспечить условия коррозионной стойкости сталей, т.е. поддержание заданного кислородного режима в ТЖМТ в процессе эксплуатации.

Принцип работы массообменного аппарата и конструкция разрабатываются для каждой установки, учитывая её технические особенности и режимы работы. Создать универсальную конструкцию массообменного аппарата, которую можно было бы использовать для любой установки лишь меняя масштаб не представляется возможным.

Для того чтобы обеспечить возможность поддержания кислородного режима, как в условиях малогабаритных исследовательских установок, так и в условиях реакторных установок разной мощности коллективом лаборатории 100 АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» выполнены работы по разработке и обоснованию следующих видов массообменных аппаратов:

- с внутренним нагревателем;
- с внешним нагревателем;
- с дискретной подачей газовой среды;
- с непрерывной подачей газовой среды;
- с встроенным насосом;
- с регулировочным клапаном.

В докладе рассматриваются подходы, используемые для выбора конструкций массообменных аппаратов для установок с ТЖМТ разных типов, учитывая опыт АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» по созданию данных устройств.

Теплофизические свойства топлива водоохлаждаемых ядерных реакторов

Кузнецов В.И.¹, Лысиков А.В.¹, Федотов А.В.¹, Миссорин Д.С.¹,
Тенишев А.В.², Михальчик В.В.², Лутков М.А.²

¹ Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»), Москва,

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва
AnVFedotov@bochvar.ru

Ключевые слова: диоксид урана, уран-гадолиниевое оксидное топливо, уран-молибденовое топливо, дисилицид триурана, термическое расширение, удельная теплоёмкость, температуропроводность, теплопроводность, температура плавления

Проведено исследование теплофизических свойств топлива ядерных реакторов типа ВВЭР и АСММ методами дилатометрии, синхронного термического анализа и лазерной вспышки. Экспериментально определены термическое расширение (ТР), удельная теплоёмкость при постоянном давлении и температуропроводность с последующим расчётом коэффициента термического расширения (КТР) и теплопроводности. Температура плавления определена дилатометрически для уран-молибденового и триуран дисилицидного топлива.

Топливо UO_2 и $(U_{1-y}, Gd_y)O_{2-x}$ (промышленные таблетки с $p = 96,0-98,4$ % ТП)

Установлено, что ТР для уран-гадолиниевое топлива (УГТ) в сравнении с диоксидом урана имеет тенденцию к повышению в температурном интервале 1500–1900 К с ростом содержания гадолиния в твёрдом растворе $(U, Gd)O_2$. При этом КТР УГТ в температурном интервале 1100–1900 К превышает соответствующие значения для UO_2 на величину до 11 %. В интервале 1900–2643 К значения ТР и КТР как для UO_2 , так и для УГТ совпадают в пределах погрешности определения 5 % и не зависят от содержания гадолиния.

Температуропроводность диоксида урана и УГТ с массовой долей оксида гадолиния 3,35; 5 и 8 %, приведённая к плотности 95 % от теоретической, снижается с ростом температуры в интервале 323–2623 К. Показано, что при температуре выше 1300 К какое-либо отличие температуропроводности для диоксида урана и УГТ практически отсутствует, а при температуре ниже 1300 К температуропроводность уменьшается с ростом содержания оксида гадолиния в УГТ: на 32 % для УГТ с 3,35 мас. %; на 41 % для УГТ с 5 мас. % и до 50% для УГТ с 8 мас. % в сравнении с диоксидом урана при минимальной температуре исследования. При повышении температуры различие в значениях снижается. Все полученные температурные зависимости аппроксимируются степенной функцией, что говорит о преимущественной передаче тепла фононами.

В температурном интервале 313–1800 К значения удельной массовой теплоёмкости для УГТ и диоксида урана совпадают в пределах погрешности определения вплоть до 8 % Gd_2O_3 независимо от его массовой доли, а в температурном интервале 1800–2623 К наблюдается увеличение значений теплоёмкости с ростом содержания оксида гадолиния в УГТ. Максимальное увеличение теплоёмкости для УГТ в сравнении с диоксидом урана наблюдается при максимальной температуре: на 8 % для УГТ–3,35 %; на 30 % для УГТ–5 % и на 52 % для УГТ–8 %.

Установлено отличие зависимостей теплопроводности УГТ от температуры в сравнении с диоксидом урана. До температуры примерно 1500 К зависимости УГТ ле-

жат ниже, чем для диоксида урана, что обусловлено снижением температуропроводности. Чем больше концентрация оксида гадолиния в УГТ, тем большее снижение теплопроводности: на 30, 39 и 49 % соответственно для массовой доли Gd_2O_3 3,35; 5 и 8 % в сравнении с диоксидом урана при минимальной температуре исследования. В температурном интервале 1500–2100 К значения теплопроводности для диоксида урана и УГТ практически совпадают в пределах погрешности определения. В температурном интервале 2100–2640 К наблюдается тенденция увеличения теплопроводности УГТ с ростом содержания оксида гадолиния, что вызвано соответствующим увеличением удельной теплоёмкости. При этом значение теплопроводности УГТ выше на 11, 22 и 39 % соответственно для массовой доли Gd_2O_3 3,35; 5 и 8% в сравнении с диоксидом урана.

По результатам работ проведена метрологическая аттестация методик выполнения испытаний (МВИс) рассмотренных теплофизических свойств.

Топливо (U, Mo) с массовой долей Mo 9,5 %, изготовленное порошковой металлургией, с $\rho = 86\text{--}91$ % ТП

ТР уран-молибденового топлива примерно до 1,5 и 3 раз выше, чем у диоксида урана и сплава циркония типа Э110 соответственно в температурном интервале 313–1268 К. В пределах разброса экспериментальных данных усредненная зависимость КТР исследованных образцов практически соответствуют результатам отечественных и зарубежных исследователей, полученным ранее методом рентгеновской дифракции. До температуры 1273 К КТР уран-молибденовых сплавов примерно до 2 раз выше в сравнении с диоксидом урана и β -фазой сплава циркония типа Э110 и до 3 раз по сравнению с α -фазой сплава циркония типа Э110.

Определение удельной теплоемкости до 1264 К показало:

- нелинейный характер при повышении температуры, обусловленный образованием метастабильных фаз, поэтому аппроксимацию экспериментальных данных целесообразно разбивать на два температурных интервала 314–744 К и 749–1264 К;
- удовлетворительную корреляцию в пределах погрешности с опубликованными ранее данными;
- в сравнении с диоксидом урана теплоёмкость исследованных образцов примерно в 1,7 раза ниже.

Температуропроводность топлива в температурном интервале 670–1287 К снижается до четверти в сравнении с уран-молибденовым сплавом с массовой долей молибдена 10 %, изготовленным методом переплавки, с плотностью 95 % от теоретической. В сравнении с диоксидом урана температуропроводность уран-молибденовых таблеток выше примерно в 4–10 раз в рассмотренном интервале температур.

Расчет теплопроводности на основе полученных экспериментальных данных показал, что:

- до 900 К наблюдается хорошее совпадение с модельной корреляцией, опубликованной ранее для образцов уран-молибденовых сплавов с массовой долей молибдена от 9 до 10,7 %, с учетом погрешности и неопределенности;
- выше 900 К значения теплопроводности для таблеток, изготовленных по порошковой технологии, меньше примерно на 10% нижней границы модельной корреляции, рассчитанной для таблеток, изготовленных методом переплавки, для которых плотность близка к теоретической (98 – 99 %);
- теплопроводность уран-молибденовых таблеток примерно на порядок выше в сравнении с диоксидом урана.

Установлена хорошая корреляция с фазовой диаграммой Mo-U определённых экспериментально температур солидус и ликвидус: $T_s = (1360 \pm 15)$ К и $T_l = (1438 \pm 12)$ К.

Топливо U_3Si_2 , изготовленное порошковой металлургией, с $\rho = 91\text{--}97\%$ ТП

Показано, что величина плотности практически не оказывает влияние на удельную теплоёмкость и термическое расширение. Наличие вторичных фаз приводит к снижению температуропроводности примерно на 10 – 15 % в температурном интервале 1600 – 1700 К в сравнении с образцами в однофазном состоянии. Нелинейная зависимость удельной теплоёмкости обусловлена вторичными фазами в исходных таблетках, чем их меньше, тем меньше тепловых эффектов при высокотемпературном нагреве. ТР и КТР практически не зависят от наличия вторичных фаз.

Фазовый состав дисилицида триурана не оказывает значимого влияния на теплопроводность таблеток до температуры примерно 1200 К. Выше этой температуры теплопроводность таблеток с заметным количеством вторичных фаз снижается и при максимальной температуре исследования полученные значения на 16 – 21 % ниже в сравнении с таблетками, которые находятся практически в однофазном состоянии. Сравнение полученных данных с соответствующими значениями для топлива ВВЭР показывает, что при температуре более 400 К теплопроводность диоксида урана существенно ниже, а при максимальной температуре исследования (1489 К) теплопроводность таблеток дисилицида триурана уже в 6,5 – 8,3 выше.

Средние температуры плавления для партий таблеток со вторичными фазами и практически без них составили 1808 и 1834 К соответственно, а температурные интервалы с учётом приборной погрешности: (1782 – 1828) и (1808 – 1853) К соответственно. Согласно фазовым диаграммам температура плавления в случае однофазного состояния дисилицида триурана выше: 1913 – 1938 К. Таким образом, наличие большего количества вторичных фаз приводит к более значительному снижению температуры плавления.

Проблемы получения высокотемпературной стали с использованием термитных реакций

Загоруйко Ю.И., Ганичев Н.С., Ильичева Н.С., Коновалов М.А.,
Чибисова А.С., Сурин В.И.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
sodium@ippe.ru

Ключевые слова: неизотермический контур, термодинамическая активность углерода, примеси, натриевый теплоноситель, поле температуры, химический анализ

Моделирование распределений термодинамической активности углерода в натриевом теплоносителе БН необходимо для надёжного прогнозирования интенсивности и направления массопереноса углерода между конструкционными материалами оборудования реакторов, а также для выбора соответствующих средств контроля термодинамической активности углерода в натрии и их характеристик. Для характеристики процессов переноса углерода между конструкционными материалами контура общая концентрация углерода в натриевом теплоносителе не информативна, поскольку в этих процессах участвует только растворимый в натрии углерод.

Система «натрий – углеродсодержащие примеси» при рабочих температурах неизотермических контуров реакторных установок с натриевым теплоносителем является двухфазной и многокомпонентной по химическому составу. При концентрациях общего углерода ~ 10 ppm соотношение между концентрациями растворенного и нерастворенного углерода равновесной системы может изменяться в зависимости от температуры в пределах двух порядков величины. Значение этого соотношения для неравновесных систем (неизотермических контуров) зависит от поля температур, гидродинамических характеристик потока и характеристик системы «натрий – углеродсодержащие примеси». Сложность рассматриваемой системы исключает возможность теоретического анализа её поведения.

В докладе представлены основные положения возможного подхода к решению этой задачи с учётом имеющегося на сегодня опыта измерений термодинамической активности в натриевом теплоносителе ЯЭУ и экспериментально обоснованных представлений о физико-химических аспектах поведения углерода в неизотермических натриевых контурах.

Базовыми являются следующие положения:

1) Равновесной формой существования углеродсодержащих примесей в натрии при температурных режимах ЯЭУ преимущественно являются элементарный углерод и карбиды тугоплавких металлов [1].

2) Основное количество углерода в натриевом теплоносителе ЯЭУ присутствует в виде взвешенной фазы, транспортируемой потоком натрия. Характерный размер частиц взвешенной фазы соответствует субмикронному диапазону. При номинальных режимах ЯЭУ дисперсная система частиц углерода в натриевом потоке характеризуется фракционной, седиментационной и концентрационной стабильностью.

3) Кинетика растворения частиц взвешенной фазы углерода контролируется скоростью диффузионных процессов. Вследствие малых значений среднего времени пребывания взвешенной фазы в высокотемпературной зоне контура, растворение частиц взвешенной фазы углерода пренебрежимо мало [2].

4) Распределение термодинамической активности углерода в натрии в неизотермическом контуре определяется полем температур. При этом коэффициент активности

является величиной, обратной предельной растворимости углерода в натрии при соответствующей температуре [3].

5) Концентрация растворенного углерода в натрии неизотермического контура соответствует концентрации насыщения при температуре натрия в низкотемпературной зоне контура.

Для моделирования распределения термодинамической активности углерода в циркуляционных контурах БН необходимо периодическое измерение термодинамической активности углерода в натрии в высокотемпературной зоне контура. Эти измерения могут выполняться при помощи равновесных образцов стандартов (фольга толщиной 0,2–0,3 мм массой 1–2 г, из сплавов Fe-12Mn, Fe-10Ni или никеля высокой чистоты), выдерживаемых в высокотемпературной зоне контура в течение времени достаточного для достижения равновесного распределения углерода между натрием и материалом образцов.

Подобные измерения термодинамической активности углерода выполнялись на экспериментальных стендах, БН-600 и зарубежных РУ с натриевым теплоносителем. В частности, измерение термодинамической активности может найти применение при проведении входного контроля натрия промышленного производства при заполнении натрием контуров вводимых в эксплуатацию РУ.

В докладе приведен анализ возможных источников погрешности расчетного моделирования и экспериментального определения термодинамической активности в натриевом теплоносителе ЯЭУ.

Литература

1. Козлов Ф.А., Ковалев Ю.П., Воробьева Т.А. Исследование температурной и концентрационной зависимостей термодинамической активности углерода в натрии / Сб. статей «Теплофизические исследования» под ред. А.Д. Ефанова. – Обнинск-99. – С. 207–217.
2. Загорулько Ю.И., Ганичев Н.С., Коновалов М.А. Исследование кинетики растворения графита в ламинарных потоках натрия // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – № 5. – С. 134–139.
3. Загорулько Ю.И., Ганичев Н.С., Коновалов М.А., Ильичева Н.С. Проблемы моделирования науглероживающего потенциала натриевого теплоносителя // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – № 1. – С. 182–188.

К вопросу о смачиваемости стали 12X18H9T жидким оловом

Алчагиров Б.Б., Канаметова О.Х., Ширяев К.А., Дышекова Ф.Ф.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» (КБГУ), Нальчик
Killer077007@mail.ru

Ключевые слова: жидкие металлы, олово, конструкционные стали, смачиваемость, температура, капиллярно-пористые системы, ядерные энергетические установки, защита поверхности первой стенки, взаимодействие жидких металлов с поверхностью, плавление, взаиморастворимость

Смачиваемость жидкими металлами поверхностей сталей вызывает повышенный научный и технологический интерес для современной техники и технологии в целях совершенствования процессов лужения, пайки и т.д. В частности, олово обладает физико-химическими свойствами, основным из которых является коррозионная стойкость, определяющая область его использования и позволяющая применять для получения адгезионно-прочных антикоррозионных покрытий на сталях, алюминии, меди, железе и других материалах, которые не разрушаются при их механической деформации, а добавки олова к многим металлам приводят к улучшению физико-химических свойств получаемых сплавов [1, 2]. Жидкое олово входит в число металлов-кандидатов для возможного использования в качестве компонента покрытий и пропитки капиллярно-пористых систем (КПС) тугоплавких облицовочных пластин первых стенок ядерных энергетических установок (ЯЭУ), обладающего незначительной активацией в широкой температурной области ($300 < T < 1300$ °С) [3]. Действительно, поверхности нержавеющей стали и тугоплавких металлов обычно подвержены эрозии в результате нейтронного облучения и интенсивного притока водорода и т.д., ухудшающие их термомеханические свойства, тогда как использование жидких металлов, обладающие самовосстанавливающимися свойствами, улучшает срок службы и надежность защитных пластин [4]. Об этом свидетельствуют результаты работы [3], в которой впервые были начаты испытания, пропитанные чистым оловом КПС в условиях, когда лимитер токамака был подвергнут кратковременным воздействиям плазмы с тепловой нагрузкой 18 МВт м^{-2} и продемонстрировано, что при этих условиях КПС с оловом остается работоспособной.

Между тем температурные зависимости углов смачиваемости $\theta(T)$ жидким оловом и его сплавами конструкционных сталей и тугоплавких материалов, а также капиллярно-пористых систем на их основе, изучены пока недостаточно [1, 4, 5]. В данном сообщении приведены результаты изучения $\theta(T)$ жидким оловом полированной поверхности нержавеющей высоколегированной стали марки 12X18H9T. Измерения были осуществлены в интервале от 510 до 925 К с погрешностью около 1,5 угловых градусов методом лежащей капли. По плану эксперимента, при повышении температуры (со скоростью около в 200 °С/час) делались «температурные» остановки и выдержка по времени на 20–30 мин. На это время обеспечивалось строгое постоянство температуры с тем, чтобы в системе «жидкая капля – подложка» устанавливалось термодинамическое равновесие и в конце ее производилась видео- или фотосъемка профиля капли олова на подложке. Они же и использовались для автоматизированной обработки массива видеок кадров по разработанным нами программам определения углов смачивания и строились графики зависимостей $\theta(T)$.

Основные легирующие элементы в стали аустенитного класса 12X18H9T заводской поставки, согласно сертификации, составляют (в мас. %): 16–18 Cr; 12–18 Ni;

$\leq 2,0\text{--}3,0 \text{ Mn}$ и $\leq 1,0 \text{ Si}$. Олово (марки ОВЧ-000 по ГОСТ 860-75), ввиду его достаточной чистоты, перед опытами подвергалась лишь переплавке и фильтрационной очистке от окислов при температуре около 1000 К в условиях сверхвысокого вакуума.

Температура стальной подложки с каплей олова контролировалась (в зависимости от ее абсолютной величины) с точностью от $\pm 0,1 \text{ K}$ при невысоких и до $\pm 1 \text{ K}$ – при $T \sim 1000 \text{ K}$. Используемая методика и процедура подготовки жидких образцов и подложек обеспечивали их отдельную термовакуумную обработку с помощью автономных нагревателей с целью предотвращения самопроизвольного и/или преждевременного контакта жидкого олова после его расплавления на подложку до полного завершения термовакуумной обработки.

Из полученных в работе результатов по изучению $\theta(T)$ стали 12X18H9T жидким оловом следует, что вначале, в диапазоне температур от 510 до 850 К, наблюдается медленное, почти линейному закону, уменьшение углов смачивания $\theta(T)$ от 120° до 110° угловых градусов. Но дальнейшее повышение температуры контактной пары «жидкое олово – сталь 12X18H9T» до 860–870 К приводит к резкому, практически катастрофическому уменьшению краевых углов смачивания от 110° до 10° и менее. Из этого следует, что на температурной зависимости $\theta(T)$ чистым жидким оловом поверхности стали 12X18H9T фиксируется особенность в виде катастрофического уменьшения углов смачиваемости при $T = 870 \text{ K}$, т.е. наличие пороговой температуры смачиваемости.

В литературе имеются сведения о подобных пороговых температурах смачиваемости [5, 6]. Из них следует, что в основном они обусловлены присутствием окислов на поверхностях металлов и химическими реакциями с их участием в процессах смачивания, поскольку при невысоких температурах поверхности сталей обычно покрыты оксидными пленками, не смачиваемые жидкими металлами. В [6] методами электронной и фотоэлектронной спектроскопии изучались изменения химического состава, структуры и толщины окисных пленок на поверхности сталей при их термической обработке. Выяснилось, что при комнатной температуре окисные пленки имеют толщину около 2–3 нм, но с повышением температуры разрушаются, а компонентом стали, определяющим степень стабильности окисной пленки, является оксид хрома, который начинает при 870 К рекомбинировать в вакууме с хромом. Поэтому в данной области температур на поверхностях сталей происходят процессы разрушения оксида хрома, что приводит к уменьшению углов смачивания жидкими металлами стали, т.е. к улучшению смачиваемости. Более того, при этом на границах жидких металлов с твердыми могут образовываться интерметаллические соединения, также способные влиять и существенно изменять смачиваемость. В [7] показано, что на границах разделов жидкого олова с чистым железом и нержавеющей сталью (Sn/Fe и Sn/FeCr) действительно образуются интерметаллиды FeSn_2 и CrSn_2 . Отметим, что при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ растворимость в олове основы нержавеющей сталей – железа (около 70 %), достигает 5 ат. %Fe.

Сравнение наших результатов с данными [6] показывает, что углы смачивания в низкотемпературной области измерений существенно различаются, но, по мере повышения температуры, краевые углы смачивания $\theta(T)$ в обеих работах уменьшаются, стремясь к одному пределу с практически одинаковыми значениями θ (около 10–20 угловых градусов).

При интерпретации полученных результатов нами обнаружено, что пороговая температура смачиваемости жидким оловом поверхности стали 12X18H9T (около 870 К), совпадает с началом взаимной растворимости жидкого олова с материалом стальной подложки при таких же температурах, и наоборот [4, 7]. Поэтому мы полагаем, что пороговая температура смачиваемости $\theta_{\text{пор}}$ не в меньшей степени связана не

только с присутствием окислов и их влиянием на температурную зависимость $\theta(T)$, но также обусловлена стартовыми процессами взаимного растворения и взаимодействием легирующих элементов стали 12X18H9T и жидкого олова.

Таким образом, на температурной зависимости углов смачиваемости $\theta(T)$ жидким оловом поверхности нержавеющей стали 12X18H9T экспериментально установлено наличие пороговой температуры смачиваемости, равная около 870 К. По нашему мнению, она обусловлена и связана не только с наличием окисных пленок, но и с началом процессов заметного взаимного растворения и взаимодействия легирующих элементов в стали 12X18H9T и жидкого олова.

Литература

1. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
2. Свойства элементов / Под ред. М.Е. Дрица – М.: Металлургия, 1985. – С. 292–302.
3. Mazzitelli G. et al. Experiments on the Frascati Tokamak Upgrade with a liquid tin limiter // Nuclear Fusion. – 2019. – V. 59. – No 9. – P. 096004.
4. Вертков А.В., Люблинский И.Е. Опыт разработки жидкометаллических элементов, обращённых к плазме стационарного токамака (Обзор) // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. – 2017. – Т. 40. № 3. – С. 5–13.
5. Naidich Y.V. The Wettability of Solids by Liquid Metals // Progress in Surface and Membrane Science. Edited by D.A. Cadenhead and J.F. Danielli – NY: Academic Press, 1981. – V. 14. – P. 353.
6. Prozenko P., Terlain A., Traskine V., Eustathopoulos N. The role of intermetallics in wetting in metallic systems // Scripta Materialia. – 2001. – V. 45. – P. 1439–1445.
7. Pashechko M., Vasylyv C. Solubility of metals in low-melting melts // Zeitschrift für Metallkunde. – 1997. – V. 88. – No 6. – P. 484–488.

Оценка критической температуры эвтектического расплава натрий-калий

Алчагиров Б.Б., Канаметова О.Х., Хабилов З.Ю., Дышекова Ф.Ф.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» (КБГУ), Нальчик
khabilov17@gmail.com

Ключевые слова: щелочные металлы, натрий, калий, эвтектические сплавы, поверхностное натяжение, температурные зависимости, расчеты, критические температуры

Исследования поверхностного натяжения (ПН) ртути и ее амальгам и в настоящее время остаются актуальными, так как они, обладая уникальными физико-химическими свойствами, являются востребованными материалами для решения множества практических задач современной техники и технологии. Данные о ПН ртути необходимы для проектирования парогенераторов бинарных энергетических установок, для совершенствования технологии производства хлора, растворения урановых блоков, использованных в атомной энергетике, в приборостроении, медицине и т. д.

Изучение физико-химических свойств жидких щелочных металлов (ЩМ) и сплавов с их участием представляет важную проблему, в успешном решении которой заинтересована теория и востребована практикой, поскольку это необходимо для дальнейшего совершенствования имеющейся техники и разработки новейших технологий. В частности, натрий-калиевый сплав эвтектического состава (32 ат. % Na в K) используется в качестве теплоносителя в бортовых ядерных реакторах ракетно-космического назначения, а также находит все более широкое применение в различных инновационных неядерных технологиях (тепловые трубы и др.) [1–2]. Критические параметры вещества (критические температуры ($T_{кр.}$), данные о давлении насыщения и др.) необходимы для построения уравнений состояния в качестве «пробного камня» для тестирования различных теорий жидких металлов, плотной плазмы и т.д. [3, 4].

Описание свойств флюидов, в том числе и критических температур ($T_{кр.}$) жидких металлов, раньше производилось в основном расчетно-полуэмпирическими методами с использованием опытных данных о температурных зависимостях плотности, сжимаемости, поверхностного натяжения (ПН) и др. свойств (Ван-дер-Ваальс, Катаяма и Гуггенгейм, В. Семенченко, графический метод Гроссе и др.). Расчеты в рамках различных модификаций кубического уравнения состояния Ван-дер-Ваальса дают лишь приближенные значения $T_{кр.}$ в окрестности критической области температур. Их анализ дается в работах Л. Фокина, М. Мартынюк и др. Согласно [5, 6], при оценке $T_{кр.}$ металлов учитывалась димеризация молекул паров ЩМ, но сравнение с данными $T_{кр.}$ [6] показало, что расхождения с рекомендуемыми слишком велики. С. Задумкин на основе развитой им электронно-статистической теории поверхностного натяжения металлов получил соотношение для оценки критической температуры металлов и рассчитал с его помощью значения $T_{кр.}$, удовлетворительно согласующиеся с опытными данными.

Хотя существуют много экспериментальных методов определения критических температур ($T_{кр.}$) жидких металлов [5, 6] и др., но подавляющее большинство имеющихся в литературе опытных данных о $T_{кр.}$ были получены в сравнительно низких и/или ограниченных температурных интервалах, к тому же, часто лежащих вдали от $T_{кр.}$. Более того, многие опыты были выполнены в прошлом веке, когда чистота щелочных металлов была недостаточно высокой. В результате расхождение между опытными данными о критических параметрах жидких металлов достигало 10 %, а для облас-

ти предкритических температур, представляющей наибольший интерес для более точных расчетов и оценок $T_{кр.}$ еще больше.

В настоящее время наиболее полные сведения о критических температурах имеются в основном для чистых металлов, тогда как данных о $T_{кр.}$ сплавов гораздо меньше. Причинами тому послужили отсутствие достаточной статистики данных о температурных и концентрационных зависимостях ПН бинарных систем щелочных металлов, особенно в области высоких температур [7–9]. Поэтому в данной работе ставится задача приближенной оценки критической температуры эвтектического расплава системы натрий-калий. Как и в [7], расчеты $T_{кр.}$ осуществлены с использованием экспериментальных данных о температурных зависимостях $\sigma(T)$ ПН и его компонентов [7, 9], аппроксимированные линейными уравнениями вплоть до критических температур $T_{кр.}$: $\sigma(T) = \sigma_{пл.} - d\sigma/dT \cdot (T_{кр.} - T_{пл.})$, где σ – поверхностное натяжение, $T_{пл.}$ – температура плавления эвтектической сплава. Отметим, что по этой причине полученные данные о $T_{кр.}$ и носят оценочный характер, поскольку линейная зависимость ПН $\sigma(T)$, как отмечено выше, имеет место для высокочистых металлов и диапазоне температур, не слишком близких к критической области. Для металлических сплавов линейную зависимость ПН могут иметь эвтектические сплавы, к которым относится система натрий-калий. Но анализ литературы показывает [8, 9], что имеющиеся данные о температурных и концентрационных зависимостях ПН сплавов $\sigma(x, T)$ бинарных систем щелочных металлов, в том числе и Na-K, еще недостаточны и, к тому же, значительная часть из них не обладают достаточной точностью и надежностью. В данной работе для расчетов $T_{кр.}$ в качестве «входных параметров» использованы данные о ПН $\sigma(T)$ эвтектического расплава $Na_{32}K_{68}$ из работ [8, 9]. Результаты расчетов $T_{кр.}$ расплава $Na_{32}K_{68}$ и его чистых компонентов показаны в сводной таблице. Из анализа ее содержания можно заключить, что сделанное при расчетах $T_{кр.}$ допущение о возможности линейной экстраполяции ПН сплава $\sigma(x, T)$ эвтектического состава вполне оправдалось, поскольку температурный коэффициент ПН $-d\sigma/dT$ эвтектики как по абсолютной величине, так и по знаку, оказались такими же, как и у чистых компонентов. Из-за отсутствия в литературе данных о $T_{кр.}$ расплава $Na_{32}K_{68}$ пришлось ориентироваться на данные $T_{кр.}$ чистых натрия и калия [6, 7, 10]. Лучшее согласие результатов наших расчетов $T_{кр.}$ с литературными обнаруживается для натрия. Для калия $T_{кр.}$ существенно ниже рекомендуемых, хотя согласно А. Кирияненко (1970 г.), а также В. Семенченко и П. Пугачевич (1981 г.), $T_{кр.}$ калия составляют 1790 К и 1924 К соответственно, что несколько ниже или находится в пределах погрешностей измерений и расчетных данных.

T, K	ПН калия, (мН/м)	ПН эвтектич. сплава $Na_{32}K_{68}$	ПН натрия, (мН/м)
400	108	122	197
600	94	102	176
800	79	92	157
1000	64	77	138
Темпер. коэфф. ПН $(-d\sigma/dT), Н/м \cdot град.$	0,073	0,075	0,098
$T_{кр.}$, данная работа	1873	2027	2404

Литература

1. Ивановский М.Н., Логинов Н.И., Миловидова А.И., Морозов В.А., Плетенец С.С. Калий – натриевый сплав эвтектического состава – теплоноситель космических ядерных

- энергетических установок // Теплофизические свойства веществ. Труды международного семинара. 11 – 15 июня 2001 г. – Нальчик: КБГУ. – С. 116–120.
2. Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б. Щелочные металлы и сплавы с их участием – перспективные материалы современной техники и энергетики / Сб. «Физика и химия перспективных материалов». – Нальчик: КБГУ. 1998. – С. 40–44.
 3. Анисимов М.А. Уравнение состояния и методы расчета теплофизических свойств в окрестности критической точки // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – ТФЦ. – М.: ИВТАН. – 1980. – № 5 (25).
 4. Alchagirov A.B., Perdew J.P., Boettger J.C. et.al. Energy and pressure versus volume: Equations of state motivated by the stabilized jellium model // *Phys. Rev., B.* – 2001. – V. 63. P. 224115.
 5. Мартынюк М.М. Расчеты на основе измерений теплофизических свойств металла в окрестности критической точки методом медленного нагрева в жаропрочных капиллярах // *Журн. физ. химии.* – 1983. – Т. 57. – № 4. – С. 810.
 6. Гоголева В.В., Фокин Л.Р. Оценка критических параметров лития и франция. – М.: Препринт ИВТ АН СССР. – 1981. – № 1-061. – 44 с.
 7. Alchagirov B.B., Karamurzov B.S., Kalazhokov Kh.Kh., Kokov Z.A., Kyasova O.Kh. Estimation of the critical temperatures of alkaline metals on the basis of specified data on surface tension polytherms // *Journal of Physics: Conference Series.* IOP Publishing. – 2019. – V. 1147. – No 1. – P. 012004.
 8. Bystrov P.I., Kagan D.N., Krechetova G.A., Shpil'rain E.E. *Liquid-Metal Coolants for Heat Pipes and Power Plants*, Ed. V.A. Kirillin. – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1990. – 272 p.
 9. Алчагиров Б.Б. Поверхностное натяжение жидких щелочных металлов и сплавов с их участием. – М.: ТФЦ. РАН. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. 1991. № 3(89)/4(90). 180 с.
 10. Мозговой А.Г., Фокин Л.Р., Чернов А.И. Критические параметры щелочных металлов. – ТФЦ. – М.: ИВТАН. – 1984. – № 5 (49). – С. 3–56.

Оптимизация твердофазной технологии переработки РАО щелочных теплоносителей на полномасштабном образце установки «Минерал-100/150»

Смыков В.Б.¹, Алексеев В.В.¹, Легких К.Г.¹, Жданов В.П.¹, Коврежкин Н.В.²,
Гуч И.В.², Никитин Э.М.³, Семенов Д.А.³, Рыбин А.Н.³,
Семин С.Д.³, Ермаков А.И.³

¹ Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск,

² ОИЦ «НИКИМТ – Атомстрой», Москва,

³ АО «ТВЭЛ», Москва

smykov@ippe.ru

Ключевые слова: твердофазное окисление (ТФО), щелочной жидкометаллический теплоноситель (ЩЖМТ), установка МИНЕРАЛ, быстрые реакторы с натриевым теплоносителем, скорость выщелачивания по изотопу ¹³⁷Cs

Для масштабирования технологии ТФО щелочных теплоносителей при выводе из эксплуатации быстрых реакторов разработана установка МИНЕРАЛ-100/150 для разовой переработки 100–150 литров отработанного щелочного теплоносителя [1]. Технология ТФО позволяет перерабатывать натрий в твердый минералоподобный продукт практически без выделения водорода.

Разработана расчетная методика и проведены расчетно-теоретические исследования в обоснование вертикальной геометрии установки МИНЕРАЛ-100/150 с замкнутой системой газового переноса тепла из РЕ в шлаковый контейнер. Выполнен расчет теплопереноса в системе принудительного газового охлаждения участка твердофазного окисления натрия с одновременным нагревом шлака в шлаковом контейнере для различных вариантов конструкции РЕ. Получено, что применение аргона для промежуточного газового теплообменника-охладителя позволяет снизить равновесную температуру газа в системе после шлакового контейнера с 530–560 °С до необходимого уровня 150–200 °С, обеспечить технологическую безопасность и сохранить тем самым цикличность эксплуатации образца установки (2–3 цикла в сутки). Рассчитана температура корпуса аппарата МИНЕРАЛ-100/150 при развитии температуры в РЕ до 1100–1200 °С (800–1000 °С на оболочке РЕ). Расчеты показали, что при размещении комбинированной теплоизоляции внутри нижней части аппарата (между страховочным кожухом и корпусом аппарата) температура металла корпуса не превышает 100 °С. Данный результат имеет решающее положительное значение с точки зрения безопасности технологии ТФО, а также ресурса работы аппарата (корпус не испытывает термических ударов при циклическом режиме эксплуатации). Выполнена конструкторская и монтажная компоновка полномасштабного образца установки МИНЕРАЛ-100/150 в зд. 173А.

Сделана оценка применения технологии ТФО и варианта установки МИНЕРАЛ-150 с аргоновой замкнутой системой охлаждения РЕ и нагрева шлака для переработки натрия 1-го контура РУ БН-350. Показано, что вариант установки МИНЕРАЛ-150 реализуется в том же корпусе аппарата без его переделок. Весь объем накопленных РАО натрия 1-го контура (около 680 м³) может быть переработан в твердый минералоподобный продукт за 3–4 года. Имеющиеся возможности в реакторном зале позволяют разместить РЕ с продуктом переработки натрия 1-го контура без использования защитных контейнеров в пустых бассейнах выдержки РУ БН-350 для промежуточного хранения без строительства дополнительного приповерхностного хранилища ТРО [2].

Проведены химико-аналитические и радиохимические исследования на стойкость твёрдого продукта ТФО натрия 1-го контура на выщелачиваемость по изотопу ^{137}Cs . Получено, что уже после 3-х недель испытаний продукт ТФО отвечает нормативным требованиям по водоустойчивости – скорость выщелачивания по ^{137}Cs ниже 10^{-3} г/(см² сут) [3]. А после 3-х месяцев испытаний была на уровне $4,2 \cdot 10^{-5}$ г/см² сут. Данный результат практически совпадает с результатом на выщелачивание модельного цементного компаунда, но у последнего удельная радиоактивность была 10^5 Бк/кг, что в 800 раз ниже, чем у продукта ТФО ($8 \cdot 10^7$ Бк/кг).

Литература

1. Смыков В.Б. Проблемы вывода из эксплуатации быстрых реакторов и пути их решения на базе исследовательского реактора БР-10 // Известия ВУЗов. Ядерная Энергетика. – 2022. – № 2. – С. 90–101.
2. Смыков В.Б., Журин А.В., Легких К.Г., Алексеев В.В., Жданов В.П. Переработка теплоносителя первого и второго контуров при выводе из эксплуатации реактора БН-350 // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 164–169.
3. Смыков В.Б., Легких К.Г., Трифанова Е.М., Раскач О.В. Метод твердофазного окисления отработавшего ЩЖМТ. Соответствие критериям приемлемости для захоронения // Тезисы докладов XVI Международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров», 2023. – С. 225–227.

Определение соответствия продукта твердофазного окисления отработавшего натриевого теплоносителя критериям приемлемости к длительному хранению

Смыков В.Б., Легких К.Г., Трифанова Е.М., Грушичева Е.А.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
kglegkikh@ippe.ru

Ключевые слова: твердофазное окисление (ТФО), щелочной жидкометаллический теплоноситель (ЩЖМТ), исследовательский реактор БР-10, установка МИНЕРАЛ, быстрые реакторы с натриевым теплоносителем, скорость выщелачивания по изотопу ^{137}Cs , пористость продукта ТФО, механическая прочность продукта ТФО

Вывод из эксплуатации любого объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) является неотъемлемой частью его «жизненного цикла» и вносит весомый вклад в обеспечение радиационной безопасности этого объекта. Концепция вывода из эксплуатации согласно ФЗ-170 «Об использовании атомной энергии» должна быть проработана на стадии принятия решения о создании ОИАЭ. Для быстрого реактора период окончательного останова осложняется необходимостью максимально безопасного обращения с отработанными радиоактивными (по ^{137}Cs) щелочными теплоносителями (ЩЖМТ).

Полигоном для разработки технологий вывода из эксплуатации реакторных установок типа БН является исследовательский реактор БР-10. К настоящему времени разработанным на БР-10 методом твердофазного окисления щелочных металлов (ТФО) переведено в пожаровзрывобезопасное состояние более 12 м^3 сдренированного натрия [1]. Однако конечный продукт применения технологии иммобилизации РАО должен соответствовать критериям приемлемости для захоронения. Одним из таких критериев для шлакоподобных компаундов является скорость выщелачивания. Определение скорости выщелачивания радионуклидов из формы РАО рекомендуется выполнять с учетом ГОСТ Р 52126-2003. Для этого было произведено твердофазное окисление модельного образца натрия с добавлением хлорида цезия-137. Удельная активность образца продукта ТФО составила $3 \cdot 10^5$ Бк/кг. Образцы измельчали, после чего отбирали необходимую фракцию для последующих исследований. Контактную воду меняли через 1, 3, 7, 10, 14, 21, 28 суток. Далее измеряли удельную активность растворов после выщелачивания и вычисляли скорость выщелачивания цезия-137. Для сравнения полученных данных было аналогичным образом проведено определение скорости выщелачивания для модельных образцов цементированных РАО. Удельная активность образцов по цезию-137 составила 10^5 Бк/кг. Кинетика выщелачивания отражена на рис. 1. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 51883-2002 к захоронению в бетонные могильники допускаются отвержденные РАО, скорость выщелачивания которых ниже $10^{-3} \text{ г/см}^2 \cdot \text{сут}$ [2].

Согласно РБ-155-20 определение пористости производится для контроля значения других характеристик – в данном случае скорости выщелачивания радионуклидов из компаунда. Для определения пористости измельченные образцы, используемые для определения скорости выщелачивания, массой 0,5 г помещали в ячейку анализатора газовой сорбции NOVA и анализировали объем и размер пор, согласно встроенным методикам. Результаты измерений представлены в таблице.

Приведенные в таблице параметры могут быть связаны со скоростью выщелачивания радионуклидов и оказывать косвенное влияние. Учитывая, что продукт ТФО

имеет развитую высокопористую структуру, то площадь контакта воды с образцом максимальна и при этом скорость выщелачивания цезия-137 не превышает установленного предела. Следовательно, цезий-137 находится в прочном химическом соединении с матрицей компаунда.

Испытания продукта ТФО на механическую прочность показали величину 38,5 МПа, что превышает нормативное требование для цементированных РАО (7 МПа) более чем в 5 раз.

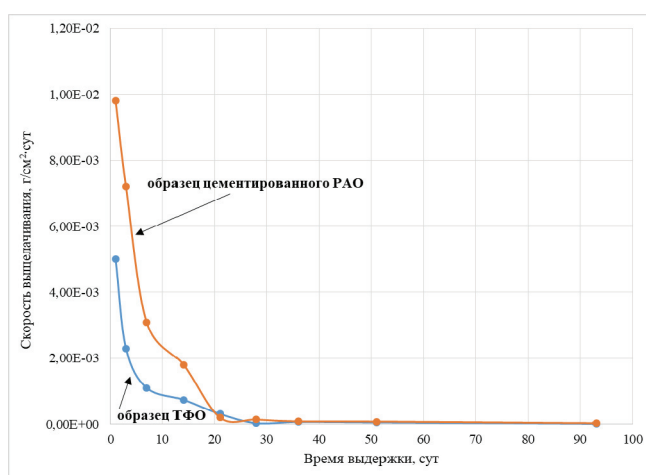


Рис. 1. Кинетика выщелачивания образцов отвержденных РАО

Результаты определения объема и размера проб образцов ТФО

Метод	Значение
Площадь поверхности	
Langmuir	6,898 м²/g
BJH method cumulative desorption surface area	5,748 м²/g
DH method cumulative desorption surface area	6,005 м²/g
Объем пор	
BJH method cumulative adsorption pore volume	$3,532 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3/\text{g}$
BJH method cumulative desorption pore volume	$3,754 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3/\text{g}$
DH method cumulative desorption pore volume	$3,667 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3/\text{g}$
Размер пор	
BJH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))	69,67 nm
BJH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))	16,57 nm
DR method micropore Half pore width	2,330 nm
DA method pore Radius (Mode)	0,880 nm
DFT pore Radius (Mode)	0,737 nm

Литература

- Смыков В.Б., Журин А.В., Легких К.Г., Алексеев В.В., Жданов В.П. Переработка теплоносителя первого и второго контуров при выводе из эксплуатации реактора БН-350 // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 164–169.
- Смыков В.Б., Легких К.Г., Трифанова Е.М., Раскач О.В. Метод твердофазного окисления отработавшего ПЖМТ. соответствие критериям приемлемости для захоронения // Тезисы докладов XVI Международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров», 2023. – С. 225–227.

Оценка относительной скорости дегазации в натриевом теплоносителе реактора на быстрых нейтронах

Дмитриев Д.В., Гончар Н.И.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
dvdmitriev@ippe.ru*

Ключевые слова: реакторная установка, пределы повреждения твэлов, инертные радиоактивные газы, предел безопасной эксплуатации, реактор на быстрых нейтронах, натриевый

В проекте реакторной установки должны быть определены пределы безопасной эксплуатации по повреждению твэлов (количество и степень их повреждения), а также связанные с ними уровни радиоактивности рабочих сред первого контура включая концентрацию продуктов деления.

В НП-082-07 установлены пределы безопасной эксплуатации (ПБЭ) по повреждению твэлов реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем относительно числа твэлов в активной зоне: предельное количество твэлов с дефектом типа газовой неплотности не более 0,1 %; твэлов, имеющих прямой контакт топлива с теплоносителем – не более 0,01 %. Основная задача систем контроля герметичности оболочек твэлов (КГО) – своевременное диагностирование приближения к ПБЭ.

Физический принцип работы систем КГО – регистрация повышения активности продуктов деления в средах первого контура при появлении сквозного дефекта оболочки твэла и увеличения содержания запаздывающих нейтронов в теплоносителе в случае значительного повреждения оболочки и появления открытой поверхности топлива. Скорость поступления продуктов деления (ПД) в теплоноситель и, соответственно, активность сред прямо зависят от количества негерметичных твэлов, степени их повреждения и типа топлива.

Спектрометрия очищенного от аэрозоля защитного газа первого контура реактора типа БН позволяет выявить наличие негерметичных твэлов по росту активности газообразных ПД (ГПД). Для оценки количества поврежденных твэлов с разделением по типу дефекта необходима расчетная модель, позволяющая сопоставить активность ГПД с количеством негерметичных твэлов в зависимости от типа повреждения и проверенная по экспериментальным данным на действующем реакторе. Одним из важных параметров данной модели является относительная скорость дегазации теплоносителя, определяемая как отношение скорости выхода ГПД из теплоносителя в газовую систему к их содержанию в теплоносителе.

Целью работы является оценка относительной скорости дегазации натриевого теплоносителя по измеренной объемной активности радиоактивного аргона (Ar-41) в газовой полости реактора.

Влияние оксидных покрытий на работоспособность рефлекс-радарного уровнемера в среде Pb-Bi

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

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ),
Нижний Новгород
ats@nntu.ru*

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, уровнемер, экспериментальные исследования, циркуляция теплоносителя

Коллективом авторов был проанализирован и выбран метод, который по своим возможностям является перспективным средством измерения уровня ТЖМТ. В связи с тем, что параметры ТЖМТ фактически являются не пригодными для традиционных средств измерения, измерение уровня является сложной технической задачей. Рефлекс-радарный уровнемер (РРУ) – инновационное решение в области обеспечения безопасности ЯЭУ с ТЖМТ.

Экспериментальные исследования работоспособности выбранной модели уровнемера проходили в 2 этапа с использованием водяного и свинцово-висмутового теплоносителя.

Первый этап проводился в статичном баке. В воду и свинцово-висмутовым теплоносителем погружался уровнемер, и производились замеры уровня. За эталонные значения для сравнения были выбраны показания электроконтактного уровнемера. Полученные экспериментальные зависимости для воды и для теплоносителя свинец-висмут при температуре 320 – 350 °С и при температуре 420 – 450 °С линейны и говорят о том, что работа рефлекс-радарного уровнемера не зависит от температурных изменений. Это означает, что рефлекс-радарный уровнемер может быть использован при различных тепловых нагрузках.

Так же было изучено влияние формирования оксидной пленки и незначительные изменения геометрии зонда на результаты измерений. Опускная часть рефлекс-радарного уровнемера, находившаяся в теплоносителе, подверглась пассивации поверхности. Так же, во время проведения эксперимента произошло температурное расширение измерительного зонда. Это привело к изменению геометрии зонда, включая налипание продукта извлечения. Несмотря на это, последующие исследования на воде соответствовали заданной точности измерений.

Второй этап эксперимента проводился в условиях циркуляционного стенда.

Сначала проводились ресурсные испытания РРУ в течении 120 часов и снимались все необходимые показатели. Температура сплава 390 – 410 °С. Результаты испытаний представлены на слайде. Для сравнения использовался электроконтактный уровнемер. Далее производился ступенчатый слив ТЖМТ из экспериментального участка и фиксация показателей обоих уровнемеров. Полученные зависимости линейные, погрешности не выходят за допускаемые пределы.

После проведения эксперимента был извлечен опытный образец РРУ и зафиксировано его состояние после проведения испытаний. Влияние на измерение оксидных покрытий на зонде, а также пылевидных оксидов в газовой полости емкости с уровнемером в условиях циркуляционного стенда не обнаружено.

Результаты обработки экспериментальных данных подтвердили применимость рефлекс-радарного метода для контроля уровня тяжелого жидкометаллического тепло-

носителя с высокой точностью даже при длительной циркуляции и наличии оксидных загрязнений. РРУ позволяет контролировать уровень расплава металлов в емкостях в режиме реального времени с сохранением герметичности контура. Влияние перепада температур, изменение геометрии зонда, а также влияние оксидов на качество измерения уровня ТЖМТ обнаружено не было.

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»).

Разработка способа переработки ЖРК цеха радиоактивных отходов АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Легких К.Г., Фокина Д.А.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
kglegkikh@ippe.ru

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), радиационная безопасность, сорбционный метод, клиноптилолит

Надежное долговременное изолирование от биосферы радионуклидов, входящих в состав жидких радиоактивных отходов, – важная экологическая задача. Жидкие радиоактивные отходы образуются ежегодно как в результате деятельности объекта, так и при реализации рутинных мероприятий обеспечения радиационной безопасности. В большинстве случаев переработка ЖРО сводится к минимизации их объема путем классического выпаривания, с образованием жидких радиоактивных концентратов. ЖРК представляют собой высокосолевые радиоактивные отходы, часто с внушительным содержанием органических примесей [3]. В настоящее время в пунктах долговременного хранения радиоактивных отходов АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» накоплены достаточно большие объемы ЖРК с концентрацией солей до 600 г/л, и состав ЖРК представлен в основном изотопами уран-238, америций-241, плутоний-139, цезий-137 [4].

Очистку ЖРК от α -нуклидов предлагается проводить сорбционным методом, предварительно снизив содержание органических примесей путем окисления раствором перманганата калия и последующей фильтрацией. Были проведен ряд исследований по очистке ЖРО, отобранных из емкостей-хранилищ цеха радиоактивных отходов. Всего было проанализировано 49 проб. В табл. 1 представлены полученные интервалы значений. Было выявлено, что такой способ позволяет снизить химическое потребление кислорода приблизительно в два раза, но этот этап не влияет на изменение активности радионуклидов [2].

Таблица 1. Эффективность этапа окисления ЖРК

Интервалы исходных характеристик проб				
Сухой остаток, г	рН	ХПК, гО/л		
700-750	14	200-300		
Интервалы характеристик проб после этапа окисления				
Сухой остаток, г	рН	ХПК, гО/л	$K_{оч}$	S_s , %
600-650	14	100-150	1	0

Большую роль в сорбционном этапе играет выбор подходящего сорбента, обладающего достаточной эффективностью, коэффициентом очистки и степенью извлечения. Для данной работы был предложен клиноптилолит – наиболее распространенный в природе осадочный минерал. Химическая и термическая устойчивость, способность к ионному обмену и молекулярно-ситовые свойства обеспечивают широкие возможности практического применения клиноптилолита [1]. При оценке эффективности обычного клиноптилолита была выявлена большая степень извлечения по α -нуклидам: 98,59%, однако для β -нуклидов обычный клиноптилолит неэффективен. С целью очистки ЖРК от β -нуклидов были проведены методики модификации клиноптилолита в

две формы: КЛН-1 и КЛН-2. Наиболее эффективна по β -нуклидам форма КЛН-2, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Эффективность клиноптилолита и его модификаций

	$K_{оч}$ по α	S по α , %	$K_{оч}$ по β	S по β , %
КЛН	66,60	98,59	1,96	48,00
КЛН-1	145,38	99,31	13	92,31
КЛН-2	16,60	94,00	4750,00	99,98

Наиболее целесообразно будет использовать несколько сорбционных колонн с разными модификациями сорбента, чтобы высокая степень очистки была как по α , так и по β -нуклидам.

Переработка ЖРО и ЖРК не заканчивается на стадии концентрирования, так как полученный продукт представляет еще большую опасность, чем исходные растворы [3]. После вывода из эксплуатации отработавшей сорбционной колонны предлагается дальнейшее её осушение и размещение в НЗК

Литература

1. Козлова Г.А., Вольхин В.В., Зильберман М.В. Получение и свойства композиционных ферроцианидных сорбентов, включающих ферроцианиды переходных металлов и силикагель // Химия и технология неорганических веществ. – 2014. – С. 95–97.
2. Легких К.Г., Смыков В.Б. Метод очистки жидких радиоактивных отходов и концентратов от органических примесей // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2014 – № 3. – С. 73–81.
3. Маркитанова Л.И. Проблемы обезвреживания радиоактивных отходов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – 2015. – № 1. – С. 1–7.
4. Скоморохова С.Н., Коновалов Э.Е., Старков О.В., Кочеткова Е.А., Копылов В.С., Полетахина Т.В., Трифанова Е.М. Обезвреживание радиоактивных отходов щелочных металлов переработкой в щелочной раствор и отверждением в гецементный камень // Технология натрия и сплава натрий-калий. – 1999. – № 3. – С. 58–66.

Анализ методов предварительной очистки расплавов щелочных металлов и их сплавов

Приказчикова А.А., Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
mkoshelev@ippe.ru

Ключевые слова: жидкометаллический теплоноситель, щелочной металл, натрий, калий, примеси, методы очистки

В энергетической стратегии Российской Федерации значительный сегмент занимает атомная отрасль. Обоснование любого нового проекта в ней требует проведения целого комплекса исследований. Так, например, обоснование использования новых типов теплоносителей требует, в том числе, тщательного изучения их физико-химических свойств, вида и форм существующих в них примесей, метода поддержания их качества и т. д.

Использование расплавов щелочных металлов и их сплавов в качестве теплоносителей ядерных энергетических установок началось еще с середины XX-го века. Однако, в связи с возникновением новых перспективных направлений применения расплавов щелочных металлов, например, в качестве рабочих тел в датчиках измерения давления, в высокотемпературных тепловых трубах и другом оборудовании, не позволяющем проводить периодическую их очистку от примесей, требуется обоснование методов тщательной предварительной очистки в обеспечение длительного ресурса эксплуатации.

Расплавленные щелочные металлы содержат разнообразные примеси, количество которых зависит от конкретных условий работы жидкометаллического контура. Источники примесей могут полностью отсутствовать в одних контурах и обуславливать основной поток в других. Известны следующие источники примесей [1]:

- примеси, присутствующие в исходном металле, загружаемом в контур;
- примеси, присутствующие в защитных инертных газах;
- газы, адсорбированные на внутренних поверхностях контура;
- оксидные плёнки на внутренних поверхностях конструкционных материалов контура;
- диффузия газов через стенки в процессе эксплуатации;
- примеси, поступающие в процессе монтажных и ремонтных работ.

Необходимость очистки от вышеуказанных примесей обусловлена следующим. Чистые щелочные металлы и эвтектический сплав калия с натрием, в том числе, обладают умеренной агрессивностью по отношению к конструкционным материалам. С основными компонентами сталей (железом, хромом, никелем) они не образуют интерметаллических соединений. Растворимость этих элементов в щелочных металлах незначительна. При испытаниях в изотермических ампулах, изготовленных из однородных материалов, коррозия прекращается при достижении концентрации насыщения. В циркуляционных контурах происходит непрерывный отток растворённого элемента в холодную зону, и коррозия значительно усиливается. Наиболее неблагоприятное влияние на коррозию конструкционных материалов оказывает кислород, имеющий достаточно высокую растворимость, как в натрии, так и в эвтектическом сплаве калия с натрием. Зависимость скорости коррозии от содержания кислорода в сплаве (как и в натрии) описывается степенной зависимостью $J = \alpha \cdot C^m$, где α и m – постоянные величины, а C – концентрация кислорода в мг/кг. Таким образом, чем выше степень очистки

щелочного металла от примесей, тем больший ресурс эксплуатации оборудования может быть достигнут.

Ниже представлены методы предварительной очистки щелочных металлов.

1. Дистилляционный метод очистки металла в вакууме основан на различии упругости паров основного металла и содержащихся в нем примесей. Процесс дистилляции включает в себя следующие этапы: прогрев расплава до температуры испарения; испарение расплава со скоростью, зависящей от параметра испарения; конденсация паров на поверхности конденсатора. Эффективность разделения примесей и основного металла, а также паропроизводительность дистилляционного метода высока, что позволяет получать металлы чистотой до 99,9999 %.

Испарение – процесс неравновесный, поэтому жидкость должна быть несколько перегрета, чтобы избыточная упругость пара уравновешивала потери давления при движении пара к поверхности конденсации. Дистилляция металла происходит, как правило, при низких давлениях. Недостатки такого метода: относительная сложность и громоздкость оборудования вместе с высоковакуумной аппаратурой.

2. Отстаивание является эффективным средством освобождения расплавленного металла от основной массы взвешенных примесей. Обычно металл отстаивается в баках или емкостях, служащих для загрузки циркуляционного контура. Металл должен отстаиваться при температуре, немного превышающей плавление металла. При такой температуре подавляющая часть примесей находится в нерастворенном состоянии, и процесс идет наиболее эффективно. Все примеси щелочных металлов имеют больший удельный вес, чем сам теплоноситель, поэтому под действием силы тяжести тонут в жидкости, испытывая гидравлическое сопротивление. После уравновешивания сил тяжести и силами гидравлического сопротивления частица движется с постоянной скоростью. Продолжительность отстаивания прямо пропорционально зависит от высоты емкости, в котором происходит отстаивание. Затем металл сливается в контур через трубу, срез которой помещен в отстойнике на достаточном расстоянии от дна емкости.

3. Центрифугирование – это разделение жидкости и осадка в поле центробежных сил. На частицу взвеси в центрифуге действуют две силы – центробежная сила, отбрасывающая частицу на периферию центрифуги, и сила гидравлического сопротивления. Основными преимуществами данного метода являются малое время разделения и уплотнение осадка. Это метод не получил широкого применения из-за относительной сложности, необходимости в специальном оборудовании, способном работать при высоких температурах и больших числах оборотов центрифуги.

4. Обезгаживание или дегазацию, применяют для удаления растворенных газов. Путем вакуумной откачки можно удалить любые газы, находящиеся в жидком металле. Газы из металла при откачивании удаляются в результате выделения, вследствие уменьшения их растворимости при пониженном давлении, термической диссоциации соединений газов с металлом, термического восстановления соединений, образования и испарения субокислов.

5. Фильтрация – это процесс отделения нерастворенных частиц примесей от жидкости с помощью фильтров, представляющих собой пористые перегородки различных конструкций. Для фильтрации по обе стороны перегородки создают разность давлений, определяемую суммарным гидравлическим сопротивлением самой перегородки и осадка примеси, нарастающего на ней.

6. Электроперенос примесей – это процесс, направленный на перемещение примесей под действием электрического тока, проходящего через раствор. Экспериментальные данные по электропереносу примесей весьма ограничены, поэтому трудно говорить о применимости разработанных теорий электропереноса к щелочным металлам.

Как видно, методов предварительной очистки щелочных металлов относительно немного. Выбор того или иного метода зависит, в основном, от приемлемой длительности подготовки металла. Наилучшим способом при необходимости быстро подготовить щелочной металл в ущерб высокой степени чистоты является фильтрование. Дистилляция металла является относительно длительным процессом. В то же время только лишь дистилляция совместно с термовакuumной подготовкой контура [2] может обеспечить высокую степень очистки щелочных металлов и их сплавов, и, как следствие, длительный ресурс работы оборудования, использующего их в качестве рабочих тел.

Литература

1. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. – М.: Атомиздат, 1970. – 295 с.
2. Приказчикова А.А., Ульянов В.В., Кремлёва В.С. Исследование особенностей дистилляции щелочных металлов как метода их предварительной очистки // Тезисы докладов XVIII Международной научно-практической конференции «Будущее атомной энергетики». – Обнинск, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2022. – С. 88–89.

Изучение методов очистки натрий-калиевого сплава от примесей

Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С., Приказчикова А.А.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
vulyanov@ippe.ru

Ключевые слова: щелочной металл, натрий-калиевый сплав, натрий, калий, примеси, методы очистки, дистилляция, холодная ловушка, химическая очистка

Технология щелочных теплоносителей, к которым относится натрий-калиевый сплав, основывается на необходимости глубокой очистки от различных примесей при подготовке к загрузке в циркуляционные контуры и в процессе эксплуатации циркуляционных контуров. Очистка может производиться при помощи различных методов, причем различают предварительную и контурную очистку [1].

Для предварительной очистки, по мнению авторов, наилучшим образом подходит дистилляция, совмещенная с термовакуумной подготовкой внутренних поверхностей циркуляционных контуров [2]. Очистка натрий-калиевого сплава непосредственно в циркуляционном контуре может быть осуществлена с использованием как физических, так и химических методов. Очистка при помощи холодных ловушек получила наибольшее распространение среди физических методов очистки (рис. 1) [3]. Данный метод очистки основан на том, что растворимость многих соединений газовых примесей со щелочными металлами понижается с уменьшением температуры. Поэтому очистка может быть осуществлена путем кристаллизации примесей из раствора при охлаждении теплоносителя на некотором участке контура. Например, растворимость кислорода в натрий-калиевом сплаве подчиняется зависимости [1]:

$$\log_{10} C_{0Sat} = 4,85 - \frac{1103}{T(K)}, \quad (1)$$

где T – температура в градусах K .

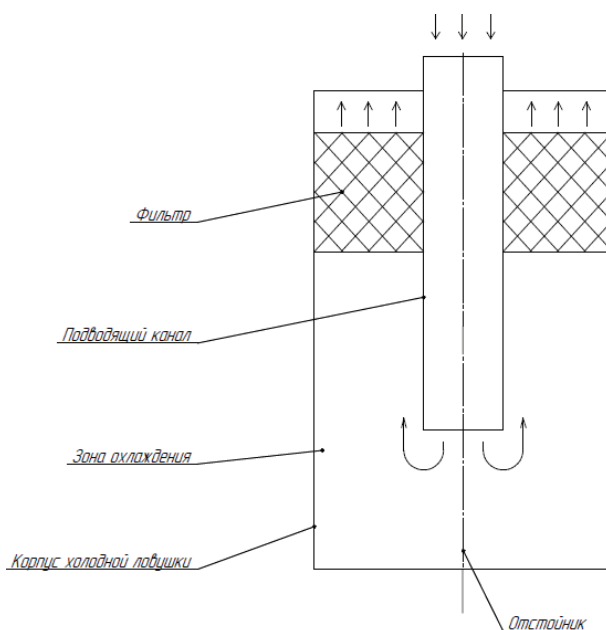


Рис. 1. Схема холодной ловушки [3]

Наиболее приемлемой конструкцией холодной ловушки является конструкция [3], включающая в себя три последовательно включенные зоны: неизотермического отстойника, зоны окончательного охлаждения и изотермического фильтра (рис. 1). Для ловушек такого типа рекомендуются следующие объемные соотношения зон: зона фильтрации – от 32 до 38%; зона окончательного охлаждения от 35 до 36%; зона изотермического отстойника от 33 до 35%. Результаты испытаний экспериментальных холодных ловушек для жидкого натрия показали, что при накоплении только оксида натрия его объем составляет от 25 до 27%, т.е. четвертая часть объема чистой холодной ловушки заполнена примесями. При накоплении же оксида натрия, так и продуктов взаимодействия натрия с водой (гидриды, щелочь), примесями заполняется почти половина холодной ловушки.

Для глубокой очистки подходит химическая очистка, которая описывается реакциями типа:



Металлы для реализации реакции (2) не должны быть агрессивными по отношению к конструкционным материалам контура, а продукты реакции должны быть слабо растворимыми в теплоносителе. На основании термодинамического анализа, проведенного авторами [4], подтверждена возможность химической очистки натрий-калиевого сплава от примесей кислорода и водорода. Наилучшим образом в качестве реагента подходит цирконий.

Основными недостатками горячей ловушки, реализующей метод химической очистки с цирконием в качестве реагента, являются: неэффективное использование циркония (не более 6%), снижение производительности ловушки в процессе работы (почти в 100 раз за год работы).

Литература

1. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. – М.: Атомиздат, 1970. – 295 с.
2. Приказчикова А.А., Ульянов В.В., Кремлёва В.С. Исследование особенностей дистилляции щелочных металлов как метода их предварительной очистки // Тезисы докладов XVIII Международной научно-практической конференции «Будущее атомной энергетики». – Обнинск, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2022. – С. 88–89.
3. Калякин С.Г., Козлов Ф.А., Сорокин А.П. и др. Исследования в обоснование встроенной в бак реактора системы очистки натрия // Сборник докладов конференции «Теплофизика – 2013». – Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2014. – Том 2. – С. 395–402.
4. Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С., Приказчикова А.А. Исследование способов очистки натрий-калиевого сплава // Тезисы докладов VI Международной (XIX Региональной) научной конференции «Техногенные системы и экологический риск». – Обнинск, 2023. – С. 60–62.

Эталонная поверочная установка измерительных каналов контроля кислорода в расплаве свинца

Дворецкий С.В., Садовничий Р.П., Асхадуллин Р.Ш., Лотов В.С., Харчук С.Е.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
svdvoretskiy@ippe.ru*

Ключевые слова: датчик термодинамической активности кислорода, средство измерения, установка поверки, расплав свинца, пароводородная смесь

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» имеет большой опыт по разработке, изготовлению, эксплуатации и поверке датчиков термодинамической активности (ТДА) кислорода для статических установок и циркуляционных стендов. Данные датчики аттестованы как средство измерения (СИ) и проходят регулярную поверку на установке поверки датчиков ТДА кислорода.

Для моноблочных реакторных установок был разработан и аттестован в качестве СИ измерительный канал ТДА кислорода, обладающий потенциально повышенной надежностью, долговечностью работы и точностью измерений по сравнению с используемыми датчиками. Для поверки измерительных каналов для реакторных установок нового поколения типа «БРЕСТ-ОД-300» существовала необходимость в разработке новой установки поверки, отвечающей современным требованиям по точности и воспроизводимости эталонной среды. В ходе создания измерительного канала для РУ «БРЕСТ» была разработана, изготовлена, аттестована и сертифицирована эталонная установка поверки датчиков термодинамической активности кислорода (ЭУП ДАК).

Для создания эталонной среды внутри установки используется способ подачи в реакционную камеру с расплавом свинца пароводородной смеси известного состава и достижения термодинамического равновесия между газовой фазой и расплавом. Изменение содержания водорода и водяного пара в реакционной емкости установки позволяет регулировать ТДА кислорода в расплаве свинца в диапазоне от 1 до 10^{-6} .

Водородная очистка для петлевых циркуляционных стенов с ТЖМТ

Зюбанов В.А., Харчук С.Е.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
vazyubanov@ippe.ru

Ключевые слова: тяжёлые жидкометаллические теплоносители, тепловыделяющие элементы, пароводородная газовая смесь, механический диспергатор газа

Применение тяжёлых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ), таких как свинец и свинец-висмут, в контурах ядерных энергетических установок изучается с 50-х годов XX века.

Интерес к данной теме, прежде всего, вызывает инертность свинца и свинца-висмута к кислороду воздуха и воде, что исключает возникновение взрывов и пожаров при разгерметизации контуров.

Но отсутствие бурной реакции с кислородом, не защищает ТЖМТ от окисления при разгерметизации контура в холодном или горячем состоянии, что приводит к ухудшению качества теплоносителя.

В 1968 году в АПЛ 645 проекта на свинцово-висмутовом теплоносителе произошла авария, возникшая в результате неконтролируемого накопления оксида свинца в первом контуре вследствие разгерметизации трубопроводов газовой системы первого контура при проведении ремонтных работ, в результате чего ухудшился теплоотвод от ТВЭЛов и расплавилось около четверти активной зоны.

После аварии проблеме технологии ТЖМТ стали уделять пристальное внимание.

Одним из способов поддержания качества свинецсодержащего теплоносителя является водородная очистка, реализуемая посредством пароводородной газообразной смеси ($H_2 - H_2O - Ar$).

Современные реакторные установки гражданского назначения в основном реализуются в виде баковой (моноблочной) конструкции, либо усовершенствованной петлевой конструкции, что предполагает изучение новых методов и технологий поддержания качества ТЖМТ

В результате исследования по применению различных типов устройств для ввода смеси газов в поток теплоносителя было выявлено, что лучшие результаты показал механический диспергатор газа.

Принцип работы диспергатора следующий: вал, с закреплённым на нём неподвижным диском, приводится в движение электродвигателем, между вращающимся и неподвижным дисками есть зазор, в котором образуется зона пониженного давления из-за эффекта Вентури, при этом газ подаётся в рабочую часть установки, побудитель расхода создаёт направленный вертикальный поток тяжёлого жидкого металла, создавая дополнительную эжекцию в рабочую зону, это увеличивает общий объём подачи газа и формирует стабильный двухфазный поток на выходе из устройства.

Были проведены предварительные экспериментальные исследования по определению расхода воздуха, диспергируемого устройством в объём воды. Скорость вращения электродвигателя диспергатора регулировалась с помощью частотного преобразователя.

Проведены испытания механического диспергатора газа в жидкометаллической среде свинец-висмут. Устройство ввода газовой фазы подтвердило свои паспортные характеристики в результате эксперимента.

Расчетно-экспериментальная оценка растворимости монооксида железа в расплавах тяжелых металлов

Осипов А.А., Абдулазизов О.М.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
osipov177@yandex.ru

Ключевые слова: жидкий металл, термодинамическая активность кислорода, жидкий металл, свинец, железо, монооксид железа, активность

В настоящее время термодинамические модели расплавов тяжелых металлов при не слишком высоких температурах (до 1000 К) базируются на представлениях о линейной взаимосвязи активностей и концентраций примесей $a_i = \gamma_i C_i$. Что в некоторых частных случаях оправдано, однако в общем случае требует экспериментального обоснования. При этом актуальным является вопрос о численных значениях коэффициентов активностей металлических примесей γ_{Me_i} и их связанных форм с кислородом γ_{Me_iO} . Эти данные необходимы для практических расчетов массопереноса в линейно неравновесной системе посредством учета локально равновесных соотношений вида

$$K_i = \frac{a_{Me_iO}}{a_{Me_i} a_O}$$

и оценки термодинамической устойчивости оксидов

$$K_{Me_i^nO_m} a_{Me_iO}^n a_O^m = 1$$

Поэтому получение численных значений коэффициентов активностей примесей, в частности железа и его связанной формы с кислородом, является принципиально важным вопросом в правильном описании термодинамического состояния теплоносителя и массопереноса в линейно неравновесной системе. В настоящей работе представлены результаты расчетно-экспериментального исследования параметра взаимодействия кислорода и железа $W = \gamma_{Fe}/\gamma_{FeO}$ в расплаве свинца на основе анализа характера температурных зависимостей ТДА кислорода при его раскислении железом.

К вопросу о растворимости оксида свинца в ТЖМТ

Осипов А.А., Шелемetyев В.М., Лотов В.С., Мурашкин А.В.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
osipov177@yandex.ru*

Ключевые слова: растворимость, монооксид свинца, массообменный аппарат, термодинамическая активность кислорода, жидкий металл, свинец, железо

В настоящее время монооксид свинца используется в качестве твердофазного окислителя в массообменных аппаратах, предназначенных для ввода кислорода в тяжелые жидкометаллические теплоносители. Одним из ключевых параметров, определяющих эффективность работы таких аппаратов, является растворимость монооксида свинца, которая зависит как от способа изготовления оксида свинца, так и от содержания железа в теплоносителе. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования растворимости сфероидов из оксида свинца, полученных методом холодного прессования в зависимости от температуры и содержания железа в расплаве свинца.

Датчик термодинамической активности кислорода со встроенной термопарой

Осипов А.А., Лотов В.С., Садовничий Р.П., Лазорцев А.С.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
osipov177@yandex.ru*

Ключевые слова: термодинамическая активность кислорода, жидкий металл, свинец, железо, датчик, диоксид циркония, температура, термопара

В настоящее время для контроля величины термодинамической активности кислорода (ТДА) в жидких металлах применяются датчики на основе ионопроводящей керамики. Измеряемой величиной таких датчиков является ЭДС, которое связано с величиной ТДА кислорода и температурой среды известным соотношением. То есть для определения ТДА необходимо знать температуру измеряемой среды. Однако в общем случае ТДА зависит и от температуры внутри датчика, которая может отличаться от температуры снаружи, особенно при изменении температурных условий. Таким образом, возникает задача контроля температуры внутри датчика. В данной работе представлены результаты расчетно-экспериментального исследования датчика ТДА со встроенной термопарой. Показано, что контроль температуры внутри датчика позволяет не только повысить точность определения ТДА кислорода, но и расширяет его диагностические возможности, как в части определения термодинамического состояния теплоносителя, так и в части достоверности его показаний.

Секция 2.

Гидродинамика и теплообмен в реакторных установках с жидкометаллическими теплоносителями

Обобщение результатов экспериментального и численного моделирования кипения щелочных жидких металлов в активной зоне быстрых реакторов (картограмма режимов, теплоотдача)

Сорокин А.П.¹, Кузина Ю.А.¹, Денисова Н.А.¹, Сорокин Г.А.²

¹ Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск,

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, физтех), Москва
sorokin@ippe.ru

Ключевые слова: жидкие металлы, быстрые реакторы, аварийные ситуации, эксперимент, расчетные коды, теплогидравлика, кипение, активная зона, тепловыделяющая сборка, картограмма режимов двухфазного потока, теплоотдача, скорость, давление, температура

Охлаждение ТВС активной зоны в аварийных режимах при срабатывании аварийной защиты и отключении циркуляционных насосов (ULOF) обуславливает изучение охлаждения ТВЭЛов при пониженных расходах теплоносителя или даже опрокидывании циркуляции в ТВС. Имеются лишь ограниченные данные по кипению натрия в ТВС в этих режимах. Представлены результаты серии экспериментов, выполненных в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», по теплообмену и устойчивости циркуляции при кипении натрий-калиевого сплава на моделях одиночных ТВС и в системе параллельных ТВС с учетом влияния на процесс кипения различных факторов при естественной циркуляции теплоносителя.

Результаты проведенных исследования кипения щелочных жидких металлов показывают, что по сравнению с кипением воды процесс кипения жидких металлов имеет существенные особенности. Полученные данные показывают:

- режим устойчивого пузырькового кипения в модельных ТВС отмечается лишь в ограниченной области тепловых потоков, его переход в режим неустойчивого пульсационного снарядного кипения определяется разными факторами;
- границы перехода от пузырькового к снарядному, дисперсно-кольцевому и дисперсному режимам течения двухфазного потока жидкого металла в пучках ТВЭЛов аппроксимируются простыми зависимостями, картограмма режимов течения двухфазного потока жидких металлов существенно отличается от картограммы режимов для воды;

– возникновение колебательного процесса при кипении теплоносителя в одной из параллельных ТВС приводит к противофазному колебательному процессу в другой ТВС, в дальнейшем колебания в различных контурах носят противофазный характер;

– гидродинамическое взаимодействие контуров с течением времени приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний расхода теплоносителя в них («резонанс» пульсаций расхода), возможному «запиранию» или инверсии расхода теплоносителя в контурах, росту температуры теплоносителя и оболочки тепловыделяющих элементов (эффект межканальной неустойчивости) и, в конечном итоге, к возникновению кризиса теплообмена;

– коэффициенты теплоотдачи имитаторов твэлов при кипении жидкого металла в моделях ТВС в одиночных контурах и при их параллельной работе согласуются между собой и находятся в том же диапазоне, что и данные по теплоотдаче при кипении жидких металлов в трубах и в большом объеме.

При проведении экспериментов обнаружен эффект влияния шероховатости поверхности твэлов на теплообмен и режимы течения при кипении жидкого металла в сборках твэлов:

– в сборке с низкой шероховатостью поверхности имитаторов твэлов развитие неустойчивого (снарядного) режима с резкими колебаниями расхода теплоносителя и перегрева стенки имитаторов приводит к кризису теплообмена, по существу, отсутствует запас до кризиса;

– для имитаторов твэлов с технической шероховатостью поверхности, благодаря появлению на поверхности имитаторов пленки жидкости, наблюдается переход от неустойчивого снарядного к устойчивому дисперсно-кольцевому режиму.

Также представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена при кипении натрия в режимах естественной и вынужденной конвекции в модели ТВС с расположенной над активной зоной реактора «натриевой полостью», предназначенной для компенсации положительного натриевого пустотного эффекта реактивности в аварийных ситуациях с кипением натрия. Впервые показано, что существует возможность обеспечения продолжительного охлаждения натрием имитаторов твэлов в ТВС в этих условиях.

Представлены результаты обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче и картограмма режимов двухфазного потока при кипении щелочных жидких металлов в сборках твэлов.

Коэффициенты теплоотдачи при кипении щелочных жидких металлов в моделях ТВС в диапазоне плотности теплового потока свыше 100 кВт/м^2 в среднем в 1,5 раза выше, чем при кипении жидких металлов в большом объеме. В первом приближении для оценки коэффициентов теплоотдачи при кипении жидких металлов в сборках твэлов может использоваться зависимость, предложенная для кипения жидких металлов в большом объеме.

Демонстрируется, что модифицированный расчетный код SABENA-3D, основанный на поканальной модели теплогидравлического расчета двухфазных течений с разделением фаз, позволяет моделировать процесс теплообмена и устойчивость циркуляции теплоносителя при кипении щелочных жидких металлов как в одиночных ТВС, так и в системе параллельных ТВС в контурах с естественной циркуляцией теплоносителя. Приведены результаты сравнения данных проведенных расчетных и экспериментальных исследований.

Термические сопротивления и смачиваемость границ контакта жидкого металла и теплообменных поверхностей

Круглов А.Б., Харитонов В.С., Паредес Л.П.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва
AVKruglov@mephi.ru

Ключевые слова: теплопроводящий жидкометаллический подслой, контактное термическое сопротивление, краевой угол смачивания, метод импульсного нагрева, метод лежащей капли

Для повышения безопасности и экономичности АЭС с быстрыми реакторами нового поколения планируется переход от смешанного уран-плутониевого оксидного топлива к высокоплотному и высокотеплопроводному нитриднему топливу.

Проведенные исследования показали [1], что работоспособность твэлов с нитридным топливом ограничивается термомеханическим взаимодействием топлива и оболочки. Один из путей, исключаящих это взаимодействие, предполагает снижение температуры топлива за счет использования между топливом и оболочкой теплопроводящего жидкометаллического подслоя (ТЖМП) с низким термическим сопротивлением $r_{\text{тп}} = r_{\text{м}} + r_{\text{тк}}$, здесь $r_{\text{м}} = \delta_{\text{тп}}/\lambda_{\text{м}}$ – термическое сопротивление слоя металла в зазоре, $r_{\text{тк}}$ – суммарное термическое сопротивление контактов металла подслоя с топливом и оболочкой. Очевидно, что для надежного прогнозирования эффективности ТЖМП кроме информации по теплопроводности металла подслоя $\lambda_{\text{м}}$, также необходимы данные по контактному термическому сопротивлению $r_{\text{тк}}$. Последние могут быть получены только в экспериментах.

В докладе представлены результаты исследования термических сопротивлений границ контактов свинца с поверхностями сталей 12Х18Н10Т (12Х), ЭП-823 и керамикой Al_2O_3 в измерительных ячейках, моделирующих ТЖМП в твэлах. Измерения были выполнены методом импульсного лазерного нагрева в диапазоне температур 350–950 °С в атмосфере аргона при плавлениях в форвакууме и аргоне.

Были исследованы:

– изменения $r_{\text{тк}}$ после первого плавления свинца в вакууме при изотермических выдержках в ходе нагрева ячейки до температуры 950 °С и последующем охлаждении до температуры 350 °С;

– изменение $r_{\text{тк}}$ при многократных плавлениях-кристаллизациях свинца в аргоне.

По результатам экспериментов было установлено, что термическое сопротивление контактов в ячейке 12Х – свинец – 12Х, ЭП-823 – свинец – Al_2O_3 не превосходит $r_{\text{тк}} \approx 2 \cdot 10^{-5}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт, что составляет при температуре 650 °С около 60 % $r_{\text{тп}}$ свинцового ТЖМП толщиной 0,25 мм.

Для отработки технологии изготовления твэлов с ТЖМП требуется информация о смачиваемости жидким металлом поверхности стальной оболочки, а также поверхности керамического нитридного топлива. Поскольку при не смачивании поверхностей топлива и оболочки расплавом усложняется технология изготовления твэлов, а при смачивании возможна интенсификация коррозионного взаимодействия расплава с оболочкой, уменьшающее время работы твэла без потери герметичности и прочности оболочки.

В докладе представлены результаты измерений в диапазоне температур 350 – 850 °С методом лежащей капли краевых углов смачивания $\alpha_{\text{к}}$ свинцом и сплавом свинца с натрием поверхностей сталей 12Х, ЭП-823, а также керамик Al_2O_3 и UN.

В результате проведенных измерений было установлено:

– свинец не смачивает сталь ЭП-823 ($\alpha_k \approx 120$ градусов), а также керамики Al_2O_3 ; UN ($\alpha_k \approx 135$ градусов);

– сплав свинец-натрий слабо смачивает стали 12Х, ЭП-823 ($\alpha_k \approx 85$ градусов), керамику Al_2O_3 ($\alpha_k \approx 87$ градусов), и не смачивает керамику UN ($\alpha_k > 90$ градусов).

Литература

1. Адамов Е.О., Забудько Л.М., Мочалов Ю.С., Рачков В.И., Хомяков Ю.С., Крюков Ю.Н., Скупов М.Н. Разработка твэла с нитридным уран-плутониевым топливом с жидкометаллическим подслоем // Атомная энергия. – 2019. – Т. 127. – Вып. 5. – С. 255–262.

Теплогидравлический анализ ЖСР сжигателя трансурановых элементов

Гаца П.В., Игнатьев В.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
gatsa.p.97@xmail.ru

Ключевые слова: активная зона, жидкосолевого ядерный реактор, реакторный контур, теплогидравлические характеристики, топливная соль, фториды лития и бериллия, циклонное течение

Жидкосолевого ядерный реактор сжигатель (ЖСР-С) плутония и минор-актинидов из ОЯТ реакторов типа ВВЭР использует в реакторном контуре циркулирующее топливо на основе расплавов солей фторидов лития и бериллия. В ЖСР-С тепловой мощностью 2,4 ГВт предусмотрена коррекция состава топлива, включающая подпитку, рециклирование делящихся материалов и очистку от продуктов деления [1, 2], что обеспечивает утилизацию около 250 кг/год минор актинидов. ЖСР-С использует а.з. полостного типа высотой 3,4 м и диаметром 3,4 м.

При рассмотрении концепции ЖСР-С с активной зоной полостного типа возникает проблема профилирования потока топливной соли. Отсутствие внутренней структуры предполагает сложную структуру потока циркулирующей топливной соли. Если поток топливной соли не профилировать, то в а.з. могут образовываться возвратные вихревые токи и зоны многократной рециркуляции или застоя. Появление таких эффектов крайне опасно, поскольку может приводить к локальным перегревам топливной соли и/или металлоконструкций реакторного контура (отражателей, корпуса реактора и/или трубопроводов) выше допустимых температур. Колебания температуры, вызванные турбулентностью, нельзя игнорировать, поскольку они подразумевают колебания мощности а.з. Ранее проблема профилирования потока топливной соли в а.з. полостного типа решалась за счет профилирования подачи топливной соли на входе и выбора формы а.з. [2–4].

Применительно к ЖСР-С предложен способ организации течения топливной соли через цилиндрическую а.з. полостного типа за счет создания осевого вихря (циклона), равномерно поднимающего соль снизу вверх. Организация циклона в ЖСР-С позволяет обеспечить отсутствие возвратных течений и застойных зон в полости а.з. Создаваемый вихрь стабилизируется как при расходе, соответствующем работе на номинальной мощности, так и при скорости подачи топливной соли, сниженной в 2 и 10 раз. В номинальном режиме работы максимальные температуры топливной соли и отражателей в корпусе реактора не превышали 1140 и 1050 К, соответственно. Также новая геометрия а.з. позволяет ограничить колебания мощности для исходной геометрии а.з. ЖСР-С без циклона.

Литература

1. Игнатьев В.В., Фейнберг О.С., Хаперская А.В. и др. Жидкосолевого реактор как необходимый элемент замыкания ядерного топливного цикла по всем актинидам // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125. – Вып. 5. – С. 251–255.
2. Игнатьев В.В., Фейнберг О.С., Смирнов В.П., Ванюкова Г.В., Лопаткин А.В. Анализ характеристик топливного контура жидкосолевого ядерного реактора с активной зоной полостного типа // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126. – Вып. 3. – С. 137–143.
3. Laureau A. e.a. Unmoderated molten salt reactors design optimization for power stability // Annals of Nuclear Energy, November 2022.
4. Гаца П.В., Игнатьев В.В., Фейнберг О.С. Теплогидравлический анализ ЖСР-сжигателя трансурановых элементов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2023. – Вып. 5. – С. 54–64.

Исследование магнитной гидродинамики и теплообмена жидкого металла в теплообменной системе «труба в канале» применительно к модулю blankets термоядерного реактора

Лучинкин Н.А.^{1, 2}, Разуванов Н.Г.^{1, 2}, Полянская О.Н.^{1, 2}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), Москва;

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур РАН» (ОИВТ РАН), Москва
LuchinkinNA@yandex.ru

Ключевые слова: жидкие металлы, смешанная конвекция, МГД-теплообмен, зондовые измерения, комбинированные системы теплообмена, поперечное магнитное поле, эксперимент, численное моделирование, пульсации температуры, коэффициенты теплоотдачи, термогравитационная конвекция

Тяжелые жидкометаллические (ЖМ) теплоносители рассматриваются для охлаждения активной зоны реакторов на быстрых нейтронах, экспериментальных модулей blankets ИТЭР, blankets гибридного реактора (термоядерного источника нейтронов).

Геометрия blankets предполагает сложные коробчатые конструкции системы теплообменных каналов, которые в отличие от труб плохо выдерживают нагрузки давления, температуры и деформации. Поэтому перспективны системы двойных каналов, когда конструкцию blankets пронизывают трубы с текущим теплоносителем, а межтрубное пространство заполнено средой неподвижного ЖМ с невысоким давлением.

Объединенной группой МЭИ – ОИВТ РАН выполнен комплекс расчетных и экспериментальных исследований течений жидкого металла в изолированных и смежных полостях и каналах, в поперечном магнитном поле и при его отсутствии. В экспериментах применялись зондовые методики измерений с использованием продольных микротермопарных зондов в трубе и в канальном зазоре. Комбинированная система охлаждения представляет собой вертикальный канал квадратного сечения с однородно обогреваемыми стенками, внутри которого вставлена труба круглого сечения. В трубе осуществляется вынужденное подъемное течение, а полость межтрубного пространства заполнена неподвижным жидким металлом, магнитное поле перпендикулярно к двум сторонам канала. Рассматривались три характерных режима: I – режим с закрытой петлей естественной циркуляции в межтрубном пространстве, II – режим с открытой петлей естественной циркуляции без охлаждения, III – режим с открытой петлей естественной циркуляции с охлаждением.

Результаты получены при однородном обогреве стенок канала с плотностями теплового потока $q = 30 \text{ кВт/м}^2$ (число Грасгофа $0,8 \times 10^8$) в диапазоне по числам Рейнольдса $Re = (10 - 80) \times 10^3$ и Гартмана $Ha = 0 - 470$.

В результате экспериментального исследования в теплообменной системе «труба в канале» получены поля температуры, интенсивности температурных пульсаций, распределения температуры стенки, локальной скорости, статистических характеристик температурных пульсаций по периметру сечения и по длине. В межканальном зазоре в условиях эксперимента возникает естественная конвекция в результате действия сил плавучести и электромагнитных сил. Конфигурация течения и его структура существенно зависят от наличия поперечного магнитного поля, а также от подключения петли естественной циркуляции и ее охлаждения. Конвекция теплоносителя в зазоре улучшает теплоотдачу в исследуемой системе «труба в канале» в большей степени, когда включена петля естественной циркуляции. Структура естественно-конвективных пото-

ков в отсутствие МП в зазоре имеет турбулентный характер, а при наличии поперечного МП существенно меняется. Максимальная температура во всех режимах наблюдалась в углах канала. Наиболее выгодным с точки зрения эффективности теплообмена является режим работы с контуром естественной циркуляции с охлаждением. При этом значительно снижается температура как в трубе, так и в зазоре между каналом и трубой, а течение в поперечном МП становится более устойчивым – почти ламинарным. Результаты численного моделирования гидродинамики и характеристик теплоотдачи поставленных задач сопоставлены с экспериментом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FSWF-2023-0017 (Соглашение № 075-03-2023-383 от 18 января 2023 г.) в сфере научной деятельности на 2023-2025 гг.

Исследование теплообмена и гидродинамики имитатора расплава соли в условиях, актуальных для реакторных установок нового поколения

Белавина Е.А.¹, Пятницкая Н.Ю.¹, Рахимов Р.Ф.², Бердюгин Д.А.²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур РАН» (ОИВТ РАН), Москва;

² Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), Москва
belavinaea@gmail.com

Ключевые слова: теплообмен, гидродинамика, расплавы солей, эксперимент, зондовые методы, объемное тепловыделение, МГД, локальные коэффициенты теплоотдачи

На сегодняшний день актуальным является вопрос повторного использования отработавшего ядерного топлива. Одним из возможных решений в этой области может послужить реактор-наработчик, в котором основой охлаждающей жидкости является смесь расплавленных солей, работающая при высоких температурах (термодинамическая эффективность реактора прямо пропорциональна рабочей температуре), оставаясь при этом при низком давлении, что, в свою очередь, уменьшает механические напряжения и повышает безопасность и долговечность. С другой стороны, концепция термоядерных источников нейтронов с докритическим жидкосольевым бланкетом позволят перейти к полному использованию энергетического потенциала урана-238 и тория-232, и устранят проблемы ресурсных ограничений и оставят вопрос о необходимости эффективного воспроизводства ядерного топлива. Согласно представленной здесь концепции, для безопасного производства энергии предлагается использовать ТОКАМАК с жидкосольевым бланкетом с ураном-233, а для эффективного обогащения ядерного топлива – ТОКАМАК с жидкосольевым бланкетом с торием-232. В связи с этим, комплексное исследование особенностей смешанной конвекции расплавов солей в условиях действия массовых сил различной природы представляет особый интерес.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей гидродинамики и теплообмена при смешанной конвекции имитаторов расплава солей в условиях однородного обогрева ($Gr = 2,7 \cdot 10^6 - 3,9 \cdot 10^7$) под воздействием сильного поперечного магнитного поля ($Ha = 0 - 45$) в вертикальных и горизонтальных трубах при режимных параметрах, соответствующим переходным режимам ($Re = 3000 - 7000$) и развитой турбулентности ($Re = 10000 - 14000$). В качестве модельного теплоносителя использовался 30-процентный водный раствор КОН. Также, было проведено исследование в области развитой турбулентности ($Re = 12000 - 11000$), а также в переходных режимах ($Re=8000$) с заданным тепловым потоком на обогреваемой стенке ($Gr = 1,7 \cdot 10^9 - 1,0 \cdot 10^{10}$) при горизонтальном и вертикальном положениях прямоугольного канала под воздействием магнитного поля ($Ha = 30$). Экспериментальное исследование горизонтального канала в условиях неоднородного обогрева и компланарного магнитного поля показало отсутствие значительного влияния магнитного поля на коэффициенты теплоотдачи и пульсационные характеристики. Однако, качественно полученные зависимости совпадают с прогнозируемыми результатами.

Было изучено совместное влияние магнитного поля и свободной конвекции в имитаторах расплава соли при определенном соотношении параметров Re , Gr и Ha , которое в свою очередь, может приводить к образованию возвратных течений у стенки, и, как следствие, развитию неустойчивости в потоке и его дополнительной турбулизации на фоне практически полностью подавленной турбулентности с образованием вто-

ричных вихревых структур. В рамках работы, была получена зависимость Nu (Gr , Re) при $Pr = 6$ для круглой вертикальной трубы. Результат был сопоставлен с известной экспериментальной зависимостью, при этом было получено хорошее совпадение результатов DNS расчета и эксперимента. Приведена оценка границы начала влияния свободной конвекции на теплообмен в круглой вертикальной трубе при $Re = 5000 - 20000$ при $Pr = 6$. В результате оценки интенсивности пульсаций безразмерных скорости, температуры, давления обнаружено, что свободная конвекция способствует подавлению и существенному перераспределению интенсивности пульсаций теплогидравлических параметров по сечению трубы.

Также, в рамках данной работы выполнено экспериментальное и численное исследование, особенностей естественной конвекции имитатора расплава соли (водный раствор КОН) с внутренними источниками тепловыделения. Моделирование объемного тепловыделения в эксперименте реализовано за счет пропуска электрического тока через раствор электролита. Экспериментальный стенд был выполнен в виде ячейки прямоугольной геометрии с характерными размерами 40×20 см, заполненной водным раствором КОН с открытой верхней поверхностью. Реализация и поддержание стационарного режима на протяжении всего эксперимента осуществлялась за счет смонтированных на электродах холодильных камер. Electroдами служили медные пластины, через которые пропускался переменный ток с максимальным значением 100 А, при этом напряжение было порядка 50 В. В совокупности с медными пластинами, которые фиксируются внутри ячейки, объем рабочей зоны составлял приблизительно 10 – 13 литров, а расстояние между электродами 30 см. Численные расчеты были выполнены посредством программной среды COMSOL Multiphysic и полностью повторили геометрию рабочей ячейки, граничные условия и параметры эксперимента.

Численный расчет и результаты экспериментального исследования показали, что разница значений температур на дне ячейки и у её поверхности составляет порядка 5°C , а поле распределения электрических потенциалов между медными пластинами однородное. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что существенного перекоса в распределении электропотенциала не происходит, а значит, тепловыделение по всему объему можно считать равномерным, а предложенный подход подходящим для моделирования процессов естественной конвекции в условиях объемного тепловыделения, применительно к активной зоне жидкосолевого реактора.

Параметрическая идентификация коэффициента теплоотдачи для трубопроводной системы при высокоэнтальпийной нагрузке

Лосев М.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур РАН» (ОИВТ РАН), Москва
losev.mi@phystech.edu

Ключевые слова: обратная задача теплопроводности, тепловое проектирование, коэффициент теплоотдачи, высокоэнтальпийная нагрузка, метод итерационной регуляризации

В настоящем исследовании представлен метод параметрической идентификации коэффициента теплоотдачи как функции от температуры при высокоэнтальпийном тепловом нагружении активной зоны реактора. Метод основан на параметрической идентификации коэффициента теплоотдачи как функции температуры при минимизации среднеквадратичного интегрального функционала невязки между теоретическими и экспериментальными полями температур в местах установки тепловых зондов.

Исследование вынужденной конвекции в активной зоне ядерного реактора на жидких теплоносителях представляет собой ключевой аспект в области ядерной энергетики. Эта конвекция играет важную роль в предотвращении перегрева и обеспечении термальной стабильности, что важно для оптимизации процесса выработки энергии. В данной работе рассматривается имитатор активного участка ядерного реактора на свинцовом теплоносителе при высокоэнтальпийном тепловом нагружении уровня 700 °С. В котором исследуется задача идентификации температурной зависимости коэффициента теплоотдачи в обеспечении последующего уточненного теплового проектирования гидравлической системы охлаждения ядерных реакторов, что является актуальной задачей теплового конечно-элементного моделирования. Таким образом, цель данной работы – параметрическая идентификация коэффициента теплоотдачи для трубопроводной системы при высокоэнтальпийной нагрузке. Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. При фиксированных начальных и граничных условиях, которые моделируют условия проведения эксперимента, а также при использовании заданных базисных линейно-непрерывных или кусочно-постоянных базисных функций, решается «прямая» задача неизотермического течения жидкого теплоносителя в теплогидромагистрали для определения температур в заранее выбранных точках образца материала, где будут размещены датчики температур.

2. После проведения теплофизических испытаний образца формируется средне регуляризируемая интегральная ошибка между теоретическим и экспериментальным полем температур в зонах, где установлены датчики температур.

3. Происходит решение задачи оптимизации данного функционала, при этом предварительно вычисляются компоненты градиентов параметризованных целевых функций.

4. Осуществляется поиск шага спуска в методе «сопряженных» направлений, обеспечивающего минимизацию целевого функционала на следующей итерации.

5. Получаются значения целевых функций на следующей итерации. При выполнении условия останова, полученные значения каждого блока умножаются на соответствующие характерные базисные функции (и считается, что зависимости получены). Если условие останова не выполняется, процесс 1–5 повторяется.

Литература

1. Флейшман Г.Д. Стохастическая теория излучения. – М.: Машиностроение, 2008.
2. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н.. Теплообмен излучением. – М.: Энеоатомиздат, 1991.
3. Борщев Н.О., Белявский А.Е. Обратные задачи в проектировании теплового режима теплоизоляционных материалов. РЕШЕТНЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ. / Материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2022. – С. 225–227.
4. Борщев Н.О. Прогнозирование теплопередающих характеристик теплоотражающих конструкций по данным теплофизических экспериментов Пилотируемые полеты в космос. / Материалы XIII Международной научно-практической конференции, 2019. – С. 159–160.
5. Алексеев С.В., Аксенова И.В., Белокрылова В.В., Иванова Е.К., Колесникова Е.Н, Харитоновна Е.В. Новая антибликовая экранно-вакуумная теплоизоляция для космических аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2015. – № 4 (30). – С. 65–69.

Адаптация модели турбулентности к теплообмену в пучке стержней

Сергеенко К.М.

*Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт
энерготехники имени Н.А. Доллежалы» (АО «НИКИЭТ»), Москва
km.sergeenko@nikiet.ru*

Ключевые слова: DNS, RANS, турбулентное число Прандтля, турбулентный поток, расчёт

В настоящее время в активно ведутся работы по созданию реакторов на быстрых нейтронах, которые используют жидкометаллический и газовый теплоносители. Повышенные требования безопасности, а также недостаточная изученность теплогидравлических характеристик данных теплоносителей обуславливают проведение валидационных исследований, выполняемых с использованием RANS модели турбулентности. Такие исследования основываются на данных, полученных из экспериментов или из DNS расчётов. При обнаружении больших погрешностей, используемые RANS модели модифицируются.

В настоящей работе выполнена серия теплогидравлических расчетов пучка стержней в DNS-постановке. Исследовался равномерно обогреваемый пучок стержней, расположенный в треугольной упаковке с относительным шагом 1,4. Суммарно выполнено 12 теплофизических исследований. При этом варьировались, как числа Рейнольдса (2500, 5000 и 10000), так и числа Прандтля (0,0043, 0,0154, 0,0324 и 0,71), которые соответствуют различным жидким металлам и газу.

Результаты DNS расчётов сопоставлялись с расчётными (DNS) и экспериментальными данными; показано хорошее соответствие по распределению скорости, температуры, интенсивности турбулентности, числу Нуссельта и коэффициенту трения.

На нижней границе выбранного диапазона чисел Рейнольдса обнаружен перемежающийся режим течения, который затруднительно описывался в RANS модели турбулентности. Выявлено, что для всех теплоносителей функция распределения турбулентного числа Прандтля устроена схожим образом: максимум соответствует области $y^+ \approx 25$, а от $y^+ \approx 50$ и далее она принимает постоянное значение. При этом с ростом числа Прандтля или Рейнольдса среднее значение стремится к 1,0. Также выявлено, что турбулентный вклад в теплоотдачу линеен для выбранного теплоносителя.

В результате исследований сформулирована модель турбулентного числа Прандтля, а также проведена процедура изменения выбранной RANS модели турбулентности, в результате которой максимальная интегральная погрешность уменьшилась с 49 % до 4 %. Предложенные в работе функции активации обеспечивают локализацию принятых изменений в рассмотренном диапазоне определяющих параметров.

Исследование гидравлических характеристик гидростатического подшипника двойного взаимобратного щелевого дросселирования с наклонными камерами для свинец-висмутового теплоносителя

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

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ),
Нижний Новгород
md.pogorelov@yandex.ru

Ключевые слова: ТЖМТ, свинец-висмут, ГСП, ГЦН, гидравлическая характеристика, СВБР

Одним из ключевых элементов главных циркуляционных насосов атомных электрических станций являются подшипниковые узлы, надёжность и эффективность работы которых при любых режимах эксплуатации реакторной установки определяет и работоспособность ГЦН. Обоснование работоспособности ГЦН, в свою очередь, есть одна из первоочередных задач при проектировании и разработке АЭС, и особенную важность она приобретает для проектов, использующих свинец-висмутовый теплоноситель. Несмотря на богатую практику применения этого теплоносителя на советских атомных подводных лодках в прошлом, многие вопросы его эксплуатации остаются до сих пор недостаточно изученными.

В реакторных установках с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями в нижних подшипниковых узлах, как правило, используются радиальные гидростатические подшипники. В НГТУ проводились многочисленные работы, связанные с обоснованием применения гидростатических подшипников в среде ТЖМТ. На основании опыта экспериментальных исследований на экспериментальных стендах и установках со свинец-висмутовым теплоносителем, гидростатические подшипники с двойным взаимобратным щелевым дросселированием были выбраны как обеспечивающие наибольшую работоспособность и грузоподъёмность в условиях эксплуатации контуров с ТЖМТ.

Для дальнейшего изучения и отработки методов расчёта и проектирования такого типа подшипников, исследователями НГТУ им. Р.Е. Алексеева были предложены несколько вариантов исполнения гидростатического подшипника, одним из которых является гидростатический подшипник с двойными взаимобратным дросселированием с шестью наклонными камерами.

В целях подтверждения работоспособности и исследования гидравлических характеристик указанного подшипника, был разработан и создан многофункциональный стенд ФТ-1 НГТУ с свинец-висмутового теплоносителя, который включает в себя:

- 1) экспериментальную сборку с подшипниковым узлом, позволяющей проводить испытания подшипников с вращением имитатора вала с частотой до 1500 об/мин;
- 2) центробежный насос, обеспечивающий циркуляцию свинец-висмутового расплава по контуру экспериментального стенда и питание гидростатического подшипника с разным расходом;
- 3) расходомерную ёмкость, дублирующую магнитное расходомерное устройство на напоре циркуляционного насоса;
- 4) отжимную ёмкость для измерения перепада давлений на экспериментальной сборке;

5) элементы контроля и поддержания термодинамической активности кислорода в сплаве в установленных технологией применения теплоносителя параметрах;

Программа испытаний гидростатического подшипника двойного взаимнообратного целевого дросселирования с наклонными камерами для свинец-висмутового теплоносителя разделена на два этапа: I этап – исследование гидравлических характеристик подшипника, II этап – ресурсные испытания.

Первый этап испытаний включает в себя:

1) исследование гидравлической характеристики ГСП при не вращающемся имитаторе вала;

2) исследование гидравлической характеристики ГСП с вращающимся имитатором вала, при разных частотах вращения.

На данный момент, проведена серия исследований согласно пунктам первого этапа испытаний.

Полученные данные, совместно с результатами испытаний других вариантов подшипников, позволят внести корректировки уже имеющихся методов расчёта гидростатических подшипников с учётом специфики эксплуатации в среде свинец-висмутового теплоносителя.

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»).

О теплогидравлике витого и прямотрубного парогенерирующих каналов – анализ экспериментальных данных

Грабежная В.А., Михеев А.С., Ульянов В.В.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
gva@ippe.ru*

Ключевые слова: парогенератор, вода, перегретый пар, натрий, свинец, кризис теплообмена, давление, балластные зоны, массовая скорость, гидродинамическая неустойчивость, пульсации расхода воды

Реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением (натрий, свинец, свинец-висмут) рассматриваются в качестве одного из перспективных направлений в концепции четвертого поколения развития мировой атомной энергетики. Новые проекты энергоблоков АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемыми натрием, разрабатываются в России, Индии, Китае, Корее, Франции, Японии, США. Проекты с реакторами, охлаждаемыми свинцом, – в России, Японии, Корее, Европе. В большинстве проектов реакторных установок (РУ) предполагается использовать парогенераторы интегрального исполнения.

Экономические преимущества таких парогенераторов очевидны – существенно снижается металлоемкость и трудозатраты. Могут быть различные варианты исполнения парогенерирующих труб, размещенных в корпусе парогенератора: витые трубы (бухтовая навивка), вариант с U-образными трубами и прямые трубы. Последний вариант парогенерирующих труб в настоящее время рассматривается, например, в проектах РУ нового поколения типа БН (Россия) и PGSFR (Корея). в этих проектах парогенератора отсутствует выделение испарителя в отдельный корпус. на вход парогенератора подается недогретая вода, а на выходе из него образуется перегретый пар, поступающий напрямую в турбину.

В ГНЦ РФ – ФЭИ был выполнен комплекс экспериментальных работ по изучению теплогидравлики парогенерирующих каналов с обогревом натрием и свинцом. Экспериментальная модель парогенератора с натриевым обогревом применительно к проектам РУ нового поколения типа БН представляла собой однострубную модель. В качестве экспериментальной модели парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем первоначально была выбрана модель с продольным течением теплоносителей (свинец и вода) в витой трубе. В обеих моделях на входе воды в парогенерирующие трубы отсутствовали дроссельные устройства.

Испытания однострубной модели с натриевым обогревом показали наличие нестационарного кризиса теплообмена. При работе на низких параметрах были обнаружены режимы, в которых присутствовали зоны с практически нулевым потоком на экономайзерном участке, так называемые балластные зоны. Область с низкими тепловыми потоками характерна и для всей закритической зоны в режимах с перегревом пара. Отмечались циклические пульсации давления питательной воды. Если исключить нестационарный кризис теплообмена можно путем установки дроссельных устройств на входе в парогенерирующую трубу, то избавиться от балластных зон во всех режимах эксплуатации в случае единой парогенерирующей трубы, возможно только путем интенсификации теплообмена. Критические тепловые потоки в рассмотренном диапазоне изменения режимных параметров, в основном, оказались ниже расчетных.

В витом парогенерирующем канале в разных эксплуатационных режимах балластных зон обнаружено не было. Во всем диапазоне изменения режимных параметров

опрокидывания циркуляции не наблюдалось. Определенные экспериментально коэффициенты теплообмена при конвекции однофазной среды (воды, пара) выше значений, рассчитанных по известным корреляциям.

В докладе приводятся сравнительные характеристики температурных полей и пульсаций ряда режимных параметров в рассматриваемых парогенерирующих каналах, а также предлагаются способы интенсификации теплообмена для парогенератора прямотрубного исполнения.

Анализ переходных процессов при переключении тока в электромагнитных преобразователях расхода жидких металлов на примере многофункционального магнитогидродинамического устройства

Осипов А.А.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
osipov177@yandex.ru*

Ключевые слова: магнитогидродинамическое устройство, насос-расходомер, жидкие металлы, постоянные магниты, контактное сопротивление, постоянная времени, переходной процесс, ток

В настоящее время для контроля и регулирования расхода жидких металлов в циркуляционных контурах широко применяются электромагнитные устройства, принцип действия которых основан на законах Фарадея и Ампера. В общем случае для расчета таких устройств требуется также и учет контактного сопротивления на границе между жидким металлом и стенкой канала. Опыт показывает, что при определенных условиях величиной контактного сопротивления можно пренебречь. Как правило такое допущение оправдано в трубопроводах с щелочными металлами при температурах выше 350 °С, однако в случае расплавов тяжелых металлов контактное сопротивление необходимо учитывать, так как эксплуатация циркуляционных контуров с тяжелыми металлами тесно связана с наличием оксидной пленки на внутренней поверхности трубопровода, выполняющей защитную противокоррозионную функцию. Более того, продукты взаимодействия жидких металлов с конструкционными материалами и воздухом могут отлагаться на внутренних поверхностях трубопровода и влиять на величину контактного сопротивления. Поэтому на практике было бы полезным контролировать величину контактного сопротивления необходимую как для расчета электромагнитных преобразователей, так и для контроля процессов массопереноса в циркуляционных контурах с жидкими металлами.

В данной работе рассмотрены переходные процессы, связанные с переключением тока в электромагнитном насосе-расходомере. В эксперименте наблюдается влияние разгона и торможения жидкого натрия на величину сигнала, что позволяет определить величину контактного сопротивления и некоторые динамические параметры системы.

Периодическая мультифрактальная модель пульсаций температуры в жидких металлах

Осипов А.А.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
osipov177@yandex.ru*

Ключевые слова: пульсации температуры, жидкий металл, свинец, свинец-висмут, натрий, структурная функция, вейвлет-анализ, мультифрактальные модели, корреляция

Эксперимент показывает, что в условиях вынужденной или естественной конвекции жидкого металла изменения его температуры носят пульсационный характер. В связи с чем возникает вопрос о связи пульсаций температуры с процессами тепломассообмена в жидких металлах, что имеет как фундаментальное, так и практическое значение, например, при разработке новых и совершенствовании существующих измерительных систем с применением статистических методов.

В рамках данной работы приводятся результаты экспериментального и расчетного исследования пульсаций температуры в жидком натрии, а также расплавах тяжелых металлов на основе свинца и висмута в условиях свободной и вынужденной конвекции. На основании анализа структурных и корреляционных функций установлено, что пульсации температуры в жидком металле связаны с его конвективным движением, характеризуются сильными корреляциями и в общем случае могут быть описаны мультифрактальными моделями.

Интересным является, обнаруженное в эксперименте, свойство кластеризации дисперсии пульсаций. Показано, что кластеризация дисперсии пульсаций температуры носит структурированный характер, и аналогично свойствам абсолютных приращений пульсаций финансовых индексов. В работе обсуждается новая феноменологическая модель пульсаций, описывающей в том числе и эффект кластеризации.

Расчетно-экспериментальное обоснование ресурса фильтроматериала для контуров с ТЖМТ

Воронин И.А., Посажеников А.М., Асипенко Д.С., Зуборева М.В.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
ivoronin@ippe.ru

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, взвешенные примеси, концентрация железа, фильтр теплоносителя, фильтрующий материал, эффективность очистки, ресурс

Эксплуатация контуров с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем сопровождается накоплением примесей различного происхождения (сварочный град, защитные пленки, магнетит и др.). Физико-химические свойства этих примесей оказывают влияние на теплообмен и гидродинамику теплоносителя в различных элементах контура. В ряде случаев возможно возникновение критических ситуаций, связанных со шлаковыми блоками и сепарацией взвеси на теплообменную поверхность или поверхность раздела «теплоноситель-газ». Таким образом, очистка контуров от примесей является одной из актуальных проблем.

Для очистки теплоносителя от нерастворимых примесей применяют различные виды фильтров. При этом в качестве фильтроматериалов могут применяться сетка, пористая керамика, насыпные или волокнистые материалы. При выборе конструкции фильтра необходимо учитывать различные параметры: вид и размеры очищаемых примесей, конструктивные ограничения, гидравлические характеристики фильтроматериала. Также важны и характеристики самого фильтроматериала: термостойкость, стойкость к очищаемой среде, эффективность очистки.

Для определения этих параметров требуется проведение экспериментальных исследований, которые позволяют учитывать различные факторы и определить наиболее подходящий для данной задачи фильтрующий материал. Наиболее показательными будут испытания, приближенные к натурным условиям эксплуатации изделия.

Проведены испытания различных видов материалов: стекловолокнистый МКТТ-2,2А, иглопробивное полотно из металловолокон, гранулы из оксида алюминия. Показано, что наибольшей термостойкостью обладают гранулы из оксида алюминия, а наилучшую эффективность очистки показали МКТТ-2,2А и иглопробивное полотно из металловолокон. На основе выбранных фильтроматериалов разработаны конструкции макетных образцов фильтров для перспективных ЯЭУ и испытательных стендов с ТЖМТ [1].

Литература

1. Мартынов П.Н., Ягодкин И.В., Мельников В.П., Паповянец А.К., Посажеников А.М. Очистка тяжелых жидкометаллических теплоносителей от примесей высокотемпературными фильтрам // Сборник тезисов докладов «ТЖМТ-2008». – Обнинск, 2008. – С. 71–73.

Обзор экспериментальных работ, посвященных вопросам гидродинамической неустойчивости в парогенерирующих трубах, обогреваемых жидким металлом

Букреева А.Д., Грабежная В.А.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
adbukreeva@ippe.ru*

Ключевые слова: парогенератор, вода, перегретый пар, гидродинамическая неустойчивость, колебания температуры, кризис теплообмена, натрий, балластные зоны

Развитие атомной энергетики предъявляет повышенные требования ко всем элементам энергоблока. Разрабатываются новые проекты атомных электростанций, рассматриваются новые конструкторские решения, поэтому требуется обоснование тех или иных выбранных проектов. В последнее время, в основном за рубежом, все больше и больше стало появляться исследований, посвященных вопросам гидродинамической неустойчивости (ГДН) в системе параллельных каналов, связанных с работой парогенераторов (ПГ) и активных зон реакторов. Отрицательное влияние гидродинамической неустойчивости – это дополнительные динамические и термические нагрузки, способствующие ускорению разрушения оборудования.

Гидродинамическая неустойчивость разделяется на статическую и динамическую. Если уйти от статической неустойчивости можно путем изменения режимных параметров и дополнительного дросселирования потока, то динамическая неустойчивость более сложное состояние, которое требует глубокого анализа. Впервые экспериментально вопросами гидродинамической устойчивости в парогенерирующих каналах, обогреваемых жидким металлом (натрием), занялись в ANL [1], где на однотрубной модели длиной 13,1 м и перегретым паром на выходе, исследовали влияние дросселирования. Были определены границы наступления неустойчивости, которые сравнивались с полученными ранее рекомендациями. Как выяснилось в дальнейшем, рекомендации, полученные на конкретной модели ПГ в виде карт стабильности и эмпирических зависимостей, не годятся для определения границы стабильности в иных экспериментальных моделях. Однако вопросы кризиса теплообмена в условиях ГДН в работе не рассматривались.

В обоснование испарителя энергоблока БН-600 в ФЭИ в 70-е годы был проведен комплекс исследований, подтверждающий устойчивую работу во всем диапазоне режимных параметров. Однако после эксплуатации испарителя БН-600 свыше 80 тыс. часов были обнаружены неустойчивости в пусковом режиме, как при малых, так и при больших выходных паросодержаниях вследствие появления отложений на испарительных участках [2].

В ГНЦ РФ – ФЭИ при испытаниях на однотрубной модели парогенератора, обогреваемой жидким металлом, и с перегревом пара на выходе были выявлены режимы с гидродинамической неустойчивостью [3]. Первая серия экспериментов была выполнена без дроссельного устройства на входе воды. В ряде режимов при давлении питательной воды ниже 7 МПа и массовой скорости менее 350 кг/(м² с) было зафиксировано смещение профиля температуры корпуса по длине модели во времени, смещение зоны кризиса вверх по течению воды, снижение температуры натрия в месте кризиса и плотности теплового потока. В этих режимах не были зафиксированы колебания расхода рабочего тела, однако на определенной части теплообменной поверхности тепло-

вой поток был близок к нулю – балластные зоны. Помимо гидродинамической неустойчивости испытания показали увеличение зоны пульсаций температуры стенки в зоне кризиса теплообмена почти в четыре по сравнению с данными, ранее проведенным исследований на однетрубных моделях протяженностью от 5 до 9 м.

Установка дроссельного устройства позволила устранить нестационарность кризиса теплообмена, однако протяженность зоны пульсаций сохранилась, но по-прежнему оставались балластные зоны, наличие которых при работе параллельных каналов, особенно в режимах работы ПГ на частичных параметрах может способствовать разверке температуры перегретого пара в выходном коллекторе, вызывая термические напряжения.

Как в первой, так и во второй сериях опытов на однетрубной модели, величины критических тепловых потоков и граничного паросодержания заметно отличались от рекомендованных. В докладе делается анализ такого различия.

Секция 3.

Гидродинамика и теплообмен в водоохлаждаемых реакторах

Теплофизические аспекты применения борной кислоты в водо-водяных реакторах

Лебезов А.А., Морозов А.В., Сахипгареев А.Р., Шлёпкин А.С., Сошкина А.С.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
sas@ippe.ru

Ключевые слова: ВВЭР, борная кислота, активная зона, разбавление, кристаллизация, растворимость, теплофизические свойства

Водо-водяные энергетические реакторы, разработанные в нашей стране, являются основой современной отечественной атомной генерации. Для обеспечения надежной и безопасной работы энергоблоков в условиях нормальной эксплуатации, а также в случае гипотетической аварии, в реакторах ВВЭР предусматривается использование борной кислоты.

Повышенный интерес к бору в атомной энергетике в первую очередь связан с его ядерно-физическими характеристиками. Борная кислота добавляется в теплоноситель первого контура реакторов ВВЭР для решения задач борного регулирования, компенсируя большой начальный запас реактивности. В ходе работы реакторной установки на мощности производится постепенное плавное уменьшение концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура путем водообмена или за счет поглощения борной кислоты ионообменными фильтрами. Еще одной областью применения борной кислоты являются аварийные системы охлаждения активной зоны, одной из задач которых является поддержание реактора в подкритическом состоянии при любой рабочей температуре теплоносителя. Системы залива активной зоны раствором борной кислоты применяются во всех современных проектах реакторов ВВЭР и предназначены для недопущения перехода аварии в тяжелую стадию.

Применение водных растворов борной кислоты, как в режиме работы на мощности, так и в случае аварийного охлаждения активной зоны водо-водяных реакторов, приводит к необходимости учета теплофизических и физико-химических процессов, имеющих место в первом контуре реакторной установки.

Одним из важных процессов является локальное разбавление борной кислоты в реакторе, которое может привести к резкому возрастанию тепловыделения и разрушению тепловыделяющих сборок. Параметры теплоносителя на входе в активную зону определяются тем, насколько сильным будет перемешивание деборированной воды с находящимся в реакторе теплоносителем, имеющим высокую концентрацию бора.

Однако на безопасность реактора может повлиять не только уменьшение, но и рост концентрации борной кислоты в активной зоне. В случае аварии с разрывом трубопровода первого контура, по мере подачи раствора борной кислоты из систем безопасности в реактор, находящийся в аварийном кипящем режиме, происходит повышение концентрации бора в активной зоне. Это происходит из-за того, что масса H_3BO_3 уносимой за счет растворимости в уходящем паре и путём капельного уноса значительно меньше, чем масса бора, поступающая с охлаждающей жидкостью. В случае достижения предельной концентрации борной кислоты начнется её кристаллизация, что может нарушить движение теплоносителя и ухудшить охлаждение активной зоны. Предельная растворимость борной кислоты, соответствующая началу кристаллизации, зависит от температуры: повышение температуры приводит к увеличению предельной концентрации раствора борной кислоты, снижение – к её уменьшению.

Помимо растворимости на процесс кристаллизации борной кислоты существенное влияние оказывают возможные фазовые переходы, а также формы накопления бора. Кроме того, для корректного моделирования длительных (до нескольких суток) процессов массопереноса в реакторе необходимо знать теплофизические и термодинамические свойства раствора борной кислоты при высоких концентрациях.

В АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» была выполнена комплексная экспериментальная и расчетная работа по измерению теплофизических свойств растворов борной кислоты с концентрацией до 400 г/кг, а также изучению массообменных процессов, имеющих место в реакторе ВВЭР в случае длительной подачи боросодержащей жидкости при аварии. В докладе представлены основные результаты проведенных исследований.

Обзор серии расчётно-экспериментальных исследований процессов естественной циркуляции в несимметричных условиях теплоотвода от РУ на стенде ПСБ-ВВЭР

Латкин Д.Ю., Крыжановская Т.И., Петкевич И.Г.

*Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), Подольск
Latkin_DY@grpress.podolsk.ru*

Ключевые слова: естественная циркуляция, реакторная установка ВВЭР, ПСБ-ВВЭР, ETHARINUS, потеря теплоотвода, расхолаживание реакторной установки, посттестовое моделирование, расслоение потока, изоляция парогенератора, валидация, теплогидравлические расчетные коды

Выполнение экспериментальных исследований на интегральных теплогидравлических стендах является важным этапом в валидации программных комплексов, используемых при обосновании безопасности реакторных установок типа ВВЭР. В процессе развития программных комплексов ТРАП/КС и КОРСАР/ГП большой вклад внесли бенчмарки на стендах ATLAS (Южная Корея), PKL (Германия) и ПСБ-ВВЭР (Россия).

В 2020 году стартовал проект ETHARINUS. В рамках этого проекта на стенде ПСБ-ВВЭР была выполнена серия из четырех экспериментов, объединенных общей идеей исследования процессов несимметричной естественной циркуляции в реакторных установках типа ВВЭР. Ситуация с несимметричной циркуляцией характерна для проектных аварий в условиях обесточивания блока АЭС и отказов элементов систем. Несимметричная циркуляция возможна в результате нарушения отвода тепла через один из парогенераторов. Нарушение отвода тепла может быть связано с отказом подачи основной или аварийной питательной воды, ложным закрытием быстродействующего запорного отсечного клапана или другого отсечного элемента на паропроводе.

Претестовое моделирование и разработка сценариев экспериментов выполнялась специалистами ОКБ «ГИДРОПРЕСС» с использованием программных комплексов КОРСАР/ГП и ТРАП/КС.

Осенью 2022 года был успешно выполнен первый эксперимент «Закрытие отсечных клапанов на парогенераторах». Результаты выполненного посттестового моделирования показали важный результат с точки зрения изучения динамики изменения естественной циркуляции. Было сделано предположение о расслоении потока в холодном патрубке петли с отсеченным парогенератором. Для подтверждения предположения в дальнейших экспериментах были установлены термодпары в верхней и нижней части трубопровода в одном сечении непосредственно на выходе из петли.

Летом 2023 года были выполнены эксперименты «Несимметричная естественная циркуляция» и «Расхолаживание стенда в условиях несимметричной естественной циркуляции». Экспериментально подтверждено расслоение потока в холодном патрубке в условиях нарушения отвода тепла через один из парогенераторов. В эксперименте с расхолаживанием установки были получены срывы циркуляции в петле с изолированным парогенератором.

Осенью 2023 года был выполнен эксперимент «Авария с потерей теплоотвода от первого контура в состоянии холодного останова». Была изучена динамика изменения несимметричной естественной циркуляции в условиях разогрева установки.

Экспериментальная программа стенда ПСБ-ВВЭР, а также выполнение претестовых и посттестовых расчетных исследований значительно расширяет валидационную базу теплогидравлических программных комплексов, используемых при обосновании безопасности РУ ВВЭР, в области естественной циркуляции теплоносителя.

Экспериментально-расчетное обоснование тепловых схем РУ на основе использования трубчатых ТВЭЛ

Болтенко Э.А., Кочергин В.М., Носков А.В.

Акционерное общество «Электрогорский научно-исследовательский центр
по безопасности атомных электростанций» (АО ЭНИЦ), Электрогорск
boltenko@erec.ru

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка (ТВС), реакторная установка (РУ), стержневой ТВЭЛ, трубчатый ТВЭЛ, электрообогреваемая модель, температура, теплосъем

В докладе представлены результаты анализа существующих схем тепловыделяющих сборок (далее – ТВС) реакторной установки (далее – РУ) с точки зрения повышения энергонапряженности РУ и повышения её безопасности.

Показано, что основной недостаток ТВС со стержневыми ТВЭЛами заключается в достаточно низких значениях удельной объемной мощности РУ (ТВС) и в высоких значениях температур в центре ТВЭЛ. Максимальная температура ТВЭЛ в нормальных условиях эксплуатации может достигать 2000 – 2200 °С. Любое ухудшение теплосъема может привести к недопустимо высокой температуре топлива и соответственно, к аварийной ситуации.

В докладе рассмотрена схема ТВС, в которой теплосъем осуществляется как с выпуклой поверхности ТВЭЛ (традиционное выполнение), так и с вогнутой теплоотдающей поверхности. Для обеспечения теплосъема с вогнутой поверхности предлагается выполнить ТВЭЛы полыми, в частности – трубчатыми.

В этом случае повышение энергонапряженности и снижение максимальной температуры топлива достигается за счёт:

1. Увеличения поверхности теплосъема – теплосъем осуществляется как с наружной (выпуклой), так и с внутренней (вогнутой) теплоотдающих поверхностей.
2. Образования тепловых обратных связей между выпуклой и вогнутой теплоотдающими поверхностями. Любое ухудшение теплосъема на одной из поверхностей приведёт к перераспределению тепловых потоков, смещению максимума теплового потока к одной из поверхностей, улучшению тепловой обстановки на поверхности, где ухудшились условия теплосъема.

В РУ с трубчатыми ТВЭЛами теплосъем осуществляется как с выпуклой, так и с вогнутой теплоотдающих поверхностей.

В докладе представлена методика обоснования теплогидравлических характеристик ТВС на основе электрообогреваемой одностержневой модели трубчатого ТВЭЛ. Описана электрообогреваемая модель трубчатого ТВЭЛ с теплосъемом как с вогнутой, так и с выпуклой теплоотдающих поверхностей. Выполнена оценка запасов до кризиса теплоотдачи в ТВС с трубчатыми ТВЭЛами. Запасы до кризиса в этих работах определены традиционным методом, т.е. по сравнению локального теплового потока и критического теплового потока в этом сечении. Показано, что запасы до кризиса более чем в два раза выше запасов до кризиса обычных стержневых ТВЭЛов.

Литература

1. Кузма-Китча Ю.А. Методы интенсификации теплообмена. – М.: Издательство МЭИ, 1994.
2. Болтенко Э.А. Кризис теплоотдачи и распределение жидкости в парогенерирующих каналах. – М.: Радуга, 2015.

3. Патент России 2220464 МПК³ G21C3/00, Тепловыделяющая сборка / Блинков В.Н., Болтенко Э.А // Заявка № 2002104121, от 20.02.2002, опубликовано 2003. Бюл. № 36.
4. Патент РФ на изобретение 2680175 С1 МПК³ F28F13/12. Способ повышения теплосъёма на выпуклых теплоотдающих поверхностях теплопередающих устройств и устройство для его осуществления / Болтенко Э.А // Заявка № 2016142832/28, от 31.10.2016, опубликовано 03.05.2018. Бюл. № 13 / Опубликовано 18.02.2019. Бюл. № 5.
5. Патент России 2794744 МПК³ G21C3/00(2006.01). Способ повышения критических тепловых потоков в тепловыделяющей сборке с трубчатыми твэлами / Блинков В.Н, Болтенко Э.А. // Заявка № 202211274, от 04.05.2022, опубликовано 24.09.2023. Бюл. № 12.

Особенности теплогидравлики тепловыделяющей сборки одноконтурной ядерной энергетической установки ВВЭР-СКД

Баисов А.М., Чуркин А.Н.

*Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), Подольск
Baisov_AM@grpress.podolsk.ru*

Ключевые слова: ВВЭР-СКД, ТВС, ТЕМПА-СК, сверхкритическое давление, теплогидравлические характеристики

В докладе представлены результаты расчетного анализа, выполненного с помощью поячейковой программы ТЕМПА-СК, распределения теплогидравлических параметров в различных вариантах конструкций тепловыделяющих сборок (ТВС) одноконтурной ядерной энергетической установки (ЯЭУ) ВВЭР-СКД с двухзаходной схемой движения.

На основе полученных расчетных данных была обнаружена значительная неравномерность распределения температуры теплоносителя в поперечном сечении текущего варианта ТВС с тесной решеткой. Данная проблема возникает ввиду попытки использовать напрямую конструкторские решения для обычных легководных реакторов, включая геометрию ТВС. В зарубежных проектах ЯЭУ для избежания данной проблемы твэлы дистанционируются проволоочной навивкой и объединяются в небольшие топливные кластеры.

Для сохранения текущей конструкции ТВС были рассмотрены и оценены различные изменения, направленные на уменьшение площади периферийных ячеек. Наиболее приемлемым решением, при моделировании гладкого пучка стрержней без дистанционирующей решетки (ДР), оказалось изменение формы и толщины чехла ТВС по сравнению с внедрением дополнительного вытеснителя. Однако подобное изменение не должно касаться угловых ячеек, так как в этом случае существенное уменьшения гидравлического диаметра приведет к резкому росту температуры.

При учете ДР по высоте ТВС распределение температур изменялось из-за дополнительного перераспределения расхода за счет различия КГС соседних ячеек. Вариант с конструкцией ДР, в которой происходит почти полное перекрытие сечения в периферийных каналах, показал принципиальную возможность разработки конструкции, позволяющей перенаправить поток теплоносителя в центральные ячейки. Предполагается, что использование специальной конструкции лопаток по периферии ДР позволит добиться схожего эффекта.

В целом изменение геометрии боковых ячеек за счет изменения формы чехла или конструкции ДР позволяет снизить максимальные значения температуры теплоносителя, что также положительно сказывается на радиальном распределении температуры оболочек твэлов.

Полученные результаты являются только предварительным шагом, поскольку для подтверждения обнаруженных закономерностей и обоснования выбора оптимальной конструкции как ДР, так и ТВС необходимо проведение дополнительных нейтронно-физических, теплогидравлических и прочностных расчетов.

Экспериментальное исследование однофазного течения и конвективной теплопередачи теплоносителя в пористой среде с внутренним тепловыделением

Мишин Г.А., Попандопуло Х.Ю., Вершинина Ю.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), Москва
MishinGA@mpei.ru

Ключевые слова: пористая среда, теплообмен, гидродинамика, теплогидравлические характеристики, однофазное течение теплоносителя, теплоноситель, микротвэл, засыпка шаровых элементов, ядерный реактор малой мощности, атомная станция малой мощности

В настоящей работе проведено исследование коэффициента гидравлического сопротивления и конвективного теплообмена теплоносителя в слое шаровой засыпки, проведено сопоставление существующих корреляций с экспериментальными данными.

Параметры рабочего участка: высота засыпки $H = 100$ мм, пористость засыпки $\varepsilon = 0,399$, диаметр шарика $d_{ш} = 2,0$ мм, теплоноситель – дистиллированная вода, расход теплоносителя (0,09–0,46) кг/с, мощность индукционного нагрева до 15 кВт.

Экспериментальное исследование однофазного течения и конвективной теплопередачи теплоносителя в пористой среде с внутренним тепловыделением проводилось на новом экспериментальном стенде, который включает в себя гидравлический контур, систему измерения, сбора и обработки информации, рабочий участок с шаровой засыпкой, систему высокочастотного индукционного нагрева для обеспечения тепловыделения в шаровой засыпке. Стенд рассчитан на следующие режимные параметры: температура теплоносителя до 100 °С, давление теплоносителя до 1,5 МПа, расход теплоносителя (0,01 – 0,50) кг/с, мощность индукционного нагрева до 20 кВт. В качестве теплоносителя использована дистиллированная вода.

Рабочий участок с шаровой засыпкой (рис. 1) состоит из двух коаксиально расположенных трубок из поликарбоната. Внешняя трубка диаметром $D = 52$ мм необходима для герметизации рабочего участка. Стальные шарики в виде свободной засыпки размещаются во внутренней трубке диаметром $D = 51$ мм между решетками с круглыми отверстиями.

Для измерения потерь давления в рабочем участке экспериментальной установки было установлено два отбора давления. Они изготовлены из капиллярной трубки диаметром 3 мм. Нижний капилляр располагается перед входом в рабочий участок, а верхний капилляр расположен непосредственно на выходе из него.

Для определения коэффициента теплоотдачи несколько термопар заделаны в стальные шарики и измеряют температуры стенки шарика. В непосредственной близости от этого элемента расположена термопара для измерения температуры жидкости (среды) (рис. 2). В шаровой засыпке всего установлено 4 таких элемента и 10 кабельных термопар, а также термопары большего диаметра на входе и выходе опытного участка. Это позволяет контролировать температуру в 7 сечениях по высоте и 3 радиальных составляющих шаровой засыпки, а также перед входом и после прохождения жидкости через рабочий участок. Движение жидкости осуществляется снизу-вверх. Нагрев в области шаровой засыпки осуществляется с помощью индуктора, который представляет собой 9 витков медной трубки.

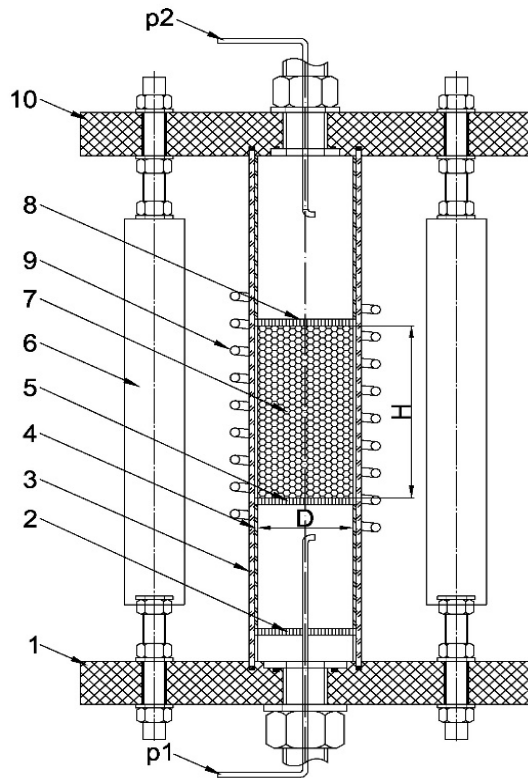


Рис. 1. Рабочий участок:

- 1, 10 – фланцы из стеклотекстолита; 2, 5, 8 – решетки; 3 – внешняя трубка из поликарбоната;
 4 – внутренняя трубка из поликарбоната; 6 – шпильки, стягивающие рабочий участок;
 7 – шаровая засыпка; 9 – катушка индуктора; p1, p2 – отборы давления

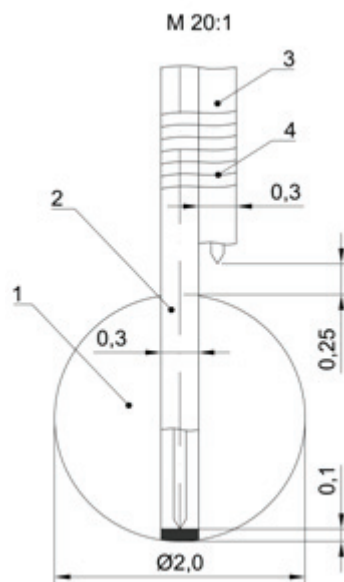


Рис. 2. Элемент для определения температуры стенки шарика и жидкости

В результате исследований приведена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса при однофазной вынужденной конвекции (рис. 3). Получена критериальная зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса (рис. 4).

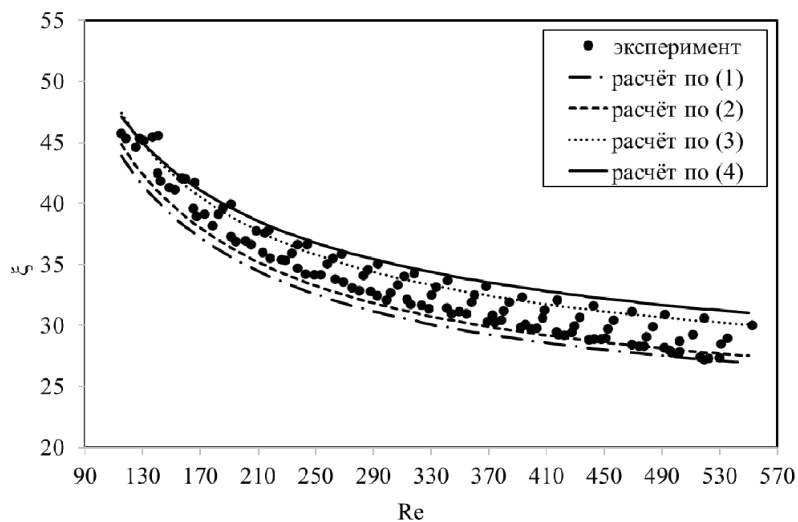


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления шаровой засыпки от числа Рейнольдса

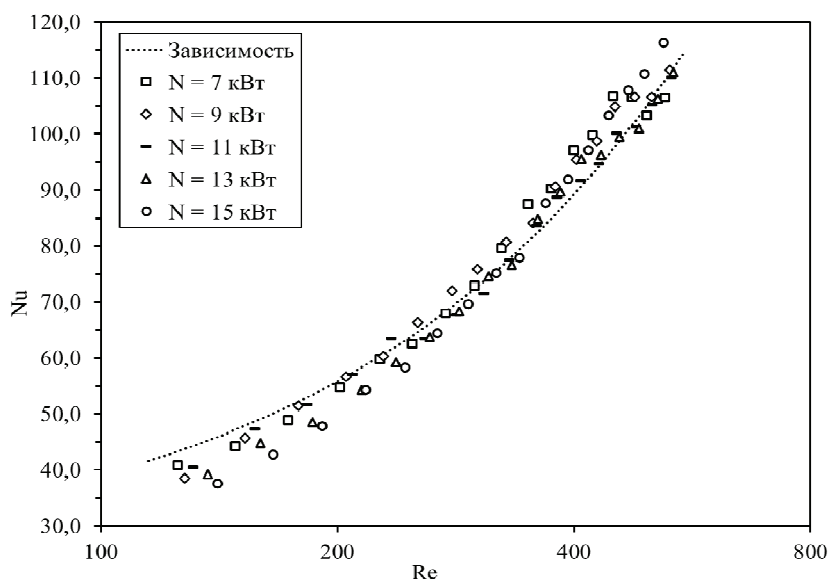


Рис. 4. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса

Расчётное исследование эффективности охлаждения водным аэрозолем теплообменной трубки системы пассивного отвода тепла

Смирнов А.М., Морозов А.В.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
smi180@mail.ru*

Ключевые слова: ВВЭР, система пассивного отвода тепла, оптимизация, теплообменники, водный аэрозоль, расчётное исследование, теплоотдача

Увеличение экспорта отечественных ядерных технологий в другие страны – одна из основных стратегических целей развития Госкорпорации «Росатом». Очевидно, что для дальнейшего развития в этом направлении целесообразно стремиться к уменьшению капитальных затрат на сооружение главного экспортного продукта ГК «Росатом» – АЭС с реактором ВВЭР-1200. Это становится особенно актуальным в связи с интенсивным ростом конкуренции на рынке атомных технологий, наблюдаемым в последние годы. В качестве примера можно привести китайские корпорации CGNPC и CNNC с реактором Hualong One, а также корейскую компанию KHNP с проектом APR-1400, которые могут предложить более выгодные проекты странам, заинтересованным в строительстве АЭС.

Довольно значительную долю в цене современного энергоблока составляет стоимость систем безопасности. Одной из них является система пассивного отвода тепла (СПОТ) реактора ВВЭР-1200. Совместно с системами гидроемкостей она обеспечивает длительный отвод остаточных тепловыделений от реактора при авариях. Ключевым элементом данной системы являются теплообменники, через которые тепло передаётся конечному поглотителю: воде или воздуху.

СПОТ с водяным охлаждением, примененная на энергоблоках ЛАЭС-2, состоит из четырёх независимых каналов, по одному на каждый парогенератор и предусматривает использование теплообменников, размещенных в баках аварийного отвода тепла, расположенных снаружи защитной оболочки. Объёма воды в баках достаточно для обеспечения пассивного теплоотвода от активной зоны в течение не менее 24 часов.

Система с воздушным охлаждением, реализованная на энергоблоках НВАЭС-2, также состоит из четырёх независимых каналов. Каждый канал включает в себя два теплообменника-конденсатора, охлаждаемых атмосферным воздухом, трубопроводы паро-конденсатного тракта и воздухопроводы с затворами и регулятором. Несмотря на практически неограниченный временной интервал работы системы, охлаждаемой воздухом, ей присущи и некоторые недостатки. Основным из них является довольно низкая эффективность теплосъёма вследствие использования в системе естественной циркуляции воздуха. По этой причине теплообменники СПОТ являются довольно габаритным оборудованием. Помимо этого, эффективность теплоотдачи резко уменьшается с увеличением температуры воздуха.

В связи с этим был предложен способ оптимизации системы пассивного отвода тепла с воздушным охлаждением реактора ВВЭР-1200, который заключается в уменьшении площади теплообменников и одновременном применении водного аэрозоля для интенсификации теплообмена с целью обеспечения необходимых мощностных характеристик, заложенных в проекте [1].

В рамках более детального изучения предложенного способа оптимизации было проведено расчётное исследование эффективности охлаждения водным аэрозолем теплообменной трубки системы пассивного отвода тепла в программном комплексе Ansys 19.2. Были получены значения основных параметров теплоотдачи при использовании водного аэрозоля с различными характеристиками. Кроме того, был проведён сравнительный анализ полученных данных с аналогичными результатами при охлаждении теплообменной трубки сухим воздухом с целью обоснования целесообразности применения аэрозольного охлаждения.

Литература

1. Смирнов А.М., Морозов А.В. Анализ влияния различных параметров на эффективность использования водного аэрозоля для охлаждения воздушных теплообменников СПОТ ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2023. – Вып. 3. – С. 254 – 264.

Особенности течения теплоносителя на выходе из тепловыделяющей сборки кассетного типа активной зоны реактора РИТМ атомной станции малой мощности

**Дмитриев С.М., Дёмкина Т.Д., Добров А.А., Доронков Д.В.,
Доронкова Д.С., Пронин А.Н., Рязанов А.В.**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ),
Нижегород
nevid000@mail.ru*

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, выходной участок, труба отбора, головка, опорная плита, дистанционирующая решетка, твэльный пучок, теплоноситель, осевые скорости, контрастная примесь, осевой расход

Значительная концентрация ресурсов в Арктическом регионе обусловила строительство промышленных предприятий, а также создание источника энергии, обладающего автономностью, надежностью и маневренностью. Научный, конструкторский и производственный опыт, накопленный при создании судовых реакторных установок, явился основой приоритетного проекта Госкорпорации «Росатом» — атомных станций малой мощности (АСММ). В настоящее время разрабатывается АСММ с РИТМ-200Н, проектом которой предусматривается новая кассетная активная зона. Тепловыделяющие сборки (ТВС) АСММ отличаются от ТВС атомных ледоколов геометрией твэльного пучка, конструкцией дистанционирующих решеток, формой вытеснителя и геометрией головки. Изменение геометрии головки может привести к перераспределению аксиальной скорости и расхода теплоносителя на выходе из твэльного пучка, а также сказаться на интенсивности его перемешивания и повлиять на теплотехническую надежность активной зоны. Использование судовых реакторных технологий в наземном исполнении привело к ужесточению требований к мониторингу теплогидравлических характеристик теплоносителя и потребовало увеличения числа областей контроля его температуры на выходе из активной зоны с помощью термометров сопротивления, заключенных в трубы отбора теплоносителя. На показания термометров сопротивления могут влиять неравномерность течения потока на выходе из твэльного пучка и головки ТВС, а также образование горячих или холодных струй теплоносителя. Таким образом, изучение гидродинамики теплоносителя на выходе из ТВС и определение областей твэльного пучка, откуда теплоноситель попадает в трубу отбора, являются актуальной научной задачей. Цель работы заключалась в исследовании распределения осевой скорости и расхода потока на выходе из твэльного пучка, за головкой ТВС, перед трубой отбора и в опорной плите и определении областей пучка твэлов, из которых возможно попадание потока в трубу отбора.

Моделирование гидродинамики теплоносителя на выходе из ТВС проводилось на исследовательском стенде в НГТУ. Исследовательская установка выполнена в виде разомкнутого контура с воздушной рабочей средой и состоит из системы нагнетания потока, моделей и измерительного комплекса. Течение водяного теплоносителя моделируется воздухом с учетом теории гидродинамического подобия. Модель представляет собой шестигранный канал с установленными внутри элементами конструкции выходного участка ТВС, включающими пучок стержней с решетками, головки, вытеснитель, опорную плиту с трубой отбора к термометру сопротивления. Элементы модели увеличены в 5,79 раза относительно штатного образца. Отличием моделей выходного участка ТВС атомного ледокола и АСММ является форма и число сливных окон го-

ловки для радиального выхода теплоносителя. Головка ТВС атомного ледокола имеет три широких сливных окна, АСММ — шесть узких окон. В конструкции головки также имеются сливные отверстия для аксиального истечения теплоносителя.

Осевую скорость и расход теплоносителя изучали пневмометрическим методом, заключающимся в измерении осевой скорости воздушного потока датчиком с погрешностью, не превышающей 7 %. Области поперечного сечения твэльного пучка, из которых теплоноситель попадает в трубу отбора, определяли методом впрыска примеси (газа пропана) в поток воздушной среды через регулярные ячейки, а также ячейки, находящиеся возле вытеснителя и уголков жесткости. Концентрация примеси определялась с погрешностью, не превышающей 1,5 %.

Осевую скорость и расход потока, а также растекание примеси изучали на выходе из пучка твэлов, сливных отверстий и окон головки, перед опорной плитой и в ее сливных окнах. Особенности течения теплоносителя выявляли на основе анализа картограмм распределения безразмерной осевой скорости, а также растекания примеси. Измерения проводили в зоне автомоделного течения воздуха, характеризующейся идентичностью безразмерных профилей скорости как воздушной, так и водяной среды. Следовательно, опытные данные могут быть применены при анализе течения теплоносителя в штатной ТВС. Измерения проводили при среднерасходной скорости воздуха 32 м/с и числе Рейнольдса 78000.

На выходе из твэльного пучка течение теплоносителя неоднородно, слабо зависит от типа головки и характеризуется образованием локальных минимумов и максимумов осевой скорости. Наименьшая безразмерная осевая скорость 0,1 – 0,4 наблюдается у чехла и вытеснителя. Локальный максимум безразмерной осевой скорости 0,8 – 1 фиксируется в области проходного сечения конфузора головки. Истечение теплоносителя из головки характеризуется образованием высокоскоростных струй на выходе из сливных окон и отверстий. Однородность струйного течения зависит от типа головки. За головкой с тремя сливными окнами безразмерная осевая скорость потока составляет 1,4 – 1,9, за головкой с шестью окнами – 1,4 – 1,6. При движении теплоносителя за головкой фиксируется перераспределение осевой скорости. За головкой с тремя сливными окнами минимум и максимум осевой скорости отмечается в диаметрально противоположных областях, что обусловлено закруткой потока, истекающего из сливных окон. Безразмерная осевая скорость в локальном минимуме и максимуме составляет 0,3 – 0,7 и 0,9 – 1,3 соответственно. За головкой с шестью сливными окнами минимальная осевая скорость 0,4 – 0,7 наблюдается в областях слияния потоков: радиального из сливных окон и аксиального из отверстий. Максимум осевой скорости отмечается между областями слияния аксиального и радиального потоков, безразмерная осевая скорость в них 0,9 – 1,3.

Перед верхней опорной плитой в месте установки головки, а также возле трубы отбора наблюдается перераспределение потока в сливные отверстия плиты. Для этого процесса характерно образование зон низкой осевой скорости 0,2 – 0,5 потока вокруг головки и трубы отбора. В областях перед сливными окнами безразмерная осевая скорость выше и составляет 0,8 – 1,3. Процесс перестроения потока протекает идентично за обеими головками. Между сливными отверстиями плиты поток распределяется неравномерно, что обусловлено установкой трубы отбора вместо одного из них. В сливных отверстиях, удаленных от трубы отбора, безразмерная осевая скорость 1,1 – 1,5, через сливные отверстия вблизи нее теплоноситель течет медленнее, безразмерная осевая скорость 0,5 – 1,2, что характерно для обеих головок.

При истечении теплоносителя из головок двух типов его осевой расход через сливные отверстия распределяется одинаково и составляет через каждое отверстие 4 – 4,5 % интегрального расхода. Изменение конструкции головки посредством увели-

чения числа сливных окон с трех до шести приводит к снижению осевого расхода теплоносителя через каждое окно с 25 до 12 %. При истечении теплоносителя из головки с шестью окнами расход распределяется более равномерно в поперечном сечении, чем за головкой с тремя окнами.

На выходе из пучка твэлов перемешивание теплоносителя низкоинтенсивное. Это подтверждается слабым размытием примеси в поперечном сечении. Концентрация примеси в ячейках впрыска составляет 2000 – 2400 млн⁻¹. Степень размытия примеси не зависит от расположения ячейки в твэльном пучке и типа головки. На выходе из пучка твэлов фиксируется растекание примеси в направлении центра модели, обусловленное особенностями входа потока в конфузор головки. За головкой с тремя сливными окнами примесь попадает в трубу отбора из всех ячеек впрыска, с шестью сливными окнами - из регулярных и ячейки возле вытеснителя. Распределение примеси перед трубой отбора показывает, что перемешивание теплоносителя за головкой с тремя сливными окнами интенсивнее. Это обусловлено асимметричностью осевого течения потока, вызванного закруткой теплоносителя на выходе из головки с тремя окнами.

Таким образом, эксперименты показали влияние конструкции головки на гидродинамические характеристики потока. Оно выразилось в неоднородности течения потока на выходе из твэльного пучка, из головок и перед опорной плитой. Перемешивание теплоносителя наиболее интенсивно за головкой с тремя сливными окнами, что обусловлено неоднородностью распределения потоков, выходящих из ее окон и отверстий, и подтверждается попаданием примеси в трубу отбора из всех ячеек впрыска. За головкой с шестью окнами зафиксировано однородное поле осевой скорости потока, что также может влиять на перемешивание теплоносителя и на точность показаний термометра сопротивления. Исключение из конструкции головки с шестью сливными окнами аксиальных отверстий позволит улучшить перемешивание теплоносителя за счет интенсификации радиальных потоков на выходе из сливных окон. Результаты исследований использованы при обосновании инженерных решений проектирования активных зон АО «ОКБМ Африкантов». Опытные данные использованы при валидации CFD-программы ЛОГОС.

Особенности гидродинамики теплоносителя на входе тепловыделяющей сборки реактора РИТМ

**Дмитриев С.М., Дёмкина Т.Д., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Добров А.А.,
Пронин А.Н., Курицин Д.Д., Рязанов А.В., Николаев Д.С.**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ),
Нижний Новгород
demkina.td@mail.ru*

Ключевые слова: реакторная установка, тепловыделяющая сборка, твэл, входной участок, дистанционирующая решетка, гидродинамика, аксиальная скорость, массообмен, контрастная примесь

Развитие Арктического региона невозможно без энергоисточника, обладающего такими свойствами как автономность, надёжность и маневренность. Наиболее соответствующим этим свойствам источником энергии является атомная станция малой мощности (АСММ). Требования, предъявляемые к АСММ в Арктической зоне, диктуют потребность в оригинальных технических решениях, связанных как с парогенерирующим блоком в целом, так и с отдельными его конструктивными частями. К наиболее важным из них относится кассетная активная зона, создание которой базировалось на научном, конструкторском и производственном опыте при создании судовых реакторных установок. В настоящее время ведутся конструкторские работы по созданию АСММ с реактором РИТМ, проектом которого предусматривается кассетная активная зона с топливом повышенной ураноёмкости, что позволит повысить энергоэффективность станции. ТВС кассетной активной зоны вобрала в себя технические решения, характерные для топливных кассет атомных ледоколов, однако специфика использования судовых технологий на суше во многом обусловила необходимость внесения существенных изменений в их конструкцию. К числу изменений относятся увеличенная длина твэльного пучка, оптимизированная геометрия дистанционирующих решеток и увеличенный шаг их расположения, другая форма центрального вытеснителя, оптимизированные дроссельные шайбы, индивидуально устанавливаемые на входе в каждую ТВС. За счет установки дроссельных шайб с разной площадью проходного сечения осуществляется гидравлическое профилирование кассетной активной зоны. Измененная геометрия ТВС может привести к перераспределению поля аксиальной скорости потока как на входе в твэльный пучок, так и по его высоте, что в свою очередь может влиять на теплотехническую надежность активной зоны. Указанные факторы обусловили необходимость дополнительного обоснования конструкции ТВС, а именно её входного участка. Одним из этапов обоснования конструкции ТВС является экспериментальное определение влияния элементов входного участка на процесс формирования потока теплоносителя в пучке твэлов. Результаты экспериментального изучения гидродинамики теплоносителя на входе в твэльный пучок, позволили уточнить методики обоснования теплотехнической надежности активных зон.

Для моделирования течения рабочей среды в каналах используется исследовательский аэродинамический стенд, представляющих собой разомкнутый контур с воздушной рабочей средой и состоящий из системы нагнетания потока, экспериментальной модели, измерительного комплекса. Течение водяного теплоносителя на входе в ТВС моделируется воздухом с учетом теории гидродинамического подобия.

Модель представляет собой канал, состоящий из двух секций круглой и шестигранной формы поперечного сечения. Первая секция имитирует часть ТВС, которая

находится в нижней опорной плите реактора, вторая – входной участок твэльного пучка. В секции шестигранной формы размещались макеты диффузора с узлом крепления твэлов к нему, уголков жесткости, поглощающей решетки, центрального вытеснителя, дистанционирующей решетки и фрагмент твэльного пучка. В секцию круглой формы устанавливались макеты обтекателя центрального вытеснителя, шарикового замка и дроссельной шайбы. В канал модели поочередно устанавливались две дроссельные шайбы, которые отличаются наличием в одной из них дополнительных отверстий. За счет этого было увеличено проходное сечение на 25%. Элементы модели увеличены на коэффициент геометрического подобия 5,79 относительно натурального изделия.

Перераспределение аксиальной скорости потока на входе в топливную кассету изучали пневмометрическим методом, который заключается в измерении аксиальной скорости воздушного потока, движущегося внутри модели, с погрешностью датчика, не превышающей 7%. Особенности протекания массообменных процессов в теплоносителе определяли методом впрыска контрастной примеси (газа пропана) в поток воздушной среды через регулярные ячейки, расположенные в пучке твэлов. Концентрация примеси определялась с погрешностью, не превышающей 1,5%.

Изучение гидродинамики теплоносителя производилось по поперечному сечению модели в нескольких характерных областях по длине: за дроссельной шайбой, шариковым замком, в узле крепления твэлов к диффузору, в твэльном пучке за поглощающей и перед дистанционирующей решетками. Измерения проводили при скорости воздушной рабочей среды на входе в канал (13 – 24,5) м/с и числе Рейнольдса 35000 – 65000.

Течение теплоносителя в пучке твэлов анализировали с помощью картограмм аксиальной скорости, построенных на основе её безразмерных величин (значение скорости в точке измерения нормировали на скорость на входе в канал модели).

Все исследования проводятся в зоне автомодельного движения воздушного потока, характеризующейся неизменностью безразмерных профилей скорости в каналах с воздушной и водяной средами. Следовательно, результаты экспериментов могут быть использованы при изучении условий течения водяного теплоносителя при отсутствии его фазовых превращений.

Экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления дроссельных шайб. Измерения показали, что он соответствует коэффициенту гидравлического сопротивления штатных элементов конструкции при аналогичных числах Рейнольдса.

Анализ результатов экспериментов позволил выявить влияние геометрии входного участка ТВС на течение теплоносителя в твэльном пучке и сделать следующие выводы:

1. Влияние входного участка ТВС характеризуется образованием областей с низкими величинами аксиальной скорости потока, расположенных в периферийных рядах твэлов у граней чехла ТВС параллельных пластинам крепления твэлов к диффузору. Величины относительной аксиальной скорости в выделенных областях лежат в диапазоне 0,2 – 0,8 и зависят от степени удаленности от дроссельной шайбы и диффузора.

2. Перекрытие проходного сечения шайбы без дополнительных отверстий приводит к значительному перераспределению поля аксиальной скорости потока в твэльном пучке за счет образования струйных течений из её отверстий. Перераспределение поля скорости потока характеризуется наличием области с высокой аксиальной скоростью вокруг трубы центрального вытеснителя, величины относительной скорости составили 1,3 – 1,7 и зависят от степени удаленности от дроссельной шайбы, диффузора и поглощающей решетки. Влияние типа конструкции дроссельной шайбы при полностью открытом проходном сечении на аксиальное течение теплоносителя в твэльном пучке незначительно.

3. Структура поперечных течений теплоносителя в периферийном ряду твэлов за поглощающей решеткой мало зависит от конструкции дроссельных шайб при полностью открытом их проходном сечении, что подтверждается идентичным распределением контрастной примеси по сечению пучка твэлов. При этом распределение примеси происходит преимущественно вдоль периферийного ряда твэлов, параллельно пластинам крепления твэлов к диффузору, поскольку данные пластины создают локальное сопротивление поперечным течениям теплоносителя, направленным в сторону центрального вытеснителя.

4. Частичное перекрытие проходного сечения дроссельных шайб привело к дополнительной турбулизации потока в периферийном ряду, что обусловило большую область размытия примеси в поперечном сечении твэльного пучка. Это также подтверждает наличие влияния струйных течений из отверстий шайбы на гидродинамику теплоносителя. Размытие примеси происходит вдоль периферийного ряда твэлов, что также указывает на влияние платин их крепления к диффузору.

В дальнейшем целесообразно проведение дополнительных экспериментальных исследований, направленных на определение глубины распространения неоднородности поля аксиальной скорости потока теплоносителя по длине твэльного пучка.

Таким образом, выявленные неоднородности аксиальной скорости потока могут оказать значительное влияние на процессы возникновения и развития кризиса теплоотдачи в обширной области твэльного пучка. Данные неоднородности течения теплоносителя необходимо учитывать при обосновании теплотехнической надежности активных зон реакторов новых атомных ледоколов и АСММ.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2024-0003).

Разработка улучшенной модели турбулентного перемешивания для ячейкового кода SC-INT

Арестова А.А., Олексюк Д.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
Arestova_AA@nrcki.ru

Ключевые слова: ячейковые коды, турбулентное перемешивание, ПС SC-INT, активная зона, пучки стержней, стенд КС

Теплогидравлический расчет активной зоны ядерного реактора базируется на системе уравнений Навье-Стокса и требует дополнительных замыкающих соотношений, описывающих такие процессы, как теплоотдача, турбулентное перемешивание и др.

Для теплогидравлического расчета активной зоны реакторов с водным теплоносителем широко используются ячейковые теплогидравлические коды. Это наиболее простой и быстрый способ расчета параметров теплоносителя в активной зоне. В таких кодах, как правило, используются простые эмпирические модели турбулентного перемешивания, не учитывающие образование вихрей разного размера и турбулентные пульсации в потоке. Все эти корреляции получаются эмпирически и, к сожалению, не обладают универсальностью.

Сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» разработана ячейковая расчётная программа SC-INT. Программа SC-INT разработана и валидирована для расчёта кассет реакторов ВВЭР и используется в том числе для расчета инженерных коэффициентов запаса по подогреву теплоносителя, поэтому одним из путей развития ПС является уменьшение его методической погрешности. В представленной работе рассматривается способ достижения этой цели путем совершенствования модели турбулентного перемешивания.

Анализ корреляций для турбулентного перемешивания, предложенных зарубежными исследователями, позволяет предложить модифицированную корреляцию для учета турбулентного перемешивания в программе SC-INT.

Для исследования влияния использования модифицированной корреляции на точность расчёта распределения температуры теплоносителя в пучке стержней авторами проведен расчётный анализ экспериментальных данных полученных на стенде КС НИЦ «Курчатовский институт». Стенд КС – теплофизический стенд высокого давления и температур для исследования теплогидравлических процессов в пучках твэлов различной конфигурации, верификации расчетных кодов. Располагаемая электрическая мощность стенда – 12 МВт, максимальное давление – до 17,5 МПа, расход воды – до 300 т/ч.

Для исследования корреляций турбулентного перемешивания были взяты результаты экспериментов на 37-стержневом пучке, а также результаты экспериментов на 108-стержневой модели активной зоны реактора ВВЭР-1000.

37-стержневой пучок был оснащен моделями штатных дистанционирующих решеток топливной сборки ТВС-2М, расположенными с шагом 340 мм. Имитаторы твэлов представляли собой трубки из нержавеющей стали с наружным диаметром 9,05 мм. Трубки были расположены по треугольной решетке с шагом 12,75 мм. Тепловыделяющая часть имитаторов была равна 2,5 м.

108-стержневая модель представляла собой стык трех кассет реактора ВВЭР-1000. Каждая из трех частей пучка моделировала периферийную зону отдельной кассеты, и включала 36 имитаторов твэлов. Зона тепловыделения имела длину 3,53 м, диаметр оболочки твэлов 9,1 мм.

Анализ расширенной валидации программы ПУЧОК-1000 на экспериментах по исследованию критических тепловых потоков

Босенко С.В., Чуркин А.Н.

*Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), Подольск
bosenko-sv@mail.ru*

Ключевые слова: критический тепловой поток, ТВС, пучок стержней, АЭС, ВВЭР-1200

В докладе приведены результаты дополнительной валидации программы ПУЧОК-1000 по расчету критического теплового потока применительно к топливным сборкам ВВЭР-1200. Приведена оценка влияния методики выполнения валидационных расчетов на итоговую погрешность расчета критического теплового потока. Расчеты выполнялись методом численного эксперимента и методом прямой подстановки. Использовались экспериментальные данные, полученные на пучках с равномерным и неравномерным по высоте энерговыделением.

Прогнозирование критического теплового потока является одной из ключевых задач теплогидравлики легководных реакторов. В ядерных реакторах критический тепловой поток представляет собой явление, вызванное недостаточным теплоотводом теплового потока от топливных таблеток, что приводит к резкому изменению режима течения и резкому ухудшению теплоотдачи от поверхности оболочки к теплоносителю. В среде с регулируемым тепловым потоком, такой как ядерная тепловыделяющая сборка, температура оболочки твэла будет резко возрастать при переходе к новому механизму теплопередачи, чтобы приспособиться к скорости рассеивания тепла, необходимой для отвода всего тепла, непрерывно поступающего от топливной таблетки. Резкое повышение температуры из-за возникновения кризиса может привести к повреждению твэла и нарушению эксплуатационных пределов безопасной эксплуатации.

В докладе рассматривались два основных метода расчета экспериментов по исследованию критического теплового потока:

- метод прямой подстановки («локальный» подход);
- метод численного эксперимента («мощностной» подход или метод теплового баланса).

Анализируя результаты сравнения расчетов по программе с экспериментальными данными, можно сделать вывод о том, что метод прямой подстановки даёт существенное отличие погрешностей расчета, по сравнению с методом численного эксперимента. Повышение или снижение единичной мощности пучка приводит к изменению локальных параметров (относительная энтальпия, фактор формы и т.д.), которые влияют на определение величины критического теплового потока, по сравнению с заданной по умолчанию мощностью. Наличие такой связи и является основной причиной отличия погрешностей определения критического теплового потока в обоих методах.

В целом, по проведенным расчетам можно сказать, что программа ПУЧОК-1000 корректно оценивает величину критического теплового потока в своей области применения. Снижение погрешности расчёта критического теплового потока по программе, в частности, может быть достигнуто за счёт устранения ряда методических допущений, лежащих в основе математической модели программы.

Расчетное моделирование процессов теплообмена в направляющих каналах ТВС реакторных установок ВВЭР

Матюшин А.А., Чуркин А.Н.

*Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), Подольск
matyushinanton1994@gmail.com*

Ключевые слова: CFD-моделирование, ТВС, направляющие каналы, поглощающие элементы, кроссверификация

Для решения современных задач в отечественной атомной энергетике при проектировании и обосновании надежности ЯЭУ необходима модернизация и совершенствование расчетных методик и программных средств (ПС). Также ПС проходят процессы верификации, валидации и аттестации, для чего требуется проведение экспериментов и/или кроссверификации.

Современные CFD-пакеты предлагают широкий функционал для решения гидравлических и теплогидравлических задач и находят широкое применение в областях экспериментальной деятельности, проектирования и конструирования аппаратов.

В докладе представлены результаты моделирования охлаждения поглощающего элемента (ПЭЛ) в направляющем канале (НК) реакторной установки ВВЭР-1200 с использованием ПС ТРАНК и CFD-кода.

ПС ТРАНК – аттестованная программа для теплогидравлического расчета температурного состояния ПЭЛ в НК, которая используется в проектных расчетах и имеет ряд допущений и упрощений, как в части математической модели, так и в части расчетной модели. В целях оценки влияния этих допущений на результаты расчета, выбора направления модернизации расчетной методики, расширения диапазона применимости и поддержки в последующей аттестации новой версии ПС ТРАНК, была проведена кроссверификация с CFD-кодом.

Для валидации методики CFD-моделирования были выполнены расчеты на основе экспериментов по исследованию охлаждения ПЭЛ в НК, выполненных в ОКБ «ГИДРОПРЕСС», и используемых при аттестации ПС ТРАНК.

Проведено расчетное исследование влияния на результаты расчетов степени и способа нодализации расчетной схемы в ПС ТРАНК, на основе которого были даны рекомендации по настройке расчетной схемы ПС ТРАНК. Были сделаны выводы о необходимых направлениях модернизации ПС ТРАНК. Представленные материалы будут использованы при прохождении аттестации новой версии программы.

Математическое моделирование теплогидравлических и химических процессов систем спецводоочистки и химводоочистки, применяемых в разработке полномасштабных тренажеров для проекта АЭС-2006 с РУ ВВЭР-1200

Добони К.А.

Акционерное общество «Инженерно-технический центр «ДЖЕТ» (АО «ИТЦ «ДЖЕТ»), Москва
kseniya.doboni@yandex.ru

Ключевые слова: система химводоочистки, система спецводоочистки, теплогидравлический расчёт, концентрация, измерение pH, численное моделирование, полномасштабный тренажер, ПК «Сапфир», CMS, EUSD

В настоящее время ГК «Росатом» сооружает все больше новых энергоблоков с реактором ВВЭР-1200 в России и за рубежом. В связи с этим фактом растет острая потребность в подготовке высококвалифицированных эксплуатационных кадров не только для главных систем управления АЭС, но и для систем, которые осуществляют поддерживающую функцию нормальной эксплуатации энергоблока. Таковыми системами являются блоки спецводоочистки и химводоочистки (далее СВО и ХВО соответственно).

На сегодняшний день в мире не существует ни одного теплогидравлического кода для моделирования состояния оборудования АЭС, который помимо расчета теплофизических параметров, рассчитывает химические параметры системы. Поэтому целью данной работы являлась модернизация теплогидравлического кода, при помощи создания модуля расчета химических процессов, а также создание единого адаптированного подхода к моделированию синергии теплофизических и химических параметров.

В рамках работ по созданию полномасштабного тренажера для АЭС «Эль-Дабба» были смоделированы системы химводоочистки и спецводоочистки с учетом всех технологических параметров и схем расположения оборудования, а также проведены автономные испытания данных систем. Моделирование производилось в ПК «Сапфир» с использованием теплогидравлического кода CMS (Compressible Media Solver), а также платформы EUSDS.

В результате моделирования была получена расчетная модель систем ХВО и СВО, которая производит вычисления в реальном времени. Далее проводилось сравнение с реальными данными с референтного блока ЛАЭС-2, которые показали, что модель с высокой точностью имитирует процессы, происходящие в данных системах.

Помимо созданной модели – каркаса, для дальнейшего развития расчетов в области теплофизических и химических процессов, был также создан программный модуль для расчета pH и концентраций различных химических элементов и соединений, присутствующих в системах ХВО и СВО. Модуль был написан на языке программирования C и интегрирован в модель.

Создание модуля расчета pH и концентраций положило начало для моделирования химических процессов для АЭС в рамках работ по созданию полномасштабных тренажеров.

В дальнейшем планируется модернизация теплогидравлического кода CMS, с добавлением новых расчетных модулей для химии, а также создание единого блока химических расчетов для различных параметров, с учетом химических реакций, энергий активаций реакций, а также других величин.

Секция 4. Тепломассообмен, магнитная гидродинамика, вибрации и акустика в энергетических установках

О разработке микрореактора с термофотоэлектрическим преобразованием энергии

Логинов Н.И., Михеев А.С., Ульянов В.В.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
loginov@ippe.ru*

Ключевые слова: ядерный микрореактор, безмашинное преобразование тепловой энергии, термофотоэлементы, тепловые трубы, экспериментальное обоснование

В ГНЦ РФ – ФЭИ в 2017 – 2018 гг. был разработан концептуальный проект инновационного микрореактора, в котором тепловая энергия из активной зоны передаётся к преобразователю тепловыми трубами, а её преобразование в электрическую происходит термофотоэлектрическим способом. Выходная электрическая мощность микрореактора 1–100 кВт и КПД 12 – 17 %.

Проект направлен на решение проблемы обеспечения устойчивого, экологически безопасного и экономически целесообразного энергоснабжения объектов специального и гражданского назначения, удаленных от централизованных сетей, в том числе, расположенных в северном и Арктическом регионах.

Сущность предложенного технического решения состоит в соединении положительных качеств прямого преобразования теплового излучения в электрическую энергию с помощью термофотоэлектрических преобразователей с преимуществами использования тепловых труб. Использование термофотоэлектрических преобразователей в ЯЭУ предложено впервые в мире. Разработка защищена рядом российских и зарубежных патентов на изобретения.

В докладе представлено краткое описание концептуального проекта и результаты проводимых в настоящее время в ГНЦ РФ – ФЭИ инициативных работ по экспериментальному обоснованию реализуемости проекта. Представлены также результаты патентных исследований.

МГД-эффект в каналах магнитных расходомеров для жидкометаллических теплоносителей

Михайлова Ю.В., Судариков В.К.

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт теплоэнергетического приборостроения» (АО «НИИТеплоприбор»), Москва
mikhailova@niiteplopribor.ru

Ключевые слова: магнитное число Рейнольдса, магнитное поле индуктора, магнитный расходомер, жидкометаллический теплоноситель, деформация магнитного поля, пары электродов, погрешность, линейная аппроксимация

Мерой расхода в магнитных расходомерах является разность потенциалов между электродами, возникающая в результате взаимодействия потока электропроводящей жидкости с магнитным полем. Токи, индуцированные движением проводящей жидкости, искажают магнитное поле индуктора. Изменение магнитного поля возникает только при достаточно больших магнитных числах Рейнольдса Re_m . Величина Re_m достигает порядка 1 и больше лишь в трубах большого диаметра. При этом гидравлическое число Рейнольдса имеет порядок $10^5 - 10^6$, что соответствует развитому турбулентному течению.

Такое течение характеризуется почти постоянным значением скорости всюду, кроме пограничного слоя, в котором происходит резкое изменение скорости до нуля. Толщина пограничного слоя имеет порядок $\delta \approx r / \sqrt{Re}$. При Re порядка $10^5 - 10^6$ величина $\delta/r \approx 0,3 - 0,1\%$. Поэтому, рассматривая МГД-эффект изменения магнитного поля индуцированными токами, можно пренебречь пограничным слоем и считать скорость жидкости постоянной по всему каналу и направленной по оси канала.

Для точного расчета деформации магнитного поля необходимо знать распределение источников, создающих внешнее магнитное поле. В данной работе предполагается, что источники внешнего поля удалены на достаточное расстояние от оси трубопровода. Благодаря сильному затуханию индуцированного магнитного поля вне трубопровода, это предположение мало влияет на полученные результаты.

При описанных условиях получено точное аналитическое описание индуцированного электромагнитного поля как функционала от распределения магнитного поля индуктора на внутренней поверхности канала расходомера.

Исследован сигнал с электродной пары $U(z)$, смещенной на расстояние z от центральной плоскости индуктора параллельно оси трубы.

Расчет выполнялся в два этапа.

Была исследована зависимость $U(z)$ от протяженности магнитного поля индуктора расходомера и Re_m . Распределение поля индуктора H_0 на внутренней стенке канала

задавалось в виде: $B_0 = \partial A / \partial r$, $A = B \cos \vartheta \begin{cases} 1, & |z| \leq lr \\ 0, & |z| > lr \end{cases}$, где r – внутренний радиус канала,

ϑ – угол поворота по часовой стрелке вокруг оси трубопровода. Рассматривались значения $l = 0,75, 1,0, 1,25, 1,5, 1,75, 2,0$, характерные для магнитных расходомеров.

Далее был выполнен расчет $U(z)$, в котором в качестве входных данных для расчета магнитного поля индуктора использовалась трехмерная модель первичного преобразователя расходомера DN300. Магнитное поле индуктора определялось с использованием программного комплекса ANSYS Maxwell.

Показано, что существует область z/r , в которой чувствительность сигнала с электродной пары, т.е. $g = U/v$, слабо зависит от магнитного числа Рейнольдса, если Re_m не превышают определенной величины. Размер и положение этой области сильно зависят от протяженности поля индуктора.

Для рассматриваемого расходомера DN300 при $Re_m \leq 5$ указанное свойство выполняется в области $0,245 \leq z/r \leq 0,294$. Этот результат согласуется с экспериментальными результатами Шурупова В.А., Кебадзе Б.В. и Фомина А.Н., полученными на нартриевой расходомерной установке ИРС-М¹.

Для повышения точности измерения рассмотрены варианты измерения расхода с использованием двух или трех пар электродов: а) два электрода, расположенные симметрично относительно центральной плоскости индуктора; б) три пары электродов, из которых одна центральная и две, расположенные симметрично относительно центральной плоскости индуктора.

В случае а) измеряемой величиной будет сумма сигналов с двух пар электродов, т.е. величина $U(z) = U_1(z) + U_2(-z)$. В случае б) измеряемой величиной будет величина $U(z) = U_1(z=0) + \lambda/2 [U_2(z) + U_3(-z)]$, рассматривались значения $\lambda = 3, 3,5, 3,75, 4,0, 4,5, 5,0$. Рассчитывалась чувствительность $W(z, Re_m) = U(z, Re_m) / v$.

Показано, что в случае а) при расчете с заданным распределением магнитного поля индуктора размеры области $[z_1, z_2]$, где чувствительность $W(z, Re_m)$ достаточно мало меняется при изменении Re_m , увеличены по сравнению со случаем, когда имеется только одна пара электродов. Протяженность этой области $\Delta = z_2 - z_1$ и значения z_1, z_2 зависят от параметра l : параметры Δ, z_1, z_2 увеличиваются с ростом l .

Для прибора DN300 с электродными парами при $1,14 \leq |z|/r \leq 1,26$ ошибка измерения δ , связанная с МГД-эффектом, не превышает 1%. Минимальная погрешность $\delta < 0,1\%$ наблюдалась при $|z|/r \sim 1,222$. Использование линейной аппроксимации по Re_m , а именно $W(z, Re_m) = W(z, 0) [1 + \alpha(z)Re_m]$, позволяет уменьшить максимальную погрешность в указанном диапазоне до 0,5%.

В случае б) близким к оптимальному определен параметр $\lambda = 3,5$.

При расчете с заданным распределением магнитного поля индуктора размеры области $[z_1, z_2]$, где значение $\delta(z)$ достаточно мало, увеличены по сравнению со случаем, когда имеется две пары электродов.

В случае $\lambda = 3,5$ для прибора DN300 с электродными парами при $1,48 \leq |z| \leq 1,88$ ошибка измерения δ не превышает 1%. Используя линейную аппроксимацию по Re_m , получаем погрешность измерения менее 1% при любом расположении электродов в области $|z|/r < 2$. При оптимальном расположении погрешность измерения на порядок меньше.

В случае б) показано, что зависимость α от z/r в области $z/r \in [1,0, 1,8]$, где α заметно отличается от нуля, носит линейный характер. Поэтому зависимость α от $\xi = z/r$ и λ можно аппроксимировать следующим выражением: $\alpha(\xi, \lambda) \cong \alpha_0(\lambda) + \alpha_1(\lambda)\xi$. Определены значения параметров α_0 и α_1 в зависимости от λ . Погрешность приближения $A = \frac{\alpha(\xi, \lambda) - \alpha_0(\lambda) - \alpha_1(\lambda)\xi}{\alpha(\xi = 1, \lambda)}$ не превышает 0,06, что вполне удовлетворительно вследствие малости $\alpha(\xi, \lambda)$.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструкции и метода градуировки расходомера.

¹ Shurupov V.A., Kebabdz B.V., Fomin A.N., Application of Physical Modeling When Calibrating High Range Electromagnetic Flowmeters // IAEACN245166.

Расчетно-экспериментальное исследование моделей передачи широкополосной вибрации через виброизолирующие развязки трубопроводов высокого давления с жидкостью

Кириухин А.В.^{1, 2}, Мильман О.О.^{1, 2, 3}, Птахин А.В.^{1, 2, 3}, Сережкин Л.Н.²

¹ Закрытое акционерное общество «Научно-внедренческое предприятие «Турбокон» (ЗАО НПВП «Турбокон»), Калуга;

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского» (КГУ им. К.Э. Циолковского), Калуга;

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Калуга
Turbocon@kaluga.ru

Ключевые слова: трубопровод, рабочая жидкость, виброизолирующая развязка, частота, компенсатор, вибрационная жесткость, пульсация давления, динамическая сила

Для уменьшения передачи вибрации от установки на фундамент и окружающие конструкции часто применяют виброизоляцию. При расчетах в классической теории виброизоляции жесткости виброизоляторов считаются не зависящими от частоты колебаний. Эксперименты показывают, что для опорной виброизоляции (пневматической, резинометаллической) увеличение жесткости с частотой составляет полтора – два раза по сравнению со статической жесткостью до частот порядка нескольких сотен герц. При расчетах трубопроводов жесткости компенсаторов (они же являются и виброизолирующими развязками по линии трубопроводов) принимают равными статическим. Других значений жесткости компенсаторов не имеется ни в литературе, ни в технической документации на компенсаторы.

Проведенные эксперименты показывают, что переходные вибрационные жесткости практически всех имеющихся типов компенсаторов, увеличиваются в десять, сто и более раз с увеличением частоты колебаний уже начиная с частот порядка десятков герц (рис. 1). Наличие в трубопроводе и компенсаторе слабо сжимаемой рабочей среды (воды) дополнительно увеличивает вибрационную жесткость компенсатора на порядок и более с увеличением частоты (рис. 1). Вибрационная переходная жесткость компенсатора $C(f)$ определялась как модуль отношения динамической силы $Q(f)$ на заторможенном выходе компенсатора к амплитуде вибрации $A(f)$ на его входе на частоте колебаний f .

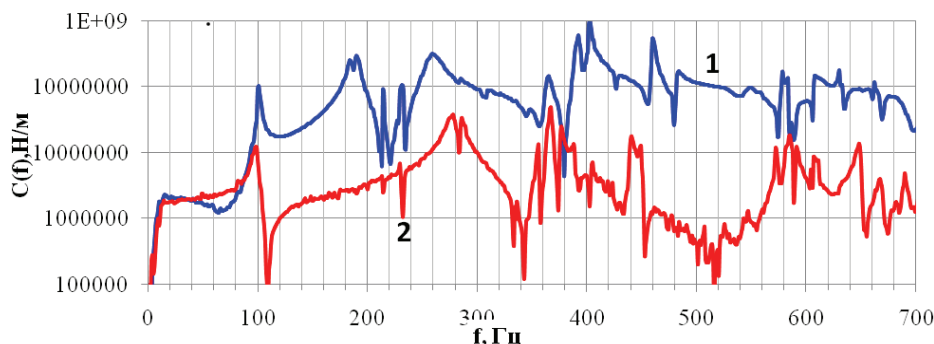


Рис. 1. Влияние частоты и наличия воды на вибрационную жесткость C_v компенсатора на основе резинокордной оболочки (РКО) диафрагменного типа: 1 – вода; 2 – воздух внутри компенсатора. Статическая жесткость $C(f)_{ст} = 1,7$ МН/м

Проведенные исследования литературных источников и патентный поиск за последние 30 лет не выявили работ, описывающих обнаруженные явления. Только в работе [1] описаны методы исследования и стенды для определения частотно – зависимых характеристик элементов виброизоляции, в том числе – компенсаторов с жидкостью. Частично результаты исследований авторов описаны в работе [2].

Проведенные исследования выявили физические модели такого существенного роста вибрационной жесткости с частотой. Была создана конструкция компенсатора с тонкослойными резинометаллическими элементами (ТРМЭ), имеющая вибрационную жесткость на один – два порядка меньшую, чем у стандартного компенсатора, в диапазоне частот от 30 до 800 Гц при наличии воды внутри компенсатора (рис. 2).

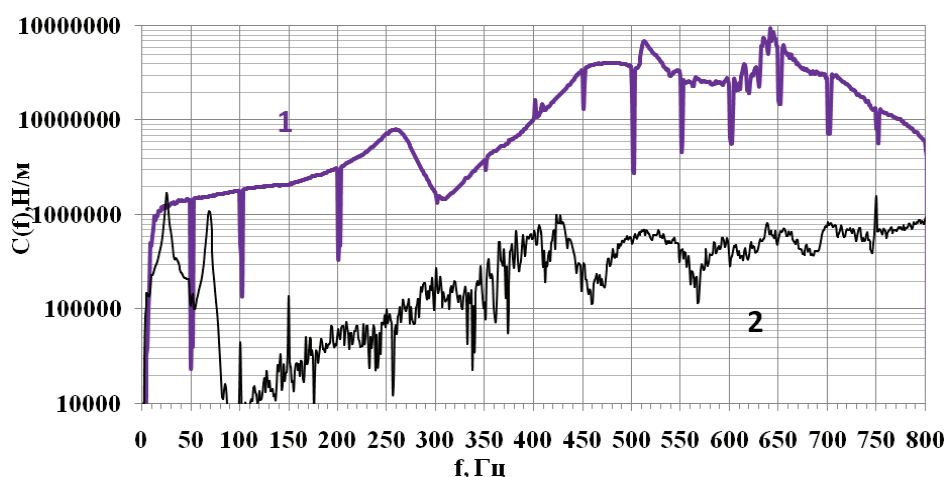


Рис. 2. Сравнение вибрационных жесткостей компенсаторов с водой на основе РКО баллонного типа (1) и новой конструкции компенсатора с ТРМЭ (2)

Эксперименты выявили существенное влияние протока рабочей жидкости через компенсатор на передачу динамических сил и вибраций через него на трубопровод. Уменьшение пульсаций от протока при помощи установки направляющих решеток (ламинизаторов) в компенсаторе снизило это влияние на порядок.

Проведенные работы позволили определить направления дальнейших исследований, направленных на уменьшение передачи вибрации компенсаторами трубопроводов с жидкостью. Это правильное конструирование самих компенсаторов с целью минимизации уровней их структурных резонансов и порождаемых в них пульсаций давления, а также применение различного типа гасителей пульсаций давления (в том числе – с применением активных методов гашения вибраций и пульсаций давления) и поиск оптимального места их установки в компенсаторе и трубопроводе.

Литература

1. Попков В.И., Попков С.В. Колебания механизмов и конструкций. – СПб.: «Сударыня», 2009. – 490 с.
2. Кирюхин А.В., Мильман О.О., Серезкин Л.Н., Лошкарева Е.А. Влияние протока рабочей среды на передачу вибрации от энергетической установки через виброизолирующие компенсаторы трубопроводов // Теплоэнергетика. – 2024. – № 5.

О некоторых свойствах пульсаций температуры в жидких металлах

Птахин А.В.^{1, 2, 3}, Крылов В.С.^{1, 2, 3}

¹ *Закрытое акционерное общество «Научно-внедренческое предприятие «Турбокон» (ЗАО НПВП «Турбокон»), Калуга;*

² *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского» (КГУ им. К.Э. Циолковского), Калуга;*

³ *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Калуга
ptakhinav@turboconkaluga.ru*

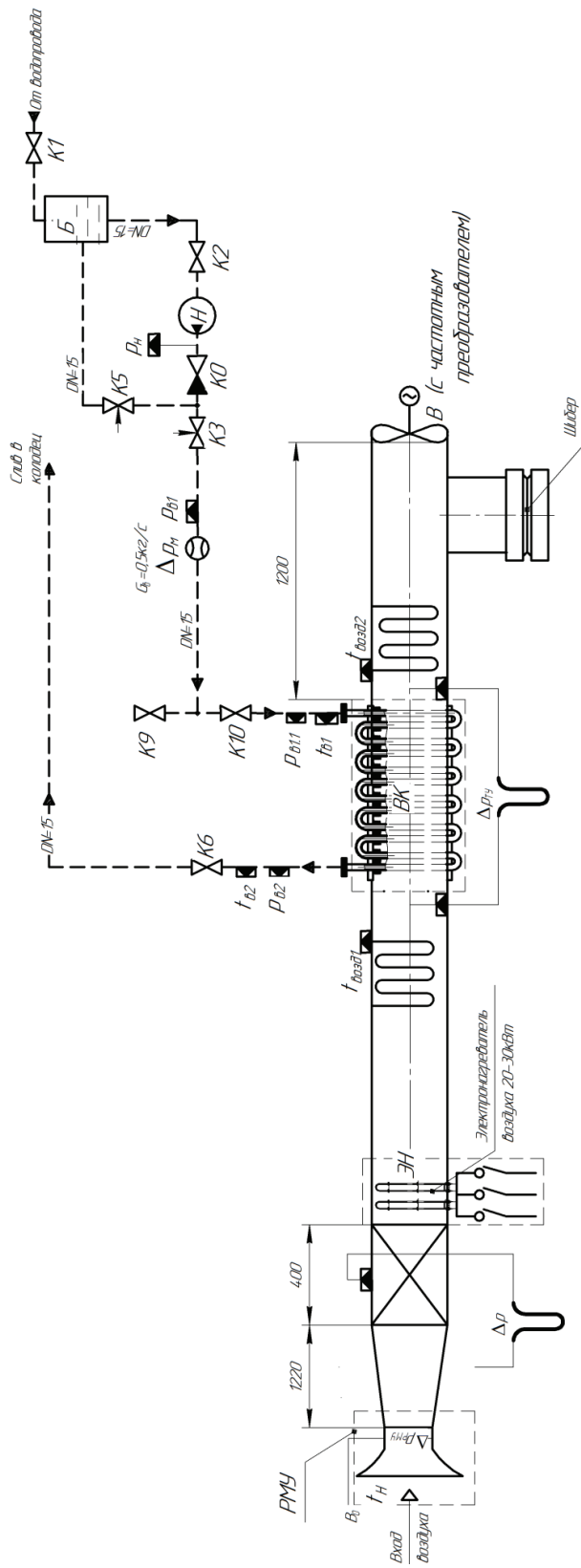
Ключевые слова: конденсация, пар, система охлаждения, низкокипящий теплоноситель, система аварийного расхолаживания, естественная циркуляция

В связи с развитием атомных станций малой мощности одним из существенных вопросов является системы отвода тепла, как аварийные, так и цикловые. Атомные станции малой мощности имеют преимущество по установке в непосредственной близости от потребителей электроэнергии и тепла. В этом случае, водные ресурсы могут быть недоступны или ограничены. Полностью добиться автономной и независимой работы от внешних факторов возможно с системами сухого охлаждения. Конфигурации и выбор теплоносителя определяют климатические условия работы. В некоторых районах невозможно использования воды в качестве теплоносителя из-за риска замерзания и разрушения теплообменных аппаратов и трубопроводов. Системы с открытым охлаждением башенного или вентиляторного типа требуют постоянной подпитки водой, т. к. неизбежны потери на испарение охлаждающей воды (равной расходу на турбину) и унос капельной влаги (0,005% от расхода циркуляционной воды).

Благодаря значительному опыту работы с системами сухого охлаждения для энергоблоков малой и средней мощности коллективом ЗАО НПВП «Турбокон» были разработаны системы аварийного автономного расхолаживания реакторов на низкокипящем теплоносителе с внутритрубной конденсацией и система отвода циклового тепла на пропиленовом теплоносителе.

Была создана экспериментальная установка для получения характеристик макета теплообменного аппарата системы аварийного расхолаживания в режиме естественной циркуляции (ЕЦ), приведение их в безразмерную форму и использование при проектировании полноразмерной установки. На макете системы аварийного расхолаживания получены основные технические характеристики системы, величины коэффициентов теплоотдачи теплообменника-радиатора в режиме естественной циркуляции охлаждающего воздуха, коэффициента теплопередачи конденсатора при естественной циркуляции низкокипящего теплоносителя – аммиака и величину предельной тепловой нагрузки.

Для выбора оптимальных параметров установки сухой вентиляторной градирни были проведены экспериментальные исследования четырёх трубных пучков различной геометрии на стенде (рисунок). Была разработана схема комбинированная функциональная замкнутого контура охлаждения конденсатора и вспомогательного оборудования турбогенератора.



Принципиальная схема стенда для продувки теплообменных поверхностей

Квантовое моделирование теплофизических свойств жидких металлов

Левашов П.Р., Минаков Д.В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва
pasha@jih.t.ru*

Ключевые слова: жидкие металлы, уравнение состояния, кривая плавления, критическая точка, транспортные и оптические свойства

Жидкие металлы представляют собой чрезвычайно сложную систему для теоретического изучения. Это объясняется сильным межчастичным взаимодействием как электронов, так и ионов, а также необходимостью учета квантовых эффектов для электронов. Таким образом, использование подходов статистической физики для жидких металлов чрезвычайно затруднено. Попытки разработки псевдопотенцилов для описания жидких металлов также не оправдали возлагавшихся на них надежд, к тому же разработка псевдопотенциалов в существенной степени опирается на экспериментальные данные. На сегодняшний день нет сомнений, что жидкие металлы необходимо описывать как квантовую кулоновскую систему с учетом всех межчастичных взаимодействий, а также квантовых эффектов. Такой подход реализуется в методе функционала электронной плотности, который позволяет с хорошей точностью рассчитывать распределение электронной плотности в ячейке моделирования при заданных положениях ионов. Метод квантовой молекулярной динамики позволяет на основе метода функционала плотности рассчитывать классическую динамику ионов, движущихся под действием сил со стороны электронов и других ионов. Существенное преимущество метода функционала плотности состоит в том, что в нем не используются эмпирические данные, за исключением фундаментальных физических констант, а также заряда и массы ядра исследуемого элемента.

В работе рассматривается моделирование теплофизических свойств большого числа жидких металлов: вольфрама, молибдена, урана, циркония, рения, железа, висмута, натрия и свинца. Для всех веществ производилось моделирование изохор в жидкой фазе; дополнительно для оценки кривых плавления производилось моделирование изотерм в твердой фазе. Рассчитывались следующие свойства: ударные адиабаты сплошных и пористых образцов, изоэнтропы разгрузки, изобары, соответствующие статическим экспериментам и экспериментам по электровзрыву проволок, теплоемкость, коэффициент Грюнайзена, скорость звука, энтальпия, скачок энтальпии и плотности при плавлении, кривые плавления. Кроме того, для ряда металлов выполнены оценки критических параметров с указанием погрешности расчетов, а также бинодали со стороны жидкости. Была продемонстрирована термодинамическая согласованность статических и динамических экспериментов для жидких металлов. Для натрия оценки критических параметров в пределах погрешности расчета согласуются с экспериментальными оценками, также получено хорошее согласие с теплофизическими справочными данными на изобарах.

Помимо термодинамических свойств, выполнялись и расчеты транспортных и оптических свойств жидких металлов. Так, коэффициенты электропроводности и теплопроводности вычислялись с помощью формулы Кубо-Гринвуда на основе информации, получаемой из квантового моделирования. С помощью преобразования Крамерса-Кронига восстанавливалась комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические свойства в зависимости от частоты, в том числе спектральные коэффициенты отраже-

ния и поглощения. Расчеты электропроводности показали хорошее согласие с недавними экспериментами по электровзрыву проводников для циркония. Излучательная способность жидкого циркония и свинца показывает существенный рост при повышении температуры. Теплопроводность жидкого свинца, согласно нашим расчетам, сначала возрастает в зависимости от температуры, проходит через максимум при 2500 К, а затем уменьшается.

Полученные результаты показывают перспективность квантовых расчетов для практических целей, в частности, прогнозирования свойств жидкометаллических теплоносителей в областях, труднодоступных для экспериментального изучения. Не исключено, что в будущем квантовые расчеты будут конкурировать с теплофизическими экспериментами.

Современные технологии обработки данных с использованием искусственных нейронных сетей для решения практических задач теплофизики

Шлёпкин А.С., Морозов А.В., Сахипгареев А.Р.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
sas@ippe.ru*

Ключевые слова: интеллектуальные методы обработки данных, нейронные сети, большие данные, теплофизика

Для теплофизических процессов характерно наличие большого числа взаимосвязанных параметров. Поэтому, необходимое количество измеряемых в ходе экспериментов величин может составлять нескольких сотен, а полученный массив данных будет включать в себя миллионы значений, что делает задачу обработки накопленной информации и выявления закономерностей достаточно сложной. Особенно это верно для таких сложных объектов техники, как ядерные энергетические установки.

Для упрощения процесса обработки данных применяются различные методы. Одним из самых перспективных является нейросетевое машинное обучение. В ходе его нейросетям предоставляются наборы данных, содержащие в себе начальные и конечные значения параметров. По мере анализа нейросеть выявляет взаимосвязи и закономерности, формируя уникальную модель, которая может применяться для предсказания и обработки новой информации. Одним из важнейших преимуществ нейросетей является высокая чувствительность к аномалиям и отклонениям от выработанных ими моделей протекания исследуемого процесса.

Используются методы машинного обучения и в области теплофизики. В частности, в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» ведется разработка средств диагностики процессов, способных вызвать аварийную ситуацию на АЭС [1]. Нейросеть, «обученная» на данных, полученных в ходе эксплуатации блока, способна практически моментально обнаруживать любые отклонения параметров от нормальных. Важным преимуществом такой нейросети является ее способность к оценке параметров реакторной установки, для которых не предусмотрено наличие контрольно-измерительных приборов.

Нейронные сети способны выполнять задачи прогнозирования и аппроксимации с высокой точностью. Например, методы машинного обучения применяются для прогнозирования такого важного теплофизического параметра, как вязкость нефти и нефтепродуктов. Это позволяет упростить процесс нефтедобычи и снизить затраты на экспериментальные исследования [2].

Кроме того, нейронные сети можно использовать для облегчения проведения экспериментов. В частности, машинное обучение можно использовать для повышения точности измерений многосенсорных систем. Так, благодаря применению машинного обучения, существует возможность использования полупроводниковых газоанализаторов для выявления наличия определенного газа в загрязненной среде.

Современная электронная аппаратура в ряде случаев оперирует с импульсными сигналами нано- и пикосекундной длительности. Нейросети позволяют фиксировать их амплитудно-временные параметры даже при наличии сильных шумов.

Кроме того, нейросети можно применять при подготовке к выполнению экспериментов. Такие открытые инструменты, как ChatGPT или GigaChat, благодаря обучению на огромном массиве данных способны к подготовке рекомендаций по проведению исследова-

ний, начиная от подбора измерительной аппаратуры до помощи в создании методики проведения опытов.

Выполненный обзор существующих решений в области машинного обучения показывает, что нейросети представляют собой мощный инструмент обработки данных, способный на получение точных закономерностей, выявление аномалий и прогнозирование развития исследуемых процессов. Они могут найти широкое применение во всех сферах человеческой деятельности, включая связанные с теплофизикой.

Литература

1. Николаева А.В., Астахов В.В., Литышев А.В., Пантюшин С.И. Перспективные направления применения технологии «искусственный интеллект» для диагностики ЗПА // *Труды Всероссийской конференции «XXXIX Сибирский теплофизический семинар»*. – Новосибирск, 2023. – 284 с.
2. Григорьев Б.А., Колдаев А.И., Болдырев Д.В. Нейросетевой метод прогнозирования вязкости жидких нефтепродуктов // *Научно-технический сборник. Вести газовой науки*, 2021. – № 2(47). – С. 4–9.

Тепловые трубы в современных проектах ЯЭУ

Верещагина Т.Н., Логинов Н.И.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
vtn@ippe.ru

Ключевые слова: тепловые трубы, ядерные энергетические установки, атомные станции малой мощности, микрореакторы, патентный поиск

Термин *heat pipe* («тепловая труба» или «тепловая трубка») появился и стал общепринятым в начале 60-х годов, после публикаций Гровера. Уникальные свойства тепловых труб достаточно быстро были оценены учеными-атомщиками. Первое техническое решение по использованию испарительного охлаждения в ядерном реакторе было запатентовано в 1957 году. По-крайней мере четыре патента, предлагающих использовать тепловые трубы в ядерных реакторах, были опубликованы еще до появления этого термина. В патентных документах, имеющих отношение к атомной энергетике, термин *heat pipe* впервые появился в 1968 году.

В обзоре патентной и научно-технической литературы, выполненном авторами в 2018 году, были показаны широкие возможности применения тепловых труб в атомной энергетике и предсказано появление в ближайшем десятилетии ядерных реакторов, охлаждаемых тепловыми трубами без насосов и большого количества теплоносителя.

Действительно, за 5 последних лет появилось множество новых проектов ЯЭУ, использующих тепловые трубы. В 2018 году в международной базе данных Worldwide в этой области имелось около 250 патентных документов (патентов и заявок), а в конце 2023 года таких документов насчитывалось уже почти 600.

Особенно перспективным представляется использование тепловых труб в автономных микрореакторах сверхмалой мощности. В 2018-19 гг. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» получил четыре патента РФ на концепцию инновационного микрореактора (проект РИФМА) и три варианта активной зоны. В проекте РИФМА тепловая энергия передается из активной зоны высокотемпературными литиевыми тепловыми трубами и преобразуется в электрическую с помощью термофотоэлектрических преобразователей. И именно с 2019 года в мире начался бурный рост патентной активности в этой области: за 4 года (2020–2023) было опубликовано столько же патентных документов, сколько за предыдущие 50 лет.

Микрореакторы с тепловыми трубами наиболее востребованы для космических ЯЭУ, наземных и военных объектов, удаленных от централизованных источников электроэнергии. Например, в США разрабатывается и проходит лицензирование ряд проектов таких микрореакторов.

В докладе приведен обзор и анализ появившихся за последние пять лет технических решений по использованию тепловых труб в ядерной энергетике. Определены страны, наиболее активно ведущие исследования в этой области. Приведены примеры наиболее проработанных проектов ядерных установок с тепловыми трубами.

Обоснование параметров аэродинамического стенда для исследования процесса перемешивания потоков теплоносителя в собирающем коллекторе ВТГР с применением CFD моделирования

Дмитриев С.М., Добров А.А., Рязанов А.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ),
Нижний Новгород
dobrov@nntu.ru

Ключевые слова: высокотемпературный газоохлаждаемый реактор, гидродинамика, перемешивание, моделирование, подобие, собирающий коллектор

Согласно концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации в период до 2035 года [1] в качестве одного из приоритетных направлений рассматривается производство низкоуглеродного водорода из ископаемого сырья на базе атомной энерготехнологической станции (АЭС). В качестве источника высокопотенциального тепла в составе АЭС рассматривается высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР) [2].

При разработке проекта ВТГР одной из ключевых задач является расчетное обоснование принятой конструкции [3], в частности обоснование теплотехнической надежности реактора и его отдельных элементов. Одна из важных задач при обосновании теплотехнической надежности реактора связана с неравномерностью энерговыделения в активной зоне реактора, в результате чего в нижний собирающий коллектор поступают струи гелиевого теплоносителя с различной температурой. Для обеспечения требуемого ресурса теплообменного оборудования первого контура необходимо снижение температурной неравномерности. В связи с этим необходимо иметь информацию о локальных значениях температуры теплоносителя на входе в нижний коллектор и в горячем газоходе, и при необходимости обеспечить смешение струй гелия для выравнивания профиля температур при приемлемом гидравлическом сопротивлении.

В настоящее время в НГТУ им. Р.Е. Алексеева ведется монтаж экспериментально-аэродинамического стенда, позволяющего моделировать процессы неизотермического перемешивания потоков гелия на выходе из призматической активной зоны ВТГР в нижний собирающий коллектор и далее в горячий газоход. Обоснование представительности модельных исследований потребовало анализа определяющих процесс критериев подобия, определения зависимых безразмерных величин и чисел подобия, выбора и обоснования масштаба экспериментальной модели.

В рамках проведенной работы в анализе подобия в качестве определяющих были учтены следующие критерии подобия: Рейнольдса, Пекле, Грасгофа, Струхала, Маха и Эккерта, а также параметрические критерии подобия, представляющие собой отношение одноименных свойств теплоносителя при максимальной и минимальной входной температуре. Определяемыми величинами в таком случае стали число Эйлера, безразмерная температура и безразмерная скорость.

Были выбраны оптимальные параметры стенда и модели, в наибольшей степени удовлетворяющие условиям подобия. В работе было определено, что при использовании воздуха при атмосферном давлении, масштабе модели 1:2,5, числе Рейнольдса $1 \cdot 10^6$ и температурной неоднородности на входе (28 – 61) °С поля безразмерной скорости и безразмерной температуры будут одинаковыми с натурными условиями.

В обоснование конструкции экспериментальной модели и в подтверждение выбранных режимных параметров проведены CFD расчеты течения рабочей среды в натурном фрагменте реактора при штатных условиях и в аэродинамической модели в условиях планируемого эксперимента. Результаты показали подобие по полям безразмерной температуры и скорости рабочей среды, а также позволили определить минимально необходимое количество датчиков измерения температуры в модели, по показаниям которых можно восстановить температурное поле.

Литература

1. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации, утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р.
2. Фатеев С.А., Петрунин В.В., Кодочигов Г.Н. и др. Развитие технологий атомно-водородной энергетики в Госкорпорации «Росатом» // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133. – Вып. 5 – 6. – С. 243–250.
3. Диденко Д.В., Балуев Д.Е., Мааров И.В. и др. Расчетное моделирование теплофизических процессов в высокотемпературном газоохлаждаемом реакторе // Компьютерные исследования и моделирование. – 2023. – Т. 15. – № 4. – С. 895–906. DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-4-895-906.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2024-0003).

К вопросу о ламинарном теплообмене в газовых смесях с низким числом Прандтля

Сидоров А.Е., Бурцев С.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Москва
sidorovae@student.bmstu.ru

Ключевые слова: гелий-ксеноновая смесь, компактные теплообменники, ламинарный теплообмен, замкнутая газотурбинная установка, число Прандтля, пластинчато-ребристая теплообменная поверхность

Недостаток энергии в космосе возможно устранить с помощью замкнутой газотурбинной установки (ЗГТУ), работающей по циклу Брайтона, в которой используются компактные теплообменные аппараты с пластинчато-ребристыми поверхностями. Рабочим телом такой установки может являться бинарная газовая смесь на основе гелия с молярной массой 20 – 60 г/моль и числом Прандтля порядка 0,2. В качестве нагревателя может выступать ядерный реактор, солнечный концентратор, твердотопливные элементы и радиоизотопные источники энергии.

Для расчета массогабаритных характеристик необходимо использование соотношений для числа Нуссельта, коэффициента теплоотдачи или фактора Колбурна, которые были получены в результате эксперимента на соответствующем типе смеси с соответствующей молярной массой и числом Прандтля соответственно. Также, в эксперименте должен был исследоваться теплообмен при ламинарном течении через теплообменный аппарат, так как данный режим течения является предпочтительным в установках такого рода.

Проведено две аппроксимации значений фактора Колбурна по результатам единственной работы по исследованию ламинарного теплообмена в пластинчато-ребристых поверхностях, опубликованной в открытом доступе, и получено новое соотношение для расчета ламинарного теплообмена в бинарных газовых смесях с низким числом Прандтля.

Было проведено сравнение обоих новых соотношений для фактора Колбурна с классическими соотношениями, полученными в результате экспериментов на воздухе.

Также, с аппроксимированными соотношениями сравнивались более современные соотношения для расчета чисел Нуссельта, которые были получены в результате эксперимента на смеси с низким числом Прандтля или допускали применение в расчете коэффициента теплоотдачи в таких смесях.

В результате исследования было выявлено, что разница между аппроксимированными соотношениями и наиболее популярными соотношениями для расчета коэффициента теплоотдачи достигает 60 % и продолжает расти с падением числа Рейнольдса. Сделан вывод о необходимости проведения дополнительных исследований в диапазоне числа Рейнольдса 100 – 2000 для уточнения результатов работ предыдущих десятилетий.

Термоакустические устройства в ЯЭУ

Кудряева Ю.В., Верещагина Т.Н.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
Curiosity-19@yandex.ru

Ключевые слова: термоакустика, термоакустический двигатель, термоакустический холодильник, тепловые трубы, ядерные энергетические установки, атомные станции малой мощности, патентный поиск

Попутный нефтяной газ (ПНГ), сопровождающий добычу нефти, до недавнего времени в подавляющем большинстве случаев сжигался в факелах, что наносило вред окружающей среде и приводило к потерям ценного углеводородного сырья. С 2012 года Правительством РФ принят ряд постановлений, стимулирующих снижение доли сжигаемого ПНГ, в том числе Постановление Правительства РФ, обязывающее нефтедобывающие компании утилизировать 95 % попутного нефтяного газа.

Одним из перспективных направлений развития энергетики является разработка автономных малогабаритных энергетических установок малой мощности (до 300 МВт) для обеспечения электрической и тепловой энергией удаленных труднодоступных территорий, а также для микрореакторов космических аппаратов.

Как в России, так и за рубежом, устройства, использующие термоакустический эффект, находят всё более широкое применение в установках по добыче и переработке полезных ископаемых, системах охлаждения и кондиционирования воздуха. Разрабатываются локальные энергосистемы для выработки тепловой и электрической энергии. Для повышения эффективности термоакустического преобразования энергии активно ведутся разработки и усовершенствование систем «термоакустический двигатель – электрический генератор».

Технические преимущества энергетических установок, разработанных с применением термоакустических устройств, заключаются в длительном сроке службы, высокой безопасности, отсутствии вращающегося механического оборудования, низком уровне шума, простоте и надежности системного оборудования, невысоких требованиях к системе охлаждения, возможности реализации модульной конфигурации, экологической чистоте производства энергии. В термоакустических устройствах осуществляется внешний подвод тепла, поэтому они, как и двигатели Стирлинга, позволяют использовать любой источник тепловой энергии.

В последнее десятилетие появились предложения по использованию термоакустического эффекта в ядерных энергетических установках, в системах электропитания и охлаждения космических аппаратов.

В области проектирования ядерных энергетических установок с применением термоакустических устройств актуальны следующие разработки: реакторные системы с тепловыми трубами; устройства контроля активной зоны реактора; измерение температуры в трубопроводах системы охлаждения реактора и др.

В настоящее время в системах электропитания космических аппаратов используются радиоизотопные источники совместно с термоэлектрическими преобразователями. К недостатку этих систем можно отнести низкие КПД и большую массу. Использование термоакустического двигателя совместно с линейным генератором на постоянных магнитах может существенно улучшить эти характеристики.

В докладе приведён обзор и анализ технических решений по применению термоэлектрических устройств в атомной энергетике.

Преобразователи термоэлектрические с действительной (индивидуальной) статической характеристикой преобразования

Логинов В.Н., Резанов Д.С.

*Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), Нижний Новгород
rezanov13@okbm.nnov.ru*

Ключевые слова: преобразователи термоэлектрические, статической характеристикой преобразования, межповерочный интервал

Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 июля 2023 года № 1472 утвержден тип средств измерений «Преобразователи термоэлектрические ТМПК», изготавливаемых по техническим условиям КЛАБ.405221.010ТУ. Регистрационный номер в государственном реестре средств измерений – 89519-23.

Отличительной особенностью данных преобразователей термоэлектрических от прочих кабельных является возможность поставки их с действительной статической характеристикой преобразования (определенной посредством градуировки), сохраняющейся в течение 1000 часов наработки с пределом допускаемых отклонений, не превышающим $\pm 0,25$ °С, в диапазоне от 0 до 650 °С (диапазон градуировки ограничен диапазоном измерений). Межповерочный интервал преобразователей с ДСХ – 1000 ч. По истечении 1000 часов наработки возможно дальнейшее использование преобразователей термоэлектрических по прямому назначению по классу допуска 2 ГОСТ 6616. Межповерочный интервал преобразователей термоэлектрических ТМПК класса допуска 2 – 2 года.

Исследование режимов работы магнитного расходомера тяжелого жидкометаллического теплоносителя при регулировании содержания кислорода

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

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ),
Нижегород
rom.sumin@yandex.ru

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, свинец-висмут, методы измерения, магнитный расходомер

Для стабильной работы ядерной энергетической установки (ЯЭУ) необходимо обеспечить автоматическое управление и контроль параметров теплоносителя. В настоящее время в России активно ведутся работы по созданию реакторных установок типа БРЕСТ-ОД-300, БР-1200 и СВБР.

Одним из возможных средств измерения расхода жидкого металла является магнитный расходомер, основанный на прямом преобразовании расхода в сигнал на основе закона электромагнитной индукции Фарадея.

Важным показателем при эксплуатации стендов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) является термодинамическая активность (ТДА) кислорода.

Увеличение или уменьшение ТДА кислорода в ТЖМТ ведет к изменению толщины оксидной пленки на конструкционном материале трубопровода. Из-за роста толщины оксидных пленок растет контактное сопротивление ТЖМТ – нержавеющей стали, что необходимо учитывать при эксплуатации магнитных расходомеров для ТЖМТ.

Градуировка магнитного расходомера проводилась на стенде со свинец-висмутовым теплоносителем ФТ-1 НГТУ объемным методом с помощью расходомерного бака. Магнитное поле создавалось постоянным магнитом. При этом ТДА кислорода варьировалась от $a = 10^0$ до $a = 10^{-6}$ путем регулирования с подачей водорода. Температура теплоносителя в ходе экспериментов составляла 400 °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»).

Секция 5.

Расчетные модели, коды и результаты численного моделирования

Разработка, верификация и валидация специализированной версии системного расчетного кода КОРСАР/ЖМТ

Волкова С.Н., Грицай А.С., Данилов И.Г., Мигров Ю.А., Мицкевич А.В.,
Попов А.О., Ярушина А.В.

*Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова»
(ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»), г. Сосновый Бор
email: angricaj@yandex.ru*

Ключевые слова: база данных, стендовая установка, экспериментальная информация, расчетный код, расчетная модель, валидация, КОРСАР/ЖМТ

Сохранение знаний в области ядерных технологий имеет принципиальное значение для успешного развития ядерной энергетики. В настоящее время в Российской Федерации наблюдается тенденция роста среднего возраста ведущих специалистов ядерной отрасли. При этом не происходит адекватное их замещение молодыми специалистами за счет отсутствия должной преемственности.

Главной задачей ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», успешно решаемой в течение нескольких десятилетий, является проведение испытаний прототипов ядерных реакторов транспортного назначения на стендовых установках. Важной принципиальной особенностью таких установок является наличие развитой системы измерений технологических параметров: помимо штатных датчиков на стендовой ЯЭУ устанавливается дополнительный комплект измерительной аппаратуры. Например, на стенде КМ-1 со свинцово-висмутовым теплоносителем была установлена термометрическая решетка, которая включала в себя 129 термопар, равномерно охватывающих выходное сечение активной зоны. Показания данных термопар можно использовать для валидации сопряженных нейтронно-физических и теплогидравлических моделей.

Важно отметить, что в 1970-е годы в НИТИ была разработана технология цифровой регистрации экспериментальных данных. Выполнение этой работы позволило получить уникальные экспериментальные данные в цифровом формате.

В процессе испытаний стендовых установок накапливается большой объем уникальных данных. Однако, как показывает практика, по окончании испытаний конкретной установки эти данные со временем оказываются недоступными для использования, и возникает опасность их утраты.

Учитывая эти обстоятельства, в 2015 году в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» стартовал проект, направленный на сохранение знаний. Задачей этого проекта является создание базы верификационных данных, включающей в себя не только экс-

периментальную информацию, но и детальные данные о конструкции оборудования ЯЭУ, ее технологических параметрах, описание системы экспериментальных измерений. основополагающими принципами, использованными при создании базы данных, являются:

- оценка зарегистрированных данных, их систематизация и сохранение в объеме и формате, достаточном для использования этих данных в «отчужденном» варианте;
- полный цифровой формат данных, включающих в себя конструкторскую и проектную документацию, а также выполненные в процессе испытаний расчетно-аналитические работы.

База верификационных данных ППУ стенда КМ-1 разработана и сдана в эксплуатацию в 2019 году.

В докладе продемонстрированы ее функциональные возможности. Объем информации по оборудованию установки и описанию экспериментов в базе данных позволяет разработать расчетную модель установки КМ-1 без привлечения специалистов, принимавших участие в испытаниях установки и создании базы данных.

База верификационных данных использовалась для валидации расчетного кода КОРСАР/ЖМТ, разработанного в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова».

В докладе продемонстрированы результаты валидации расчетной модели по данным оцененных экспериментов.

Моделирование физических процессов при тяжелых авариях с использованием интегрального кода ЕВКЛИД/V2

Усов Э.В., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Прибатурин Н.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Москва, usovev@ibrae.ac.ru

Ключевые слова: ЕВКЛИД/V2, натрий, свинец, тяжелые аварии

Разрабатываемый в ИБРАЭ РАН в рамках проектного направления «Прорыв» интегральный универсальный код ЕВКЛИД/V2 является эффективным инструментом для моделирования физических процессов при тяжелых авариях.

Использование интегрального кода ЕВКЛИД/V2, состоящего из 15 различных модулей, позволяет рассчитывать процессы тепломассообмена при течении одно- и двухфазных потоков натрия, свинца и воды с учетом кипения натрия и воды (аттестованный теплогидравлический модуль HYDRA-IBRAE/LM) с возможностью перехода к кризису с дальнейшим расплавлением оболочки твэла, плавлением или диссоциацией топлива, движением образовавшегося расплава в а.з. быстрого реактора (тяжелоаварийный модуль SAFR) и его удержанием внутри корпуса реактора (модуль HEFEST-FR) и возможностью возникновения в расплаве топлива вторичной критичности (модуль SECRIТ), а также взаимодействием расплава с бетоном (модуль CORCONIT).

Разрушение а.з. рассчитывается с учетом обратных связей с нейтронной мощностью реактора (аттестованные модули DOLCE VITA, CORNER). Кроме процессов разрушения а.з., модули интегрального кода позволяют определить наработку ПД в топливе, число ПД, вышедших под оболочку твэла (аттестованные модули БЕРКУТ-И и БЕРКУТ-У), а также в теплоноситель вследствие разгерметизации твэла, перенос ПД в контуре, помещениях АЭС (модуль AEROSOL/LM) и их выход в окружающую среду (аттестованный модуль POM).

Большой набор модулей, связанных с помощью обменных структур в единый код, позволяет проводить комплексный анализ безопасности проектируемых и действующих реакторных установок с жидкометаллическим охлаждением, таких как БОР-60, МБИР, БН-600, БН-800, БН-1200М, БРЕСТ-ОД-300, БР-1200. Как отдельные модули, так и в целом интегральный код ЕВКЛИД/V2 валидирован и верифицирован как на большом объеме аналитических тестов, разработанных для проверки отдельных моделей кода, так и на большом объеме экспериментальных данных, в том числе полученных на реакторных установках БОР-60, БН-600 и БН-800.

Валидация кода применительно исследованию отдельных явлений при тяжелых авариях была выполнена как на российских экспериментальных стендах (стенды ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова» по исследованию устойчивости UN топлива в расплаве свинца и стали ЭП823-Ш, стенды АО «ВНИИНМ» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» по изучению диссоциации СНУП топлива, стенды ИТ СО РАН по изучению плавления имитаторов твэлов и др.), так и на зарубежных стендах (стенды Аргоннской национальной лаборатории (США) по для изучения плавления диоксида урана, стенд GEYSER (Франция) по изучению замерзания движущегося расплава, стенд по изучению выхода ПД из расплава диоксида урана в Окриджской национальной лаборатории (США) и др.).

Валидация кода позволяет обосновать корректность заложенных в код ЕВКЛИД/V2 моделей для расчета отдельных физических процессов, наблюдаемых на этапе тяжелой аварии, а также оценить погрешность расчетов с помощью кода отдельных важных для безопасности параметров.

Исследование выполнено в рамках Государственного контракта № Н.4о.241.19.21.1068 от 14.04.2021 на выполнение научно-исследовательских работ «Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования атомных электростанций, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла. Этап 2021–2023 годов» (государственный заказчик – Госкорпорация «Росатом»).

Использование кода КУПОЛ-БР для анализа водородной безопасности установок с жидкометаллическими теплоносителями

Иванова Е.А., Казанцев А.А., Супотницкая О.В., Мосеева Н.А.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
akazancev@ippe.ru*

Ключевые слова: герметичная оболочка (ГО), система локализации течи парогенераторов (СЛТП), ядерная энергетическая установка (ЯЭУ), водородная взрывобезопасность, нормальная эксплуатация (НЭ), нарушение нормальной эксплуатации (ННЭ), проектная авария (ПЭ), запроектная авария (ЗПА), реакторная установка (РУ), код КУПОЛ-БР, БРЕСТ-ОД-300, исследовательская ядерная установка ИЯУ МБИР

Накопленный к настоящему времени опыт в решении проблемы обеспечения водородной взрывобезопасности определяет следующие основные направления оценки состояния водородной взрывозащиты:

- определение источников водорода;
- анализ накопления и распространения водородсодержащих смесей;
- оценка образования взрывоопасных смесей;
- оценка воздействия на оборудование и конструкции;
- методы контроля и управления.

Нормативные положения, устанавливающие правила обеспечения водородной безопасности и определяющие режимы работы атомной станции, которые должны быть рассмотрены при анализе взрывобезопасности, содержатся в следующих нормативных документах: «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15), «Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций» (НП-010-16) и «Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции» (НП-040-02). Для исследовательских установок таким документом является «Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок» (НП-033-11).

Для двух различных реакторных установок БРЕСТ-ОД-300 и МБИР проведен анализ водородной взрывозащиты реакторных установок при различных режимах эксплуатации. Расчетный анализ водородной взрывобезопасности РУ БРЕСТ-ОД-300 и ИЯУ МБИР проведен с использованием аттестованного кода КУПОЛ-БР, предназначенного для расчета параметров среды (давление, температура, концентрации компонентов газовой среды) в помещениях реакторных установок с натриевым и свинцовым теплоносителями. Основой кода КУПОЛ-БР является математическая модель с сосредоточенными параметрами. В качестве исходных данных для проведения расчетного обоснования использованы проектные, конструкционные и теплофизические характеристики оборудования и систем реакторных установок.

Перечень возможных процессов (источников), приводящих к появлению водорода для реакторных установок на быстрых нейтронах приведен в НП-040-02 (Приложение). Имеется перечень источников водорода для нормальных режимов эксплуатации и для аварийных режимов. Расчеты выполнялись в соответствии с этим перечнем.

Для РУ БРЕСТ-ОД-300 представлены результаты расчетного моделирования распространения водорода в помещениях системы локализации течи парогенератора

(СЛТП) при различных режимах эксплуатации. С использованием кода КУПОЛ-БР выполнен расчет изменения во времени параметров среды (давления, температуры, концентрации газовых компонент) в помещениях СЛТП и центрального зала энергоблока в условиях нормальной эксплуатации, нарушении нормальной эксплуатации, проектных и запроектных аварий. Показано, что для всех помещений и рассмотренных режимов эксплуатации выполняется критерий отсутствия условий воспламенения водородовоздушных смесей и образования взрывоопасных водородосодержащих смесей.

Для ИЯУ МБИР представлены результаты расчетного моделирования распространения водорода в различных помещениях, в которых возможно появление водорода. Показано что водородная взрывобезопасность обеспечивается при расчетном моделировании аварии с исходным событием – при отказе системы вентиляции в помещении над бассейном выдержки (БВ), при наличии аварийной выгрузки всей активной зоны в БВ. Расчеты показали, что имеется достаточный запас времени, чтобы оперативный персонал смог восстановить работоспособность системы вентиляции.

Результаты расчетных исследований будут использованы в ПООБ для получения разрешения на эксплуатацию блоков, а также включены в технические проекты новых типов быстрых реакторов.

Мультифизическое моделирование жидкосолевых реакторов

Куприянов К.С., Колобовников И.П., Лучина К.А., Фейнберг О.С., Игнатьев В.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
bdf-1@mail.ru

Ключевые слова: жидкосолевой ядерный реактор, мультифизическое моделирование, методы расчета, расплавы солей фторидов металлов, циркулирующее жидкое топливо

В настоящее время в мире наблюдается растущий интерес к технологиям жидкосолевых реакторов (ЖСР), сообщается о растущем числе новых проектов и мероприятий по внедрению РУ этого типа в ближайшей перспективе, в частности, для замыкания топливного цикла на основе пережигания минорных актиноидов из ОЯТ легководных РУ. Среди последних следует отметить концепцию реактора ЖСР-С, в которой реактор с циркулирующим высокотемпературным топливом, состава Li, Be, An/F, интегрирован с модулем для переработки топливной соли, предложенную в НИЦ «Курчатовский институт» в начале 2000-х годов. В настоящее время в РФ ведутся работы по созданию исследовательского реактора малой мощности РУ ИЖСР (10 МВт) который должен послужить прототипом полномасштабной РУ мощностью 2400 МВт с однородной активной зоной.

ЖСР характеризуется совершенно иным набором характеристик по сравнению с традиционными реакторами с водяным охлаждением. Некоторые особенности технологии ЖСР оказывают положительное влияние, как на свойства безопасности, так и на улучшение экономических показателей, однако, вместе с тем, возникает ряд проблем технического характера и связанных с прогнозированием поведения и обоснованием безопасности этого типа реакторов, которые существенно отличаются от аналогичных для традиционных твердофизических реакторов.

В НИЦ «Курчатовский институт» был разработан расчетный комплекс (ПК) MULTIMSR, предназначенный для решения широкого ряда задач, связанных с анализом поведения ЖСР в стационарном и нестационарном режимах эксплуатации. ПК MULTIMSR является гибким инструментом мультифизического расчета, позволяющим пользователям выбирать количество учитываемых мультифизических взаимосвязей и методы решения теплогидравлической и нейтронно-физической задач. Структура ПК является блочной, и каждое ПС, входящее в состав ПК MULTIMSR, может работать как отдельно, так и совместно с другими модулями в рамках конкретного задания расчета. Данный подход к архитектуре ПК, делает возможным легко расширять его под новые актуальные цели расчета, например, моделирование термохимических процессов в РУ ЖСР, решение задачи прогнозирования скорости коррозии конструкционного материала т.д.

Основными программными блоками ПК MULTIMSR являются:

– Инструмент нейтронно-физических расчёта – SERPENT 2, ПС для прецизионного расчёта переноса нейтронов методом Монте-Карло. ПС используется для расчетов эффективного коэффициента размножения нейтронов, расчетов выгорания и подготовки нейтронно-физических констант для диффузионного приближения.

– Набор мультифизических решателей, написанных с использованием OpenFOAM, (библиотеки с открытым исходным кодом для численного моделирования в области механики сплошных сред с использованием метода конечных объемов) и решающих системы дифференциальных уравнений теплогидравлики и нейтронной физики в диффузионном приближении в трехмерной постановке.

- ПК MSR-NODES моделирующее контуры теплоотвода ЖСР и систему слива топливной соли в дренажные подкритические баки.
- ПК 3H-MSR – для моделирования переноса трития в контурах ЖСР.
- ПК NM-MSR – для моделирования массопереноса и осаждения благородных металлов в реакторном контуре ЖСР.
- База данных физических свойств материалов. На основе оценки широкого набора файлов данных представляющих, последние версии национальных и европейской линеек библиотек был обоснован выбор константной базы для проведения нейтронно-физических расчетов для спектра характерного для ЖСР гомогенного типа без графитового замедлителя в активной зоне на основе LiF-BeF₂ с добавкой трансурановых элементов из отработанного топлива ВВР.

На настоящем этапе ПК MULTIMSR способен решать следующие задачи:

1. Расчет эффективного коэффициента размножения нейтронов и выгорания с автоматической коррекцией состава топливной подпитки, учетом выведения нерастворимых продуктов деления и возврата минорных актинидов из блока переработки.
2. Расчет стационарного состояния ЖСР в диффузионном приближении и методом переброски полей.
3. Расчет переходных процессов в диффузионном приближении и с использованием одномерных подходов и расширенной системы точечной кинетики.
4. Оценка потери эффективной доли запаздывающих нейтронов вследствие движения топлива.
5. Расчет распределения нерастворимых продуктов деления и их осаждения на внутренних поверхностях топливного контура.
6. Расчет распределения газообразных продуктов деления и их выведения за счет системы газовой продувки.

В НИЦ «Курчатовский институт» ПК MULTIMSR активно используется для расчета РУ ИЖСР.

Моделирование трехмерных теплогидравлических процессов в активных зонах реакторов с жидкометаллическим теплоносителем в приближении анизотропного пористого тела

Баясхаланов М.В., Меринов И.Г., Харитонов В.С., Корсун А.С.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва
mvbayaskhalanov@mephi.ru*

Ключевые слова: теплоперенос, натрий, свинец, моделирование, пористое тело, блокировка

Для моделирования теплогидравлических процессов в активных зонах и теплообменном оборудовании быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем в НИЯУ МИФИ был разработан программный модуль, основанный на использовании приближения анизотропного пористого тела.

Основным преимуществом данного программного модуля при сравнении с поканальными кодами является использование строго математически обоснованной модели анизотропного пористого тела, полученной путем осреднения по объему исходных уравнений Навье – Стокса. В отличие от поканальной методики в данной модели осреднение исходных трехмерных уравнений производится без допущения о наличии преимущественного направления течения теплоносителя.

Для замыкания уравнений модели анизотропного пористого тела используется k - ε -модель турбулентности в интегральном виде. Уравнения интегральной модели турбулентности получены так же путем локального осреднения по объему. При помощи интегральной модели турбулентности определяются значения средней по объему осреднения модели пористого тела кинематической турбулентной вязкости, которое затем используется для определения компонент тензоров эффективной теплопроводности и вязкости.

Для программной реализации модуля использовался метод конечных элементов, который способен обеспечить высокую точность вычислений.

Валидация программного модуля проводилась путем сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными и результатами расчетов с помощью кода, использующего подход прямого численного моделирования. При проведении валидационных расчетов были использованы преимущественно задачи, в которых наблюдалась выраженная трехмерная картина течения.

Проводилось сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными в ходе:

- исследования тепломассопереноса в 37-стержневой частично обогреваемой сборке реактора MONJU, охлаждаемой потоком натриевого теплоносителя, при наличии блокировки проходного сечения;
- исследования теплопереноса натриевого теплоносителя в 169-стержневой сборке реактора SNR-300 с частичной блокировкой проходного сечения;
- исследования тепломассопереноса в 19-стержневой сборке со свинцово-висмутовым теплоносителем в Karlsruhe Liquid metal Laboratory;
- исследования тепломассопереноса в ORNL на 19-стержневой сборке с витыми дистанционирующими элементами и натриевым теплоносителем;

Проводились кросс-верификационные расчеты с применением пакета, основанного на подходе прямого численного моделирования:

– стационарного течения свинцового теплоносителя в модельной сборке реактора с косинусоидальным энерговыделением по высоте и частичной блокировкой проходного сечения;

– стационарного течения натриевого теплоносителя в модельной сборке реактора БН с косинусоидальным энерговыделением по высоте и частичной блокировкой проходного сечения.

Выполненные расчеты показали возможность применения разработанного модуля для моделирования сложных задач, в которых наблюдается выраженная трехмерная картина течения теплоносителя.

Численное моделирование течений в раздаточно-коллекторной системе с применением RANS моделей

Дудкин К.О., Марков П.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Москва
k.dudkin5@gmail.com

Ключевые слова: гидродинамика, численное моделирование, Ansys Fluent, CFD, вычислительная гидродинамика, методика расчета, раздаточная коллекторная система, течения в коллекторах

Вычислительные возможности современной компьютерной техники позволяют применять трехмерные нестационарные конечно-элементные CFD-коды для моделирования гидродинамических процессов, протекающих в энергетических установках. В настоящее время в коммерческих и открытых кодах реализован широкий диапазон моделей, позволяющих моделировать в том числе и турбулентные течения. Наиболее точные результаты можно получить с применением схем прямого численного моделирования (DNS – Direct Numeric Simulation), однако применение методов DNS на данный момент возможно только в весьма ограниченном ряде задач, при небольших числах Рейнольдса.

Наиболее часто применяемые методы расчета турбулентных течений базируются на осредненных уравнениях Навье – Стокса (RANS-модели), турбулентная вязкость в которых замыкается с помощью различных соотношений (k - ϵ , k - ω и др. модели). RANS-модели требуют наименьших вычислительных ресурсов, но имеют достаточно много ограничений к применению и требуют настройки для решения конкретных задач. Промежуточным звеном между DNS и RANS моделированием выступают LES методы, разрешающие большую часть колмогоровского спектра, тем не менее, для подготовки LES модели все еще необходимо проведение предварительного моделирования RANS методами.

В данной работе исследовались течения различных жидкостей (воды, свинца, воздуха) в напорной камере осесимметричной раздаточно-коллекторной системы (РКС) энергетической установки с шестью подводными круглыми трубопроводами. В качестве основного исследуемого фактора было принято распределение расходов жидкости по каналам РКС. Моделирование было проведено в программном комплексе Ansys Fluent с помощью стационарной (RANS) и нестационарной (uRANS) моделей с различными замыкающими соотношениями для турбулентной вязкости (k - ϵ -Realizable, k - ω -SST).

Расчеты были проведены для диапазона числа Re от $0,8 \cdot 10^5$ до $4,2 \cdot 10^5$, с граничным условием постоянной скорости жидкости на входе в подводный трубопровод РКС.

По результатам проведенного исследования проведено сравнение результатов численного CFD-моделирования с применением различных моделей между собой и с имеющимися эмпирическими зависимостями. Показано, что k - ω -SST и k - ϵ -модель дают качественно разные картины распределения расходов по каналам РКС как при использовании стационарного, так и для нестационарного решателя. Кроме того, с помощью модели k - ω -SST не удалось получить стабильного стационарного решения ни с

использованием RANS, ни с применением uRANS подхода, ввиду значительных (5 – 15 %) флуктуаций относительного расхода через каналы РКС, связанных с миграцией крупных вихрей по напорной камере РКС. Для модели k - ε -Realizable – миграция вихрей не была зафиксирована, а флуктуации расхода имели менее резкий характер и составляли не более 1 %.

Качественное отличие полученных результатов делает необходимым дальнейшее исследование течений в РКС с применением более точных LES методов. В работе также отражено использование результатов RANS моделирования для постановки задачи LES метода.

Ухудшение естественной циркуляции в контуре с гидрозатвором в результате выделения азота из растворенного состояния в воде в газообразное при нагреве

Сергеев Вл.В., Казанцев А.А.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
akazancev@ippe.ru*

Ключевые слова: система пассивного расхолаживания активной зоны, системный теплогидравлический код, контур циркуляции, предел растворимости газов в воде, естественная конвекция, гидрозатвор, опускной участок, скорость всплытия пузырей, объёмное паро-газосодержание, расход естественной циркуляции, гидравлическое сопротивление двухфазного потока, мощность электронагревателя, код КОРСАР, код TRACE, код RELAP-5

Накопленный к настоящему времени опыт в решении проблемы обеспечения водородной взрывобезопасности определяет следующие основные направления оценки состояния водородной взрывозащиты:

В опубликованной в 2008 г. в журнале «Ядерная энергетика» статье С.Г. Калякина и др. («ГНЦ РФ – ФЭИ») представлены экспериментальные результаты, в которых было замечено явление ухудшения расхода естественной циркуляции (ЕЦ) воды в контуре с гидрозатвором. Гидрозатвор мог располагаться в вертикальном и горизонтальном положении, что позволило обнаружить явление зависимости расхода ЕЦ от положения гидрозатвора. Явление было объяснено падением расхода циркуляции под влиянием увеличения гидравлического сопротивления гидрозатвора в результате выделения растворенного в воде газа (преимущественно азота) в газообразное состояние при нагреве теплоносителя. Исследования проводились в рамках тематики анализа систем пассивного расхолаживания ЯЭУ.

Цель авторов настоящего сообщения – показать, что это явление можно моделировать расчетным методом. Известно, что при переходе от однофазного потока воды к двухфазному, когда появляется объёмное парогазосодержание, коэффициент гидравлического сопротивления возрастает. Рост гидравлического сопротивления приводит к падению расхода ЕЦ и вызывает рост температуры контура при сохранении постоянной мощности электронагревателя. Нагрев воды, в свою очередь, приводит к падению предела растворимости газов, причем избыток газа из воды выделяется в контур, образуются пузырьки на стенках и в потоке. При образовании пузырей в них испаряется водяной пар до состояния насыщения.

Наличие гидрозатвора усиливает рассматриваемое явление, так как при низкой скорости воды в условиях ЕЦ (0,3 м/с) на опускном участке гидрозатвора пузырьки газа всплывают против потока воды. В гидрозатворе появляется «зависающее» выделение газа или образование газовой «пробки» на входе в гидрозатвор. Наличие хаотичного движения пузырей газа в опускной части гидрозатвора было зарегистрировано фотосъемкой через прозрачные стенки участка контура с гидрозатвором.

В статье С.Г. Калякина и др. отмечено, что моделирование с использованием кода RELAP-5 в однофазном приближении не позволило воспроизвести наблюдаемое явление падения расхода естественной циркуляции, что очевидно. В результате в статье сделан следующий важный вывод: «Вопрос нуждается в дополнительной разработке более совершенных кодов, описывающих ЕЦ применительно к системам пассивного расхолаживания аварийной активной зоны реакторов».

В настоящей работе показано, что данное физическое явление в более полной двухфазной постановке, с учетом зависимости растворимости газов от температуры воды, может быть воспроизведено расчетным методом. Для этой цели необходимо использовать общеизвестную двухфазную негомогенную одномерную нестационарную модель двухфазного потока из 6 уравнений гидродинамики. Эта модель реализована во всех сетевых кодах, включая RELAP-5, TRACE, KOPCAR. Дополнительно, модель выделения растворенных в воде неконденсируемых газов (водорода, азота, кислорода, гелия) при разогреве воды реализована в отечественном системном коде KOPCAR (НИТИ, г. Сосновый Бор).

Моделирование температурно-влажностного режима в подызоляционном пространстве трубопроводов второго контура РУ БРЕСТ-ОД-300

Матвеев Е.Л., Недайзов А.В., Тутукин А.В., Черкасова М.С.

*Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежале» (АО «НИКИЭТ»), Москва
cherkasova_ms@nikiet.ru*

Ключевые слова: трубопроводы второго контура, авария с истечением парогазовой смеси, моделирование подызоляционного пространства, РУ БРЕСТ-ОД-300

Несмотря на более чем полувековой успешный опыт разработки и внедрения систем контроля течей оборудования и трубопроводов (СОТ) контуров циркуляции реакторных установок различного назначения, создание эффективных алгоритмов оценки расхода и места течи продолжает оставаться актуальной задачей и в наше время. В первую очередь это относится к классу течей, характеризующихся малыми расходами теплоносителя либо рабочего тела 2-го контура, поскольку обеспечить своевременное обнаружение и, как следствие, принятие адекватных мер по обеспечению безопасности работы АЭС для этого класса течей крайне затруднительно в условиях сложной пространственной компоновки оборудования в контролируемых помещениях энергоблока.

В первую очередь, сложность своевременного обнаружения малой течи в условиях, характерных для контейнментов атомных станций, обусловлена недостаточной чувствительностью отдельных датчиков систем контроля, используемых для контроля физических параметров среды в помещении. В связи с этим, одним из основных направлений повышения чувствительности систем автоматического обнаружения течи оборудования является разработка эффективных алгоритмов обработки сигналов, поступающих в блок управления СОТ по различным информационным каналам измерительной системы, основанных на выявлении и анализе набора корреляций показаний датчиков, работающих со слабыми сигналами, сопоставимыми с погрешностью измерения датчика, что и позволяет, в итоге, выполнять оценку места и расхода течи теплоносителя.

Для создания эффективных алгоритмов обнаружения течей теплоносителя необходимо корректное моделирование термодинамических процессов, происходящих в контролируемых помещениях атомных станций. На современном уровне развития техники для рассматриваемого класса систем контроля течи корректный анализ термодинамических и теплообменных процессов в контролируемых помещениях с использованием только аналитических или только экспериментальных методов с целью получения валидных замыканий систем уравнений, используемых при разработке алгоритма анализа данных, невозможен. Возможности этих подходов были исчерпаны на стадиях создания автоматизированных систем контроля течи предыдущих поколений. Однако современный уровень развития вычислительной техники, а также методов и средств математического моделирования физических процессов позволяет получить необходимые недостающие данные при помощи численного моделирования (или «численного эксперимента»), что позволяет инженерам перейти к созданию СОТ нового поколения.

В работе приведены результаты численного моделирования изменения температурно-влажностного режима воздушной среды в подызоляционном пространстве участков трубопроводов второго контура (системы острый пар и питательная вода) РУ БРЕСТ-ОД-300 при возникновении течи теплоносителя вследствие появления сквозного дефекта трубопровода. Данное исследование выполнено в рамках адаптации

алгоритма обработки сигналов датчиков внедрения системы контроля течей оборудования и трубопроводов второго контура (СОТ-2) применительно к условиям контейнера РУ БРЕСТ-ОД-300.

Численное моделирование выполнено в трехмерной постановке методами вычислительной гидродинамики и термодинамики в программном комплексе ANSYS Fluent с использованием многофазной модели Эйлера. Рабочая среда в подызоляционном пространстве участка трубопровода представляла собой двухкомпонентную парогазовую смесь. Для учета фазового перехода использовалась Lee модель испарения-конденсации. При моделировании предполагали, что рабочая среда в газообразной фазе представляет собой смесь идеального газа и пара. Учет влияния теплоизоляции трубопровода на распространение паровоздушной смеси выполнен в приближении модели пористой среды.

Расчеты выполнены для тридцати вариантов источника течи, различающихся интенсивностью, координатой центра источника, а также типом трубопровода (питательной воды либо острого пара). Рассмотрено пять вариантов мощности источника течи: 114, 456, 513, 798 и 1140 кг/ч, а также три положения относительно поверхности трубопровода: в начале, посередине и в конце участка трубопровода. Температура теплоносителя в трубопроводах острого пара принималась равной 575 °С, в трубопроводах питательной воды – 400 °С.

Результаты моделирования показали, что в случае возникновения течи в подызоляционном пространстве трубопроводов второго контура РУ БРЕСТ-ОД-300 происходит значительное изменение температуры и влажности в течение первых 20 минут относительно своих начальных значений. На рисунке представлены характерные расчетные зависимости изменения влажности среды в подызоляционном пространстве участка трубопровода острого пара при течи с расходом 456 кг/ч (источник течи расположен посередине трубопровода).

Результаты численного моделирования процесса изменения температуры и влажности вблизи места расположения датчика системы обнаружения течи теплоносителя в случае появления дефекта в трубопроводе использованы при разработке алгоритмов по обнаружению в режиме реального времени и определению характерных параметров (величина и местоположение) течи.

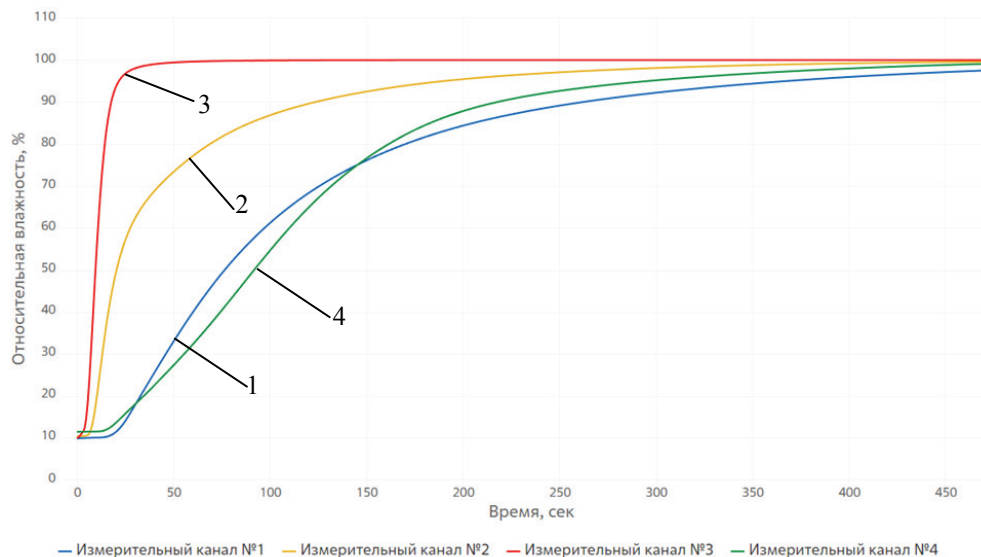


График изменения относительной влажности в измерительных каналах при моделировании течи посередине участка трубопровода острого пара с расходом 456 кг/ч

Поячейковый расчёт по программе MATADOR экспериментов, выполненных в рамках международного бенчмарка на стенде NACIE-UP

Залесов А.С., Чуркин А.Н.

*Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), Подольск
zalesov_as@grpress.podolsk.ru*

Ключевые слова: поканальная (поячейковая) компьютерная программа, теплообмен, теплогидравлический расчёт, гидродинамика, жидкометаллический теплоноситель, быстрый реактор, бенчмарк

В 2022 г. стартовала работа координационного исследовательского проекта (CRP-I31038), организованного под эгидой МАГАТЭ на стенде NACIE-UP (далее – Проект). В Проекте, основанном на ранее выполненной экспериментальной кампании, запланировано проведение расчётных исследований динамических режимов при переходе от принудительной к естественной циркуляции свинцово-висмутowego теплоносителя в контуре.

Полученные результаты экспериментальных данных будут использованы при валидации расчётных кодов, применяемых для обоснования безопасности реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем.

Специалисты АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС» приняли участие в Проекте МАГАТЭ, в том числе по направлению валидации поячейковых кодов. Теплогидравлический анализ проведен по самостоятельно разрабатываемой программе MATADOR, с помощью которой были смоделированы режимы при различном распределении тепловыделений в имитаторе активной зоны «открытой стадии» валидации.

Расчеты проводились с учетом влияния проволочной навивки по интегральной (эффективной) и локальной моделям. Проходное сечение разбивалось на 42 основных канала и 60 каналов связи. По высоте каналы разбивались на 166 слоев. На один полный оборот проволочной навивки приходилось 36 высотных слоев, что соответствовало 10 градусам поворота проволоки вокруг стержней на один слой.

Анализ результатов расчётов стационарных (начальное и конечное состояния) и переходных режимов осуществлялся путём сравнения результатов расчётов по программе MATADOR с экспериментальными данными и результатами расчётов по программе YAOGUANG. Расчётные исследования показали, что программа MATADOR обладает хорошей точностью моделирования процессов в имитаторе активной зоны в ходе переходного режима с равномерным распределением тепловыделений (тест ADP10).

Средние отклонения температур оболочек имитаторов твэлов и теплоносителя в этом режиме по интегральной и локальной моделям по программе MATADOR равнялись 15 % и 7 % соответственно; по программе YAOGUANG – 4 %. В режиме с неоднородным распределением тепловыделений (тест ADP06) средние отклонения температур составили по интегральной модели – 18 %; локальной – 16 %; по программе YAOGUANG – 14 %.

Таким образом, в обоих режимах локальная модель, реализованная в программе MATADOR, позволила корректнее описать общий тренд распределения температур по сравнению с интегральной моделью. В расчётных исследованиях наблюдалось хорошее согласие результатов расчётов по программам MATADOR и YAOGUANG. Срав-

нение экспериментальных данных и результатов расчётов показало значительное увеличение среднего отклонения температур в тесте ADP06 по сравнению с тестом ADP10, что связано с увеличением градиента температур в азимутальном направлении в обогреваемых стержнях.

На следующих этапах Проекта участники должны выполнить расчет режима «слепой стадии» и сравнить результаты расчета с экспериментальными данными, а также провести анализ чувствительности и неопределенности.

Моделирование течения теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок различного типа с помощью системы суперкомпьютерного сквозного моделирования «ЛОГОС-АТОМ»

Данилов Е.А., Соловьев С.С.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), Саров
eadanilov@vniief.ru

Ключевые слова: реакторная установка, тепловыделяющая сборка, жидкометаллический теплоноситель, течение теплоносителя, CFD-моделирование, система суперкомпьютерного сквозного моделирования

В атомной отрасли выполнение расчетного обоснования характеристик проектируемого оборудования имеет большое значение, поскольку процесс создания реакторных установок (далее РУ) является длительным, наукоемким и дорогостоящим. Особое внимание уделено анализу процессов, происходящих в активной зоне реактора и тепловыделяющих сборках (далее ТВС).

Теплогидравлический анализ различных типов ТВС считается одной из ключевых задач при обосновании параметров РУ, включая обоснование безопасности. Численное моделирование течения теплоносителя в ТВС различных типов является также одной из важных задач в атомной отрасли.

Использование CFD-моделирования для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии (далее ОИАЭ) возможно только при наличии аттестационного паспорта Ростехнадзора. С помощью системы суперкомпьютерного сквозного моделирования «ЛОГОС-АТОМ» [1], предназначенной для расчета физических процессов, протекающих при эксплуатации ОИАЭ было проведено моделирование задач валидации и аттестации, а также реализованы специализированные модели, позволяющие моделировать течение в ТВС с жидкометаллическим теплоносителем.

Одним из примеров применения системы «ЛОГОС-АТОМ» является моделирование течения теплоносителя применительно к различным типам ТВС на валидационных и производственных задачах атомной отрасли.

В докладе представлены:

- подходы к моделированию основных явлений и физических процессов, происходящих при течении водяного и жидкометаллического теплоносителя в ТВС;
- результаты численного моделирования валидационных и производственных задач предприятий атомной отрасли;
- дальнейшие планы работ по учету физических процессов при моделировании течения теплоносителя в ТВС РУ различного типа.

Полученные подходы к моделированию течения теплоносителя в различных типах ТВС внедрены и используются на предприятиях атомной отрасли при решении задач обоснования безопасности и сопровождения ОИАЭ.

Литература

1. Логос [Электронный ресурс]. – Программный комплекс Логос. URL: <http://www.vniief.ru/wps/wcm/connect/vniief/logos/>

Расчётно-экспериментальное исследование движения и теплопереноса закрученного потока в каналах сложной геометрии

Соборнов А.Е., Дмитриев С.М.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ),
Нижегород
wisestjedi@mail.ru

Ключевые слова: гидродинамика, связанный теплообмен, численное моделирование, закрученный поток, CFD, интенсификация

Создание современного теплообменного оборудования высокого технологического уровня основывается на использовании расчётно-экспериментального подхода. На ранних этапах проектирования важно оценить эффективность применения того или иного инженерного решения. Применение методов вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics или CFD) позволяет значительно упростить и ускорить выбор оптимального варианта конструкции.

На сегодняшний день существует большое количество численных методов решения задач гидродинамики и теплообмена. Выбор конкретного метода должен основываться на корректном теоретическом представлении о протекающих процессах, а валидность самого метода должна быть подтверждена соответствующими экспериментальными исследованиями.

Основной целью данной работы является моделирование процессов теплопереноса в каналах сложной геометрии с ленточными завихрителями. Расчётно-экспериментальные исследования проводились в лаборатории НГТУ им. Р.Е. Алексеева «Парогенерирующие системы». Экспериментальная часть выполнена на теплофизическом стенде ФТ-80 [1, 2].

Экспериментальная модель представляет собой вертикальный противоточный теплообменник с внутритрубным движением нагреваемой среды. Интенсификация теплообмена внутри канала выполнялась за счёт установки различных ленточных завихрителей: три с постоянным шагом закрутки 40, 60 и 80 мм и три с переменным в различной комбинации данных фрагментов.

Уникальной особенностью эксперимента являлась значительная длина активной части модели – l/d более 220. За счёт поддержания давления теплоносителей первого и второго контура на уровне 10 МПа и 3,8 МПа соответственно, в ходе эксперимента достигались высокие температурные напоры между однофазными средами.

В результате исследований получены временные реализации поля температуры жидкости и теплообменной поверхности в 11 сечениях по высоте экспериментальной модели и определена величина гидравлического сопротивления для каждого интенсификатора.

Расчётные исследования выполнены в программном комплексе Ansys CFX 19.2. Сеточная модель построена на основе блочной структуры в программе Ansys ICEM. Моделирование проводилось с применением двухпараметрической SST [3] модели турбулентности с поправкой на кривизну линий тока и вращение, и модели Рейнольдсовых напряжений Omega Reynolds Stress model.

Проведен сравнительный анализ распределений коэффициента гидравлического трения и теплоотдачи по длине теплообменной поверхности. Дополнительные уравне-

ния переноса напряжений позволили получить более корректные поля скорости и температуры по сечению канала. Средняя величина отклонения расчётно-экспериментальных значений температуры составила менее 10%. Выбранная расчётная методика позволяет значительно упростить оценку эффективности применения методов интенсификации теплоотдачи, связанных с закруткой потока.

Литература

1. Sobornov A.E., Dmitriev S.M., Ryazapov R.R, Mamaev A.V. and Kotin A.V. Experimental efficiency evaluation of the of various geometry twisted bands for heat transfer intensification in the heat-exchange channels of a nuclear power unit equipment // J. Phys.: Conf. Ser. 2088 012046. – 2021.
2. Дмитриев С.М., Соборнов А.Е., Рязанов Р.Р., Котин А.В. Экспериментальное исследование процесса теплопереноса в потоке вязкой жидкости в каналах с ленточными завихрителями различной геометрии // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 2 (99).
3. Дмитриев С.М., Соборнов А.Е., Рязанов Р.Р., Котин А.В., Мацин Н.В. Моделирование движения однофазного закрученного потока в теплообменном канале со встречным движением теплоносителей при штатных параметрах ядерной энергетической установки // Новосибирск: Теплофизика и Аэромеханика. – 2023. – № 5. – Т. 30. – С. 853–862.

Разработка и валидация модели переноса площади межфазной поверхности для кода STEG

Мелихов В.И., Никулин А.С.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), Москва
iskander0215@gmail.com*

Ключевые слова: гидродинамика, двухфазный поток, перенос межфазной поверхности, парогенератор, математическое моделирование

Одним из основных компонентов атомной электростанции с реактором, охлаждаемым водой под давлением, является парогенератор (ПГ), конструкция которого во многом определяет компоновку атомной электростанции, ее стоимость и надежность. Надежное моделирование сложных теплогидравлических процессов, протекающих в объеме ПГ, необходимо для апробирования различных технических решений, направленных на улучшение функционирования ПГ. На кафедре АЭС НИУ «МЭИ» разработан специализированный расчетный код STEG, позволяющий анализировать течение двухфазной пароводяной смеси во втором контуре горизонтального ПГ. Этот код прошел валидацию на экспериментальных данных, полученных как на экспериментальных испытательных установках, так и на натурных ПГ. Тем не менее, несмотря на довольно успешную прогностическую способность кода STEG, работа по совершенствованию его математических моделей продолжается.

В математической модели двухфазного потока кода STEG используются так называемые карты режимов течения двухфазного потока, которые определяют типичные структуры течения в любой локальной области в зависимости от объемного паросодержания и массовой скорости среды (пузырьковый режим, снарядный, дисперсный и т. п.). На их основе выбираются соответствующие корреляции, описывающие механическое и тепловое взаимодействия между фазами, а также каждой фазой с твердыми стенками. Площадь межфазной поверхности, необходимая для расчета интенсивности межфазного взаимодействия, определяется исходя из текущих значений параметров (скоростей фаз, объемных долей, давления, температур и т. д.). Такой подход имеет следующие недостатки: невозможность учитывать динамические изменения режимов течения, эффекты, связанные с входным потоком или формированием потока, искусственные разрывы значений параметров при смене режимов и т. д.

Имеется другой подход к описанию межфазных взаимодействий, основанный на использовании уравнения переноса для площади межфазной поверхности, которое учитывает процессы коалесценции и фрагментации, а также фазовый переход. Это уравнение должно быть добавлено к основной системе уравнений сохранения массы, импульса и энергии фаз. Оно позволяет непосредственно рассчитать площадь межфазной поверхности в любой точке рассматриваемого потока в произвольный момент времени без карты режимов потока и критериальных соотношений, что является его несомненным преимуществом.

Целью данной работы является разработка модели переноса межфазной поверхности, реализация ее в коде STEG и валидация на экспериментальных данных по гидродинамике двухфазных потоков.

При разработке модели основной сложностью является описание процессов коалесценции и фрагментации дисперсных частиц (пузырьков или капель). На основе анализа литературы было выявлено семь различных подходов для моделирования этих процессов, приведенных в работах следующих авторов: Wu et al. (1998), Ishii и Kim

(2001), Hibiki и Ishii (2000), Hibiki и Ishii (2002), Sun et al. (2004), Smith et al. (2012) и Talley et al. (2011). Соответственно были созданы семь моделей переноса площади межфазной поверхности и все они внедрены в код STEG. Для определения наиболее адекватной модели было проведено сравнение результатов расчетов кодом STEG с использованием той или иной модели переноса с экспериментальными данными. Для этой цели было выбрано два экспериментальных исследования переноса концентрации межфазной поверхности в водо-воздушных потоках при атмосферном давлении в вертикальном канале диаметром 50,8 мм и длиной 3,061 м. На трех высотных отметках выполнялись измерения объемного паросодержания, давления, размера пузырей и площади межфазной поверхности. Параметры экспериментов были следующие:

1) Давление на входе 127 кПа, скорость газовой фазы на входе 0,190 м/с, скорость жидкой фазы на входе 0,491 м/с, объемная доля газовой фазы 0,220.

2) Давление на входе 170 кПа, скорость газовой фазы на входе 3,90 м/с, скорость жидкой фазы на входе 5,00 м/с, объемная доля газовой фазы 0,357.

При сравнении результатов моделирования первого эксперимента с экспериментальными данными получили следующее: код STEG почти со все моделями расчета площади межфазной поверхности дает достаточно близкие результаты к эксперименту по распределению давления, объемной доли и диаметра пузырей по длине канала. Исключением стала только модель Wu et al. (1998), так как отклонения по объемной доли составило 9,7%, а по диаметру пузырей 43%. Также стоит отметить, что наиболее близкие результаты к эксперименту дают модели Hibiki-Ishii (2000) и Smith et al. (2012), отклонения от экспериментальных данных составило: по давлению 0,6% и 0,57%, по объемной доли газовой фазы 2% и 2,5%, по диаметру пузырьков 13% и 15%, соответственно.

При анализе результатов моделирования второго эксперимента, можно сделать выводы, что хотя все модели дают адекватное описание перепада давления и распределения объемной доли воздуха, но если принять во внимание распределения диаметра пузырьков по длине канала и изменение площади межфазной поверхности, то наиболее близкими к экспериментальным данным являются модели Smith et al. (2012) и Talley et al. (2011). Отклонения от экспериментальных данных для данных моделей составило: по давлению 1,7% и 1,8%, по объемной доли газовой фазы 8,7% и 8,8% , по диаметру пузырьков 30% и 31%, соответственно. Как видно модель Hibiki-Ishii (2000), хорошо показавшая себя в случае низкой скорости течения фаз, при достаточно высоких скоростях завышает значение диаметров пузырей, однако дает один из наиболее близких результатов по распределению объемной доли.

Результаты тестирования продемонстрировали, что в целом наилучшие результаты дает подход, предложенный Smith et al. (2012). Тем не менее, следует отметить, что результаты тестирования также показали отсутствие универсальной модели. Для обеспечения наиболее широкого спектра параметров, в которых код STEG будет способен получать адекватные качественные и количественные результаты дальнейшая работа по внедрению модели площади межфазной будет продолжаться на основе следующих моделей: Smith et al. (2012), Talley et al. (2011) и Hibiki-Ishii (2000).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00793, <https://rscf.ru/project/22-19-00793/>.

Кросс-верификационные расчёты теплогидравлических характеристик активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого реактора

**Диденко Д.В.¹, Балувев Д.Е.¹, Никаноров О.Л.¹, Рогожкин С.А.¹,
Лубина А.С.², Седов А.А.², Фролов А.А.²**

¹ Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), Нижний Новгород;

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
didenko@okbm.nnov.ru

Ключевые слова: высокотемпературный газоохлаждаемый реактор, гелий, активная зона, вычислительная аэрогидродинамика, графит, кросс-верификация, FlowVision, ANSYS

В настоящее время в Российской Федерации разрабатывается реакторная установка с модульным высокотемпературным газоохлаждаемым реактором (РУ ВТГР), являющаяся составной частью атомной энерготехнологической станции (АЭС) с химико-технологической частью, предназначенной для крупномасштабного производства водорода. В качестве теплоносителя в разрабатываемом реакторе применяется химически инертный по отношению к конструкционным материалам и другим средам газ – гелий.

Одним из основных элементов ВТГР является активная зона с окружающей её графитовой кладкой, через которую циркулирует гелий. Активная зона состоит из графитовых гексагональных призматических тепловыделяющих сборок (ТВС), набранных в вертикальные колонны, включая графитовые блоки верхнего и нижнего отражателей, а также блоки верхнего ограничительного устройства. В ТВС и графитовых блоках отражателя выполнены сквозные каналы для прохода теплоносителя. Внутри ТВС размещаются цилиндрические тепловыделяющие элементы, в которых реализуются объёмные энерговыделения с учётом коэффициентов неравномерности по высоте и радиусу активной зоны. Между тепловыделяющими элементами и графитом блока имеются кольцевые газовые зазоры.

Обоснование конструкции и теплогидравлических характеристик активной зоны и её компонентов является одной из ключевых задач при разработке ВТГР. Сложность конструкции и процессов, происходящих в активной зоне, требует разработки методического подхода, позволяющего с помощью обоснованных упрощений и с приемлемой точностью выполнять расчётные исследования теплогидравлических характеристик активной зоны и её компонентов.

Современные программы для электронно-вычислительных машин (ЭВМ) имеют различные особенности (численные методы решения, модели турбулентности, модели излучения и др.) и различные уровни внедрения в расчётную практику. Для повышения представительности расчётного обоснования выполняются кросс-верификационные расчётные исследования теплогидравлических характеристик активной зоны и её компонентов по четырём современным программам для ЭВМ: FlowVision, ANSYS CFX, ANSYS Fluent и ANSYS Mechanical APDL. Перечисленные программы для ЭВМ обеспечивают моделирование течения газового теплоносителя при вынужденной конвекции, а также сопряженного теплообмена и переноса тепла излучением. Российский программный комплекс вычислительной аэрогидродинамики FlowVision аттестован для моделирования теплогидравлических процессов, происходящих в элементах РУ ВТГР.

Кросс-верификационные расчёты выполняются, в том числе с целью импортозамещения зарубежных программ для ЭВМ.

В результате проведения кросс-верификационных теплогидравлических расчётов колонны ТВС активной зоны ВТГР определены температуры компонентов активной зоны и подогрев теплоносителя, а также распределение расходов и перепад давления теплоносителя по высоте колонны и далее, выполнено сравнение получившихся результатов расчётов по разным программам для ЭВМ. Расчёты выполнены для стационарного режима, параметры которого соответствуют параметрам для усреднённой колонны ТВС в режиме нормальной эксплуатации при работе реактора на 100 % уровне мощности.

Сопоставление результатов расчётов, полученных с помощью различных программ для ЭВМ, показало удовлетворительное качественное и количественное совпадение основных контрольных параметров. Максимальные отклонения расчётных параметров от аттестованной программы для ЭВМ FlowVision составили: для перепада давления на активной зоне не более 16 %, для максимальной скорости теплоносителя не более 15 %, для максимальных температур твердых тел (топливо, графит) не более 8 %, для средней температуры гелия на выходе из активной зоны и подогрева гелия в активной зоне не более 5 %.

Полученные результаты расчётных исследований планируется использовать при дальнейшей разработке и обосновании проекта атомной энерготехнологической станции с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором для производства водорода.

Система замыкающих соотношений для расчета теплогидравлики реакторных установок с ЖМТ

Мицкевич А.В.¹, Попов А.О.¹, Волкова С.Н.¹, Грицай А.С.^{1, 2}

¹ *Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова» (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»), Сосновый Бор;*

² *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Сосновый Бор
email: iotachaos1@gmail.com*

Ключевые слова: замыкающие соотношения, жидкометаллический теплоноситель, расчетный код, ядерные энергетические установки, расчетный код КОРСАР/ЖМТ

В настоящее время, в связи с актуализацией создания ядерных энергетических установок (ЯЭУ) малой мощности с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ), для обоснования их безопасности требуется разработка соответствующих системных расчетных кодов (РК).

Неотъемлемой частью теплогидравлических моделей этих кодов является система замыкающих соотношений (ЗС), от проработанности и обоснованности которой во многом зависит адекватность получаемых с помощью РК результатов расчета переходных и аварийных режимов. С учетом этого практический интерес представляет задача выбора наиболее достоверных ЗС для последующего их использования в РК.

Для реакторных установок (РУ) с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) особое внимание уделяется адекватному численному моделированию теплогидравлических процессов при возникновении межконтурной течи с попаданием рабочей среды из второго контура в контур с жидкометаллическим теплоносителем.

В докладе представлен анализ зависимостей для коэффициентов трения и теплообмена на стенке, полученных разными авторами в период, начиная с 60-х годов прошлого столетия. В том числе большой объем зависимостей по теплообмену со стенкой разработан специалистами ФЭИ.

Также рассматривается вопрос о замыкающих соотношениях для двухфазной области в системе газ – ТЖМТ. С целью выбора замыкающих соотношений по межфазному трению выполнен анализ опубликованных в мировой научной литературе данных. По результатам анализа предложена модификация ряда соотношений и произведена верификация данных зависимостей по итогам доступных экспериментов.

Данная работа выполнена в рамках разработки расчетного кода КОРСАР/ЖМТ и его модификаций для возможности моделирования ЯЭУ с различными жидкометаллическими теплоносителями.

База экспериментальных данных ППУ стендовой установки КМ-1 в обеспечение валидации расчетных кодов

Бенедиктов Д.В., Вакарин А.В., Волкова С.Н., Мигров Ю.А., Ярушина А.В.

*Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова»
(ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»), г. Сосновый Бор, email: captashka@gmail.com*

Ключевые слова: расчетный код, КОРСАР/ЖМТ, жидкометаллический теплоноситель, расчетные методики, верификация, валидация

Одной из приоритетных задач Госкорпорации «Росатом», решаемых в ближайшее время, является создание ЯЭУ с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ). Применение новых конструкторских и технических решений уже на этапе технического проектирования требует расчетного обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации ЯЭУ и аварийных режимов, включая течи оборудования первого и второго контуров и межконтурные течи, что, соответственно, влечет за собой разработку соответствующих программных средств.

Для выполнения данной задачи в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» разработана и верифицирована специализированная версия расчетного кода (РК) КОРСАР/ЖМТ, обеспечивающая моделирование динамики РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ) при анализах их безопасности. Разработка РК КОРСАР/ЖМТ осуществлялась на основе первой базовой версии системного теплогидравлического кода улучшенной оценки КОРСАР/V1.1 с водяным теплоносителем.

РК КОРСАР/ЖМТ содержит все возможности базовой версии КОРСАР/V1.1 и дополнен моделью поведения неконденсирующихся газов в теплоносителе (H_2 , He, N_2 , O_2), возможностью установления гидравлических связей произвольных ячеек друг с другом, что позволяет моделировать пространственные эффекты в больших объемах, а также возможностью одновременного расчета нескольких контуров с различными теплоносителями, связанных между собой через теплопроводящие конструкции.

При разработке РК КОРСАР/ЖМТ особое внимание уделялось адекватному моделированию межконтурных течей с учетом попадания парогазовой среды в контур сплава, их транспорта и накопления в объемах циркуляционного контура.

В обеспечение решения этой задачи выполнена модификация численной схемы двухжидкостной модели РК КОРСАР для учета взаимодействия ЖМТ, в общем случае, с парогазовой средой. В докладе представлено краткое описание методик расчета контурной теплогидравлики в двухжидкостном приближении (жидкая фаза – свинцово-висмутовая эвтектика, газовая фаза – парогазовая смесь) и системы замыкающих соотношений теплогидравлической модели, которая основывается на картах режимов течения и теплообмена. В общем случае рассматривается двухфазная область течения, в которой могут реализовываться режимы течения от однофазной жидкости до однофазного газа, например, с потерей уровня ЖМТ в расчетной ячейке. Более подробно система замыкающих соотношений для ЖМТ представлена в отдельном докладе.

Применяемые для обоснования безопасности объектов ядерной энергетики расчетные коды проходят процедуру верификации и валидации по результатам экспериментов на локальных и интегральных стендах для последующей аттестации программы для ЭВМ в Экспертном Совете при НТЦ ЯРБ Ростехнадзора и получения лицензии на ее применение в заявленной области. Для валидации РК КОРСАР/ЖМТ использовались следующие локальные и интегральные стенды: HELIOS (Южная Корея), TALL

(Швеция), THEADES (Германия), NACIE (Италия), LIFUS5 (Италия), стенды ИТ СО РАН, НПО ЦКТИ (СССР). Для каждого экспериментального режима выполнялся анализ неопределенностей и оценка погрешностей результатов расчета на основе известной методики GRS. В докладе представлены примеры валидации кода по результатам локальных и интегральных экспериментов.

Для валидации РК КОРСАР/ЖМТ также привлекались экспериментальные данные, полученные при испытаниях в 70–80-е годы стенда КМ-1 с ядерной установкой и свинцово-висмутовой эвтектикой в качестве теплоносителя. В докладе представлены разработанные интегральная расчетная модель динамики ППУ стенда КМ-1 и потвэльная расчетная модель выделенной ТВС. Показано сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

Валидация программного комплекса КОРСАР/ГП на основе результатов эксперимента по параметрическому исследованию естественной циркуляции с нарушением отвода тепла через один из парогенераторов

Крыжановская Т.И., Латкин Д.Ю., Петкевич И.Г.

*Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), Подольск
tanya.kryzhanovskaja@yandex.ru*

Ключевые слова: естественная циркуляция, ПСБ-ВВЭР, КОРСАР/ГП, нодализационная схема, температурная стратификация, тепловые потери, прекращение теплоотвода

В 2023 году на стенде ПСБ-ВВЭР (АО «ЭНИЦ») был успешно выполнен эксперимент «Несимметричная естественная циркуляция». Стенд ПСБ-ВВЭР – это интегральный стенд, содержащий все основные элементы оборудования реакторной установки в масштабе 1:300.

Целью эксперимента является параметрическое исследование расходов естественной циркуляции в первом контуре при разной отводимой мощности через один парогенератор вплоть до прекращения отвода тепла через данный парогенератор.

В исходном состоянии в первом контуре реализован режим естественной циркуляции. В начале эксперимента один из парогенераторов отсекался от остальных по пару. После отсечения давление в соответствующем парогенераторе устанавливалось равным в трех других за счет регулирования положений клапанов. После установления стационарного состояния давление в отсеченном парогенераторе поэтапно увеличивалось путем ограничения сброса пара вплоть до прекращения сброса пара. Перераспределение тепловой нагрузки вело к уменьшению расхода теплоносителя через соответствующую петлю и увеличению расхода в остальных петлях. В ходе эксперимента была зафиксирована температурная стратификация теплоносителя на горизонтальном участке холодной нитки петли (примыкающей к реактору) с отсеченным парогенератором.

Претестовые и посттестовые расчеты эксперимента выполнялись в программном комплексе КОРСАР/ГП. Была подтверждена корректность моделирования переходных процессов, вызванных постепенным изменением условий отвода пара от одного из парогенераторов. Получено хорошее согласование относительно распределения температур первого и второго контуров в условиях несимметричной циркуляции. Была разработана нодализационная схема, учитывающая температурную стратификацию теплоносителя по сечению петли. Выполнен анализ чувствительности результатов расчета к тепловым потерям.

Выполненный эксперимент представляет интерес с точки зрения расширения экспериментальной базы данных в области явлений, связанных с однофазной несимметричной естественной циркуляцией. Валидация программного комплекса и разработанная модель температурной стратификации имеют практическое значение и в будущем могут быть использованы при обосновании безопасности РУ ВВЭР.

Применение Виртуальной АЭС для анализа разрыва теплообменных трубок парогенераторов

Ивков М.И., Ахмедов Э.Г., Анищенко А.М., Гаврилов М.В., Третьяков Е.А., Образцов Е.П.

Санкт-Петербургский филиал Акционерного общества «Атомэнергопроект» —
«Санкт-Петербургский проектный институт» (СПбАЭП), Санкт-Петербург
ivkov.misha@mail.ru

Ключевые слова: гидродинамика, расчет течей, КОРСАР/ГП, ПТК ВЭБ, виртуальная АЭС, функции безопасности, обоснование безопасности, комплексный расчет, SimInTech, течь парогенератора, моделирование АЭС

При переходных режимах на АЭС, связанных с уменьшением мощности, в основном оборудовании реакторной установки (РУ) наблюдаются следующие процессы: уменьшение физического уровня воды в парогенераторе (ПГ) за счет схлопывания паровой подушки парогенератора, и снижение уровня в компенсаторе давления (КД) в следствие уменьшения средней температуры теплоносителя в первом контуре. Для восстановления физического уровня в ПГ значительно увеличивается расход питательной воды, несовершенство работы регулятора уровня в ПГ приводит к краткосрочному превышению физического уровня в ПГ. После стабилизации отвода пара от второго контура и стабилизации подпитки первого контура значения уровня в ПГ и КД возвращаются к номинальным для данного режима значениям.

Если переходный режим связан со значительным изменением уровня мощности, включая полный останов реактора (при срабатывании аварийной защиты) со 100 % номинальной мощности, то наблюдается краткосрочное увеличение уровня в ПГ и снижение уровня в КД, вплоть до превышения пределов условий безопасной эксплуатации (УБЭ). Одновременное снижение уровня в КД и повышение уровня в ПГ с превышением пределов УБЭ может привести к ложному запуску алгоритма функции безопасности (ФБ) CD13 «течь из первого контура во второй». При срабатывании по алгоритму ФБ CD13 происходит вывод из контура расхолаживания аварийного ПГ и инициация ФБ CD15 на запуск аварийного ввода раствора борной кислоты с концентрацией 40 г/кг, что приводит к избыточному борированию теплоносителя первого контура.

Принимая во внимание наличие переходного режима РУ и его длительности, в рамках работы по исследованию ложного срабатывания аварийной защиты (АЗ) на Ленинградской АЭС-2 было выдвинуто предложение по исключению срабатывания запуска алгоритма ФБ CD13 «течь из первого контура во второй» путем реализации временной задержки на активацию по сигналу о повышении уровня в парогенераторе на 0,25 м.

Для обоснования данного предложения необходимо доказать отсутствие влияния введенной временной задержки на выполнение основных функций алгоритма. Для этого необходимо выполнить расчет режима с разрывом теплообменных трубок ПГ, по итогу которого возможно принятие решения о модернизации алгоритма функции безопасности CD13.

Для оценки влияния модернизации алгоритма на радиационные последствия рассматривается наиболее консервативный с данной точки зрения вариант сценария исходных событий. В данном варианте на начальном этапе протекания аварии осуществляется компенсация изменения уровня в ПГ и КД системами нормальной эксплуатации (отказ системы аварийного ввода раствора борной кислоты), что ведет к значительному выходу активности из первого контура во второй.

На первом этапе расчета определяется «критический» диаметр течи из первого контура во второй, который будет являться «пределом компенсации» систем нормальной эксплуатации.

На втором этапе расчета выполняется расчет выхода активности при данном диаметре с учетом рассматриваемых задержек на активацию алгоритма. Расчет выхода активности выполняется до момента повышения уровня в ПГ на 0,25 м от номинального уровня с учетом предлагаемой временной задержки, но не более, чем в течение 1800 с (ожидаемое время реагирования оператора), в зависимости от того, что наступит раньше.

Расчетное обоснование осуществляется с использованием комплексной модели «Виртуальный энергоблок» (ВЭБ) ЛАЭС-2, которая разработана на базе программного средства «Виртуальная АЭС» в среде разработки программного комплекса Simulation In Technic (ПК SimInTech).

В рамках первого этапа было проведено обоснование выбора места течи ПГ. Для этого были проведены расчеты двух вариантов разрыва одной трубки ПГ: вблизи холодного коллектора и вблизи горячего коллектора. Анализ результатов показал, что для получения консервативных результатов решения поставленной задачи течь теплообменной трубки ПГ следует рассматривать вблизи холодного коллектора в верхнем ряду трубного пучка.

Кроме того, было определено, что течь из первого контура во второй при разрыве одной теплообменной трубки парогенератора является «пределом компенсации» систем нормальной эксплуатации и отвечает консервативному подходу.

В рамках второго этапа был проведен вариантный расчет для разных временных задержек на активацию ФБ CD13, по результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

- значение временной задержки практически не влияет на расход теплоносителя первого контура;
- время закрытия БЗОК для всех временных задержек составляет более часа, что приводит к выбросу большого объема пара с радиоактивными изотопами на турбину.

По результатам анализа можно заключить, что, так как временная задержка на активацию алгоритма ФБ CD13 по сигналу о повышении уровня в ПГ на 0,25 м не влияет на выполнение алгоритмом основной функции, то на дальнейших этапах модернизации можно использовать любую задержку в диапазоне от 0 до 75 секунд.

Математическая модель температурного расчета твэлов с оксидным и нитридным топливом в задачах оценки выхода продуктов деления

Филимонов Е.В., Дмитриев Д.В., Жилкин А.С.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
dvdmitriev@ippe.ru*

Ключевые слова: реакторная установка, температурный расчет, оксидное топливо, МОКС-топливо, СНУП-топливо, реактор на быстрых нейтронах, выход продуктов деления, натриевый теплоноситель

Определение температуры и градиента температуры в объеме топливного сердечника твэла является необходимым этапом в решении задачи оценки выхода продуктов деления из топлива.

Возможные механизмы выхода продуктов деления (ПД) из топлива в различной степени определяются значениями температуры и градиента, в зависимости от типа топлива (оксидное или нитридное).

В наибольшей степени влияние температурных характеристик топлива имеет место для механизмов термической диффузии и миграции газовых пузырьков [1], поскольку их скорость непосредственно определяется значениями температуры и градиента. Другие механизмы выхода, такие как прямой вылет при делении и каскадное выбивание непосредственно не зависят от температуры, однако соответствующий суммарный выход ПД из топлива пропорционален площади его открытой поверхности, которая может изменяться в процессе облучения при достаточно высоких температурах. Изменение геометрических характеристик топливного сердечника характерно для оксидного топлива (урановое и МОКС-топливо) в котором достаточно быстро происходит изменение структуры (плотности) топлива [1, 2] в зависимости от температуры в объеме топлива. В результате изменяется геометрическая форма и характеристики топливного столба (площади), с образованием центрального канала, имеющего криволинейную поверхность.

Вычисление температурных характеристик в твэле можно разделить на два этапа:

- 1) расчет теплопередачи от теплоносителя к внешней поверхности топлива;
- 2) расчет распределения по высоте и радиусу внутри топливного столба.

В докладе представлена математическая модель и методика температурного расчета в объеме топлива применительно к твэлам реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем с различными типами топлива, такими как урановое оксидное, МОКС-топливо и смешанное нитридное (СНУП-топливо), реализуемая в соответствующем модуле программы Альфа-М-С15 [3, 4] в ходе ее модернизации.

Расчеты проводятся в цилиндрических координатах с применением численных итерационных алгоритмов пошаговой аппроксимации. Используемая расчетная сетка позволяет с достаточной точностью аппроксимировать геометрические характеристики топлива после облучения, а также средние температуры и градиенты в расчетных объемах топлива.

В расчетной модели принимаются во внимание следующие факторы и допущения:

– уменьшение зазора в процессе облучения в результате растрескивания топлива (для оксидного топлива);

- отсутствие существенного влияния распухания топлива на результаты температурного расчета (для всех типов топлива);
- изменение структуры топлива при облучении с образованием радиальных зон в сечениях твэла (для оксидного топлива);
- возможное наличие (отсутствие) центрального топливного отверстия (для всех типов топлива);
- учет зависимости теплопроводности топлива от температуры и плотности (для всех типов топлива);
- распределение энерговыделения по высоте топливного столба (для всех типов топлива).

Представлены результаты расчетов распределения температур и градиента в твэлах с урановым оксидным, МОКС- и ШУП-топливом для реакторов типа БН. Приведены также оценки изменения геометрических характеристик топливного столба в результате облучения.

Литература

1. Olander D. Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements. Department of nuclear engineering university of California. – Berkley, 1976.
2. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов. – М. Энергоатомиздат, 1986.
3. Свидетельство о регистрации программы Альфа-М-С15, № 2019612945 от 28 декабря 2018 г.
4. Жилкин А.С., Дмитриев Д.В., Филимонов Е.В., Уляхин С.М. Программа Альфа-М для расчета выхода продуктов деления и ее современное состояние // Отраслевая научно-техническая конференция «Развитие технологии реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем – БН-2023» – Нижний Новгород, АО «ОКБМ Африкантов», 2023.

Моделирование аварийной ситуации на энергоблоке с реактором ВВЭР-1200 вследствие функционального отказа основного регулятора уровня в деаэраторе

Фомин А.В., Сокуренок Е.Д., Горностаев Д.А., Логинов П.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
Fomin_AV@nrcki.ru

Ключевые слова: математическое моделирование, переходные режимы, нодализация, автоматизированная система управления технологическим процессом, система безопасности, архивные данные СВБУ, сравнительный анализ

Математическое моделирование является наиболее универсальным и актуальным средством для комплексного анализа технологических процессов, происходящих на АЭС. В данной работе авторами используется программный комплекс ПРИМ-АЭС, интегрирующий модули нейтронно-физического и теплогидравлического расчета процессов в переходных режимах на энергоблоках с реакторами ВВЭР. Кроме этого, программный комплекс включает среду динамического моделирования для реализации сложных алгоритмов систем автоматического управления на базе САПР SimInTech. Таким образом, этот набор инструментов позволяет проводить как оценку критериев динамической устойчивости переходных режимов нормальной эксплуатации, так и анализ протекания аварийных ситуаций, в которые может перейти установка, в случае отказа того или иного оборудования энергоблока.

В рамках данного доклада авторами представляется к рассмотрению результаты расчетного анализа аварийной ситуации, возникшей вследствие функционального отказа основного регулятора уровня в деаэраторе питательной воды.

Расчетная математическая модель энергоблока собрана с помощью интегрированного в программный комплекс графического редактора для формирования нодализационных теплогидравлических и нейтронно-физических схем и включает в себя реактор и основное оборудование первого и второго контуров циркуляции теплоносителя. Исходные данные для построения нодализации теплогидравлической модели приняты в соответствии с аксонометрическими схемами систем энергоблока. Модель автоматизированной системы управления технологическими процессами разработана на основе GET проекта систем нормальной эксплуатации и СКУ СБ LEFU 1-3.

Следует отметить, что выбранная к рассмотрению аварийная ситуация является высоко-релевантной для моделирования, вследствие большого объема задействованного в ней оборудования, широкого диапазона изменения технологических параметров, и значительного объема активных (в части срабатывания уставок) вычислений алгоритмов нормальной эксплуатации и систем безопасности. При этом сценарий проведения расчетного моделирования максимально приближен к реальному с точки зрения действий оперативного персонала.

В результате проведения расчетов выполнен сравнительный анализ полученных результатов с архивными данными СВБУ, который показал, что реализованная модель в высокой степени точности воспроизводит поведение реального энергоблока в данном аварийном режиме, как с точки зрения значений технологических параметров, так и с точки зрения работы основного оборудования АСУ ТП в части алгоритмов регулирования, технологических защит и блокировок, и работы систем безопасности.

Моделирование аварийного процесса LB LOCA при гильотинном разрыве холодного участка главного циркуляционного трубопровода РУ ВВЭР-СКД с помощью кода RELAP5

Суджян А.М., Седов А.А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
Sudzhyan_AM@nrcki.ru*

Ключевые слова: расчетный анализ, аварийный процесс, потеря теплоносителя, реактор, ВВЭР-СКД, LB LOCA, гильотинный разрыв, RELAP5, система аварийного охлаждения, сценарий, давление, массовый расход, температура

В работе представлены результаты расчетного анализа динамики аварийного процесса LB LOCA при гильотинном разрыве холодного участка главного циркуляционного трубопровода РУ ВВЭР-СКД. В качестве расчетного инструмента использовался системный код RELAP5/MOD3.3, широко применяемый для анализа переходных и аварийных процессов в реакторах с легководным теплоносителем.

Проблема аварии с гильотинным разрывом трубопровода РУ ВВЭР-СКД заключается в том, что за счет внушительной разницы давлений внутри и снаружи трубопровода, истечение теплоносителя происходит за достаточно короткое время, что может привести к резкому росту температур топлива и оболочек ТВЭЛов. Возникает необходимость разработки систем аварийного охлаждения активной зоны, позволяющих производить достаточно эффективное охлаждение реактора на всех этапах аварийного процесса и обеспечить надежный теплоотвод в асимптотическом состоянии реактора после падения давления. Таким образом, целью данного исследования являлась расчетная оценка выбранной схемы аварийного охлаждения РУ ВВЭР-СКД при гильотинном разрыве холодного участка главного циркуляционного трубопровода.

Для решения поставленной задачи, с использованием возможностей RELAP5/MOD3.3, разработана расчетная модель РУ ВВЭР-СКД. Данная модель включила в себя две петли первого контура и часть второго контура, представленного тепловыми структурами двух парогенераторов. В модель включены элементы системы аварийного охлаждения реактора, которая представлена тремя емкостями САОЗ, емкостью, имитирующей контайнмент, в который истекает пар из сечений разрыва, теплообменником, для имитации конденсации пара на стенках контайнмента, емкостью, имитирующей бассейн выдержки, насосом аварийной подпитки реактора, а также трубопроводом, по которому вода подается из бассейна выдержки в кольцевое пространство над БЗВ.

Определен сценарий, согласно которому вслед за гильотинным разрывом происходило снижение мощности реактора в результате сброса стержней АЗ, поэтапное срабатывание САОЗ и включение насоса аварийной подпитки реактора. Срабатывание емкостей САОЗ и насоса аварийной подпитки осуществлялось в зависимости от величины давления в кольцевом пространстве над БЗВ.

Расчет был выполнен без учета нейтронно-физических обратных связей, однако, с учетом остаточного энерговыделения в реакторе после сброса стержней АЗ.

В результате моделирования аварийного процесса, было отмечено, что массовый расход теплоносителя через сечения ГЦТ достигал максимальных значений порядка 4,5 т/с, а по прошествии 10 секунд с момента разрыва наблюдались его осцилляции вокруг значения 200 кг/с.

Максимальная температура топлива на временном промежутке между моментом разрыва и включением первых двух емкостей САОЗ составила 1572 °С, а максимальная температура оболочки твэл – 1096 °С.

Предложенный вариант системы аварийного охлаждения и соответствующего сценария, по которому происходило ее срабатывание, позволил достаточно быстро снизить температуры топлива и оболочки твэлов, а также перевести систему в асимптотическую фазу надежного охлаждения активной зоны, при которой температуры в ней поддерживаются на уровне 100 – 120 °С, а давления не выходят за диапазон 0,25 – 0,55 МПа.

Оценка влияния повторного залива активной зоны и включения спринклерной системы при тяжёлой аварии на РУ ВВЭР-1000 на водородную взрывобезопасность под гермооболочкой

Ахмедов И.С., Киселев А.Е.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Москва
akhmedov_ilver@ibrae.ac.ru*

Ключевые слова: ВВЭР, спринклерная система, герметичная оболочка, повторный залив, водород, СОКРАТ

Залив водой осушенной активной зоны является основной мерой по управлению тяжёлыми авариями с потерей теплоносителя и ослаблению их последствий на АС с РУ с водой под давлением. Повторный залив разогретой активной зоны может иметь негативные последствия для взрывобезопасности АС из-за интенсивной генерации водорода, сопровождающей пароциркониевую реакцию окисления перегретых оболочек твэлов. Поскольку на этой стадии аварии герметичная оболочка (ГО) остается единственным барьером безопасности на пути распространения радиоактивных веществ (РВ) в окружающую среду, для обоснования эффективности меры по повторному заливу активной зоны необходимо исключить возможность взрыва водорода под ГО.

Кроме меры по повторному заливу, при ТА также применяется мера по ограничению выхода РВ в окружающую среду. Как правило, для этого применяется спринклерная система. Ее функционирование направлено на снижение давления и температуры и связывание радиоактивного йода, содержащегося в паре и воздухе помещений ГО. Неблагоприятным эффектом применения такой меры при тяжёлых авариях является повышение концентрации водорода в помещениях ГО за счет снижения концентрации водяного пара. Из этого следует, что работа спринклерной системы может приводить к риску формирования условий для возможного медленного горения водорода в ряде помещений ГО, а также перехода к горению с ускорением пламени и даже детонации, способных вызывать разрушение ГО.

Для расчетного исследования влияния повторного залива активной зоны и включения спринклерной системы на водородную взрывобезопасность выполнены расчёты сценария без учёта и с учётом мер по управлению аварией. В качестве базового выбран сценарий аварии с гильотинным разрывом соединительного трубопровода КД (двусторонняя течь Ду346), в котором постулируется полное обесточивание энергоблока (включая отказ дизель-генераторов (ДГ)). Полное обесточивание приводит к недоступности всех активных систем безопасности, таких как системы аварийного охлаждения высокого и низкого давления, система подачи питательной воды в ПГ и спринклерная система. В качестве расчетного инструмента использовались аттестованные Ростехнадзором программы для ЭВМ СОКРАТ В1/В2 и СОКРАТ/В3 (далее «ПрЭВМ СОКРАТ»).

Дополнительно рассмотрены сценарии, в котором для обеспечения повторного залива предполагается подача воды в НКР с расходом 120 кг/с, эквивалентным производительности одного канала САОЗ НД. Расчетный анализ состоит в варьировании максимальной температуры оболочек твэлов, при достижении которой инициируется подача воды. Нижняя граница диапазона, равная 1250 К, соответствует температуре начала интенсификации пароциркониевой реакции, а верхняя граница 2250 К – температуре плавления металлического циркония, обогащенного кислородом. В рамках прове-

дения серий вариантных расчетов предполагается возможность питания спринклерной системы от ДГ и рассматриваются следующие варианты ее функционирования: А) недоступна; Б) доступна одновременно с подачей воды в НКР; В) автоматически запускается при достижении уставки.

Результаты серии расчетов с отказом спринклерной системы (серия А) демонстрируют, что в помещениях ГО содержится большое количество водяного пара, который обеспечивает инертизацию атмосферы в основном объеме ГО. Результаты расчетов серии А можно разделить на три основные группы. К первой группе относятся сценарии, в которых подача воды инициируется при температурах оболочек твэлов до 1500 К (проектная авария), что позволяет избежать значительного повреждения а.з., а выброс активности в окружающую среду соответствует группе «инцидентов» по международной шкале ядерных и радиологических событий INES-2008, для устранения которых могут потребоваться локальные меры, ограниченные площадкой АС. Ко второй группе относятся сценарии с подачей воды при максимальных температурах оболочек твэлов от 1500 К до 2100 К (до начала плавления металлического циркония). В этом случае наблюдается локальное нарушение стержневой геометрии а.з. по шкале INES-2008 относятся к группе «аварии» и могут потребовать принятия мер по защите населения. К третьей группе относятся результаты расчетов, в которых осуществляется залив существенно перегретой а.з. (температуры начала подачи воды свыше 2100 К), в которой началось плавление металлических оболочек твэлов. Такие расчеты отличаются более длительной фазой залива и интенсивной генерацией водорода. Ни в одной из трех групп результатов не формируются условия для потери локализирующих функций ГО, связанных с горением водорода.

Расчеты серии Б выполнены с предположением, что персоналу АС удалось восстановить питание спринклерной системы одновременно с началом повторного залива. Аналогично серии А, результаты расчетов серии Б можно отнести к тем же трем группам, условий для потери локализирующей функции ГО не формируется.

Среди расчетов серии В для третьей группы результатов (залив на фазе плавления оболочек твэлов) в ~25 % случаев создаются условия для перехода горения водорода с ускорением пламени к детонации, что приводит к потере локализирующих функций ГО. В таких расчетах выброс активности, оцененный только по изотопу I-131 в первые два часа аварии, соответствует «крупной аварии» по шкале INES-2008.

Таким образом, при большой течи первого контура подача воды в а.з., находящуюся на фазе плавления, совместно с ранним запуском спринклерной системы может не соответствовать условию исключения негативных последствий для обоснования эффективности мер по управлению ТА. Полученные результаты расчетов указывают на необходимость верификации мер по управлению авариями с учётом оценок реального ожидаемого состояния энергоблока.

Результаты интегрального теплогидравлического расчёта аварии с двусторонним разрывом контура охлаждения дивертора на установке ИТЭР

Гембицкий Н.Д.^{1, 2}, Долганов К.С.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Москва;

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ, Физтех), Москва, gembitsky@ibrae.ac.ru

Ключевые слова: ИТЭР, LOCA, СОКРАТ, дивертор

В рамках НИР «Развитие законодательной и нормативной базы в области использования атомной энергии, включая новые типы ядерных установок, термоядерные и гибридные системы» федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» комплексной программы Российской Федерации «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии» в ИБРАЭ РАН выполняются работы по созданию интегральной программы для ЭВМ (кода), предназначенной для анализа водородной взрывобезопасности отечественных проектов термоядерных установок типа токамак. В качестве референтного объекта используется проект ИТЭР. При разработке интегрального кода используется опыт создания физических моделей теплогидравлических, аэрозольных и физико-химических процессов, возникающих при тяжёлых авариях на АЭС с ВВЭР. Поэтому для предварительных расчётов представительных аварий на ИТЭР используется интегральный код СОКРАТ.

Результаты исследований водородной взрывобезопасности на термоядерной установке ИТЭР, проводившихся за рубежом, показывают, что образование взрывоопасной смеси водорода и воздуха возможно при аварии с потерей теплоносителя (LOCA) в результате двустороннего разрыва контура охлаждения дивертора или первой стенки.

С целью анализа теплогидравлических процессов в ходе подобных аварий разработана расчётная модель установки ИТЭР для кода СОКРАТ. Нодализация схемы ИТЭР создана на основе опубликованных данных, использовавшихся в расчётах для ранних проектов ИТЭР по кодам ATHENA, MELCOR и RELAP5, а результаты этих расчётов использованы в качестве референтных данных для кросс-верификации результатов СОКРАТ.

Нодализация схемы установки описывает систему охлаждения кассет дивертора и порт-лимитеров, систему охлаждения первой стенки и blankets, вакуумную камеру, дренажный бак со сливной линией из вакуумной камеры, бак-барботер со сбросными трубопроводами, помещение систем охлаждения токамака.

С использованием разработанной расчётной схемы выполнено моделирование аварии с двусторонним разрывом контура охлаждения дивертора. Под двусторонним разрывом подразумевается разрыв трубопровода в помещении систем охлаждения токамака совместно с разрывом охлаждающих трубок кассет дивертора внутри вакуумной камеры.

Исходным событием аварии является гильотинный разрыв контура охлаждения дивертора на входе в теплообменник. Падение расхода в контуре приводит к действию системы принудительного гашения плазмы, в течение 1 секунды повышается тепловой поток на часть поверхности вертикальных мишеней за счет срыва плазмы, что вкупе с

ухудшением теплоотвода из-за потери теплоносителя приводит к разрыву охлаждающих трубок дивертора. Давление в вакуумной камере повышается в связи с началом истечения в нее теплоносителя, далее следует снижение давления благодаря открытию предохранительного клапана и разрывной мембраны на сбросных трубопроводах в бак-барботер, а также начала слива воды в дренажный бак. По достижении положительной разности давлений между помещением систем охлаждения токамака и вакуумной камерой через осушенный участок трубопровода между двумя разрывами в вакуумную камеру начинает поступать воздух, что приводит к повторному повышению давления в вакуумной камере.

Результаты моделирования аварии демонстрируют качественное совпадение расчётной последовательности событий и динамики расчётных теплогидравлических параметров с представленными в референтных материалах результатами расчётов по кодам MELCOR и ATHENA. Количественные отличия теплогидравлических параметров оценены как приемлемые с учетом неопределенности исходных данных моделирования, связанной с ограниченностью информации в открытых источниках.

Результаты моделирования аварии свидетельствуют о корректной работе теплогидравлических моделей и о возможности использования разработанной расчётной модели установки и теплогидравлических моделей СОКРАТ в качестве основы для дальнейших оценок водородной взрывобезопасности установки ИТЭР.

Результаты расчетных исследований твэлов реакторов БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200 с жидкометаллическим подслоем

Персиянова Е.И.¹, Тарасов Б.А.¹, Иванов А.Ю.¹, Иванов Ю.А.¹,
Зборовский В.Г.², Хоружий О.В.², Лиханский В.В.²

¹ Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»), Москва;

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
EIPersyanova@bochvar.ru

Ключевые слова: реакторная установка, распухание топлива, газовые продукты деления, теплопроводность топлива, твэлы с гелиевым и жидкометаллическим подслоем

Для повышения достижимого выгорания топлива в твэлах ядерных реакторов на быстрых нейтронах необходимо снижение факторов, определяющих механическое нагружение оболочки твэла – распухания топлива и выхода из него газовых продуктов деления (ГПД). Очевидным способом для этого является снижение температуры топлива в процессе облучения. Теплопроводность нитридного топлива достаточно высока, так что его температура при облучении во многом определяется тепловым сопротивлением зазора между топливом и оболочкой [1].

В случае газового зазора существенным фактором является положительная обратная связь, связанная с выходом ГПД – выход ГПД ухудшает теплопроводность зазора, повышает температуру топлива, а с ней дополнительно повышает выход газов деления и т. д. Существенно снизить роль этого эффекта можно при использовании твэлов с жидкометаллическим подслоем (ЖМП), в которых зазор заполнен тем или иным расплавленным металлом.

Для твэлов реакторов со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200 в настоящее время активно исследуются варианты заполнения зазора свинцом с различными легирующими элементами [1–3].

К достоинствам твэлов с ЖМП относятся:

– снижение температуры топлива, что влечёт уменьшение распухания и выхода газовых продуктов деления (ГПД);

– уменьшение интенсивности механического взаимодействия таблетки и оболочки (МВТО) или его исключение за счёт увеличения исходного радиального зазора в твэле.

В работе представлены результаты расчетных исследований работоспособности твэлов БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200 с гелиевым и жидкометаллическим подслоем разного состава с целью выбора геометрических размеров таблеток СНУП топлива.

Полученные результаты необходимы для экспериментального подтверждения работоспособности твэлов со СНУП топливом с оболочками из стали ЭП823-Ш при максимальном выгорании 12,5 % т.а. и максимальной повреждающей дозе 169 сна.

Литература

1. Крюков Ф. Н. и др. Состояние нитридного топлива после облучения в быстрых реакторах // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112. – № 6. – С. 336–340.
2. Беляева А. В. и др. Радиационное распухание уран-плутониевого нитридного топлива // Всерос. молодёжная конф. «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения», г. Димитровград, 5–7 апреля 2016 г.: тез. докладов. – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2016. – С. 77.
3. Kruglov A.V. et al. Thermal conductivity of Pb-Na and Pb-Bi-Na alloys in the temperature range of 350–800 °C // Thermophysics and Aeromechanics. 2023. Vol. 30. No 1. P. 127–132.

Модуль CONT_TH для расчета теплогидравлических параметров защитных оболочек РУ с водяным теплоносителем

Томащик Д.Ю.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Москва
tdyu@ibrae.ac.ru*

Ключевые слова: ВВЭР, АСММ, защитная оболочка, герметичное ограждение, ВАБ-2, давление, водород, СОКРАТ, расчетное обоснование

Обоснование безопасности АЭС является неотъемлемой частью условий ее эксплуатации. Потенциальная возможность возникновения аварийных ситуаций, связанных с потерей охлаждения активной зоны реакторов с водяным теплоносителем, требуют наличия расчетных средств, качественно и количественно верно воспроизводящих взаимосвязь протекающих процессов. Только в этом случае возможен корректный прогноз сохранения локализирующей способности физических барьеров безопасности (топливная таблетка, оболочка твэла, первый контур и герметичное ограждение (ГО) или защитная оболочка (ЗО). Для тяжелых аварий (ТА) с потерей теплоносителя первого контура, особенно в случае большой течи, давление в ЗО в значительной мере определяет динамику осушения и разогрева активной зоны, условия разгерметизации оболочек твэлов и последующего выхода радиоактивных веществ (РВ) в первый контур и далее в окружающую среду. В России для моделирования ТА на АЭС с РУ ВВЭР разработан код СОКРАТ. Модуль CONT_TH в составе кода СОКРАТ В1/В2 в 2022 г. аттестован для расчета давления, температуры и состава газовой атмосферы в помещениях в пределах ГО.

Модельное наполнение CONT_TH, относящегося к кодам с сосредоточенными параметрами (lumped parameters, LP), позволяет на достаточно грубой расчетной схеме описывать протекание таких процессов, как разрушение стратифицированных слоев за счет плавучести и импульса, описывать работу существующих и перспективных пассивных систем безопасности. Для «классических» LP кодов расчетное моделирование отклика ЗО требует не только гораздо большего числа расчетных ячеек, но и квалификации пользователя, позволяющей компенсировать ограничения моделей за счет корректировки нодализации для каждой рассматриваемой ТА в отдельности.

Для задач обоснования безопасности атомных станций малой мощности (АСММ), в модуле реализован учет затопления части помещений водой и расчет параметров газовой фазы при давлении свыше 10 атм.

В докладе приводится описание наиболее важных моделей модуля, отличающих его от остальных LP кодов для расчета теплогидравлических параметров в ЗО, приводится сравнение расчетных данных с экспериментальными данными CFD-качества и расчетами по CFD кодам для серии из 5 тестов на установке PANDA. Делается вывод о возможности реалистично описывать протекающие процессы при поступлении в помещения ЗО пара и легкого газа и адекватном учете эффекта работы систем безопасности, используемых для управления ТА и в детерминистских расчетах в поддержку ВАБ-2.

Термодинамическая модель расплава на днище корпуса реактора ВВЭР

Мельников И.А., Голубев М.А., Шмельков Г.Б., Великанов А.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
Golubev_MA@nrcki.ru

Ключевые слова: тяжелая авария, ВВЭР, термодинамика расплава, внутрикорпусное удержание

Для реалистичного прогнозирования последствий тяжелой аварии с плавлением активной зоны на поздней стадии необходимо учитывать весь спектр термохимических явлений и процессов, влияющих на конфигурацию расплава и его свойства. В настоящей работе описана термодинамическая модель ванны расплава активной зоны, разработанная в НИЦ «Курчатовский институт», и реализованная в модуле GIBBS пакета прикладных программ TSAR (Toolkits for Severe Accident Research).

В основе модели модуля GIBBS лежит расчёт термодинамического равновесия компонент расплава, полученного в результате минимизации энергии Гиббса системы (метод CALPHAD). Для корректного описания фазового равновесия для различных систем в модуле GIBBS реализованы термодинамические модели идеальной смеси, регулярного раствора замещения и двухподрешеточная модель. Модуль GIBBS оценивает количество фаз и их равновесный состав при заданной температуре на каждом шаге по времени, что позволяет определять динамику формирования ванны расплава с момента начала плавления материалов. По результатам вычисленных значений масс компонента расплава в каждом из слоев осуществляется оценка плотности фаз, с помощью модели атомарного раствора замещения. Функции для расчета теплофизических и термодинамических свойств системы и ее компонент, а также параметры моделей, были объединены в библиотеку функций и реализованы в модуле DBS пакета прикладных программ TSAR.

Корректность расчёта фазового равновесия и плотностей фаз расплава для внутрикорпусной стадии аварии была продемонстрирована по результатам валидации расчётного модуля на серии экспериментов OECDMASCA, а также ряде экспериментов, посвященных оценке плотности расплава различного состава. Сравнение рассчитанных значений мольных долей компонент расплава по фазам, а также плотностей фаз показало хорошее качественное и количественное соответствие с экспериментальными данными для широкого диапазона степеней окисления расплава ($C_n = 0,3 - 1,0$) и соотношения массы стали в расплаве ($M_{\text{steel}}/M_{\text{tot}} < 35,0 \%$).

В данной работе также приведены результаты моделирования структуры ванны расплава и ее свойства для реактора ВВЭР-600, для которого прорабатывается стратегия внутрикорпусного удержания расплава при тяжелой аварии. Стратегия внутрикорпусного удержания подразумевает локализацию и охлаждение расплава внутри корпуса реактора, охлаждаемого снаружи водой. Для оценки возможности внутрикорпусного удержания требуется продемонстрировать достаточный запас как по величине запаса до кризиса кипения, так и по остаточной толщине стенки корпуса реактора, определение которых возможно лишь при детальном моделировании структуры ванны расплава.

Обоснование применимости кода СОКРАТ для моделирования ЗПА в бассейне выдержки

Федоров М.С., Меркулов В.В., Нащекин М.Д., Коновалов О.И.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
Fedorov_MS@nrcki.ru*

Ключевые слова: бассейн выдержки, код СОКРАТ, верификация, теплогидравлика, окисление циркониевых оболочек твэлов, анализ чувствительности и неопределенности, теплообмен излучением

В соответствии с рекомендациями по формированию окончательного перечня за-проектных аварий, подлежащих учёту в проекте атомных станций с реакторами типа ВВЭР [1] при обосновании безопасности АЭС необходимо рассматривать все возможные места нахождения топлива на АЭС, в том числе бассейны выдержки отработавшего топлива.

В настоящий момент для анализа тяжелых запроектных аварий в бассейне выдержки используются программные средства, изначально предназначенные для моделирования ЗПА в РУ [1]. В России для анализа аварий в БВ можно применять [2] интегральный тяжелоаварийный расчетный код улучшенной оценки СОКРАТ, который разрабатывался для комплексного численного моделирования динамики физико-химических, теплогидравлических и термомеханических процессов, происходящих в реакторных установках с водяным теплоносителем типа ВВЭР при тяжелых запроектных авариях. Использование реакторных кодов в целом оправдано тем, что значительная часть процессов, протекающих в бассейне выдержки при развитии ЗПА аналогичны процессам в реакторной установке. Тем не менее, необходимо проводить дополнительную верификацию реакторных кодов для обоснованного расширения области их применения.

На сегодняшний день верификационная база интегральных экспериментов в бассейне выдержки практически отсутствует ввиду сложности проведения таких экспериментов. Однако можно использовать эксперименты по исследованию отдельных процессов и явлений, которые будут происходить в бассейне выдержки при развитии ЗПА.

В данной работе была проведена верификация кода СОКРАТ-B1/B2 на следующих экспериментах:

- эксперименты по выкипанию и изменению концентрации борной кислоты VEERA;
- эксперименты с естественной конвекцией в большом объеме теплоносителя;
- эксперимент по окислению циркониевых оболочек в паровоздушной среде QUENCH-10.

Дополнительно представлены результаты кросс-верификации кода СОКРАТ и кода STAR CCM+ в части моделирования радиационного теплообмена, а также некоторые результаты анализа чувствительности и неопределенности исходных данных[3].

По результатам верификации было получено: для эксперимента QUENCH-10 максимальное отклонение экспериментальных данных от данных расчета по интегральному количеству водорода не превышает 10 %; при радиационном теплообмене различия по температуре в результатах расчета по коду STARCCM+ и коду СОКРАТ не превышают 1%; максимальное отклонение результатов расчета по коду СОКРАТ и результатов эксперимента VEERA не превысило 1 % по скорости парогенерации; для контура

естественной максимальные различия по температуре между экспериментальными данными и данными расчета составили ~ 7 %.

Литература

1. РБ-150-18. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13 августа 2018 г. № 359.
2. Spent fuel pools under Loss-of-Cooling and Loss-of-Coolant accident conditions 2015, status report OECD/NEA, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria
3. Безбородов А.Н., Меркулов В.В. и др., Теплофизический анализ и анализ ядерной безопасности бассейна выдержки при аварии с полным длительным обесточиванием АЭС // Материалы международной научно-технической конференции «Обеспечения безопасности АЭС ВВЭР», г. Подольск, 19–22 мая 2015.
4. Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций РБ-166-20. Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 июля 2020 г. № 288.

Моделирование поведения радиоактивных продуктов деления при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР с учетом неопределенности исходных данных

Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
Shmelkov_YB@nrcki.ru

Ключевые слова: продукты деления, анализ неопределенности, тяжелая авария, ВВЭР

Важной частью обоснования безопасности АЭС является анализ радиационных последствий запроектных аварий (ЗПА), сопровождающихся значительным выбросом радиоактивных продуктов деления (ПД) в окружающую среду. В соответствии с международными рекомендациями и российскими нормативными требованиями, моделирование процессов при запроектных авариях, в том числе при тяжелых авариях (ТА), должно выполняться в реалистичном приближении и сопровождаться анализом неопределенности и чувствительности к неопределенности исходных данных.

В работе представлены результаты моделирования поведения продуктов деления для сценария тяжелой аварии «Двусторонний гильотинный разрыв главного циркуляционного трубопровода с одновременным полным обесточиванием» для двух типов реакторных установок: ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Моделирование выполнялось с помощью аттестованного программного средства МАВР-ТА. Получены данные по выходу ПД из топлива и расплава, включая взаимодействие расплава с бетоном в случае аварии на ВВЭР-1000, данные по переносу ПД в защитной оболочке (ЗО) и выбросу ПД в окружающую среду.

Моделирование поведения продуктов деления сопровождалось анализом неопределенности и чувствительности к неопределенности исходных данных. Всего в ходе анализа неопределенности выполнено по 200 расчетов для каждого из процессов (выход ПД из топлива, выход ПД из расплава, перенос ПД в ЗО) с варьированием следующих ключевых параметров:

- Геометрические характеристики топлива и расплава.
- Температура топлива и расплава.
- Состав несущей среды и атмосферы в ЗО.
- Теплогидравлические параметры атмосферы в ЗО.
- Модельные константы.

Выполнена оценка сходимости результатов в зависимости от числа расчетов, показано, что сходимость достигается максимум при 120 расчетах. Определены коридоры неопределенности результатов для нескольких изотопов: Kr-85, Cs-137, Ba-140. В рамках анализа чувствительности выполнена оценка влияния варьируемых параметров на результат. В качестве критерия влияния рассматривался коэффициент ранговой корреляции Кендалла. Показано, что наибольшее влияние на выход ПД из топлива и расплава оказывает температура топливного образца и поверхности расплава, а на выброс ПД в окружающую среду – величина утечки из ЗО.

Моделирование плотности радиоактивных аэрозолей при тяжелых авариях на АЭС с ВВЭР

Савекин С.С., Шмельков Ю.Б.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
starsavrus@gmail.com

Ключевые слова: плотность аэрозолей, продукты деления, тяжелая авария, АЭС, ВВЭР

Аэрозоли – одна из ключевых форм продуктов деления (ПД), образующихся в ходе запроектных аварий с плавлением топлива (тяжелых аварий). Моделирование переноса и осаждения аэрозолей ПД в защитной оболочке (ЗО) играет важную роль при определении величины выброса продуктов деления в окружающую среду, при этом осаждение аэрозолей во многом определяется их плотностью.

На сегодняшний день ключевой экспериментальной программой, в которой исследовалось образование и процесс переноса радиоактивных аэрозолей ПД в ходе плавления образцов топлива, является экспериментальная программа Phebus-FP. По результатам данной программы получены данные о распределении аэрозолей ПД по размерам, данные о составе аэрозолей, а также оценки плотности аэрозольных частиц.

Авторами настоящей работы была разработана методика оценки плотности многокомпонентных аэрозолей, образующихся в ходе запроектных аварий на АЭС с ВВЭР. Методика представлена в двух приближениях: приближении «сплошности» и приближении «пористости». В рамках приближения «сплошности» считается, что аэрозоль состоит из сплошных частиц без полостей. В свою очередь каждая из частиц состоит из n -го количества элементов, каждый из которых занимает долю объема частицы, пропорциональную массе элемента. В приближении «пористости» аэрозоль, помимо конденсированной фазы, включает в себя поры, заполненные газом. Предполагается, что поры могут быть заполнены водяным паром и неконденсируемыми радиоактивными благородными газами. Доля объема, занимаемая газом в аэрозольных частицах, определяется задаваемым коэффициентом пористости.

Таким образом, для проведения расчета в рамках приближения «пористости» необходимо знать как долю объема частицы, занимаемую газом в аэрозольных частицах, так и массы газовой и конденсированной фаз.

В настоящей работе проведена оценка плотности частиц с помощью предложенной расчетной методики для трех тестов FPT1, FPT2 и FPT3 экспериментальной программы Phebus-FP. В ходе опытов плотность аэрозолей не измерялась непосредственно, однако оценивалась авторами экспериментов в диапазоне от 3000 кг/м^3 до 10000 кг/м^3 . Так, для теста FPT1 плотность в приближении «сплошности» и «пористости» оценена значениями $\sim 8200 \text{ кг/м}^3$ и $\sim 7400 \text{ кг/м}^3$ соответственно; для теста FPT2 – значениями $\sim 4700 \text{ кг/м}^3$ и $\sim 4200 \text{ кг/м}^3$; для теста FPT3 – значениями $\sim 3500 \text{ кг/м}^3$ и $\sim 3200 \text{ кг/м}^3$.

С использованием оценок значений плотности аэрозолей ПД, полученных в настоящей работе и оценок плотности, представленных авторами экспериментов, проведено моделирование переноса аэрозолей в тестах Phebus-FP. Выполнен анализ и сравнение полученных данных по содержанию аэрозолей в атмосфере экспериментальной установки.

Моделирование радиационного теплообмена применительно к анализу живучести устройства локализации расплава реактора ВВЭР-1200

Мельников И.А., Шмельков Г.Б., Голубев М.А., Великанов А.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
Shmelkov_GB@nrcki.ru

Ключевые слова: теплообмен излучением, зональный метод, УЛР, ВВЭР-1200, расплав, кориум, тяжелая авария

В основе безопасности АЭС с реактором типа ВВЭР лежит концепция глубокоэшелонированной защиты, предполагающая наличие физических барьеров на пути распространения радиоактивных продуктов деления и ионизирующего излучения в окружающую среду. Среди ключевых положений концепции глубокоэшелонированной защиты можно выделить удержание радиоактивных веществ в пределах защитных барьеров и сохранение их целостности. В систему физических барьеров входит топливная матрица, оболочка ТВЭЛа, граница первого контура теплоносителя и герметичное ограждение реакторной установки. В ходе тяжелой аварии возможно расплавление материалов активной зоны или топлива в бассейне выдержки с последующим взаимодействием расплава с оборудованием АЭС. Локализация и охлаждение образовавшегося расплава являются ключевыми задачами по смягчению последствий тяжелой аварии для предотвращения последующих отказов барьеров безопасности.

В случае проплавления корпуса реактора образовавшийся кориум выходит за пределы корпуса и попадает в подреакторное помещение бетонной шахты реактора. Для реакторов большой мощности ВВЭР-1200 проектом предусмотрено устройство локализации расплава (УЛР), расположенное непосредственно под днищем корпуса реактора и обеспечивающее прием и размещение в своем объеме вышедшего кориума с целью его последующего охлаждения и локализации. Заполняющий пространство УЛР расплав представляет из себя разогретую свыше 2000 К вязкую жидкость с объемным энерговыделением. По мере заполнения объема УЛР, расплавления и растворения жертвенных материалов излучение с поверхности расплава интенсивно воздействует на конструкции тепловых защит и фермы-консоли УЛР. Для анализа эффективности мер по смягчению такого воздействия, а также оценки живучести оборудования в таких условиях, определения динамики их нагрева и плавления требуется корректный учет теплообмена излучением в условиях сложной геометрии и наличия парогазовой смеси над поверхностью расплава.

Программный модуль THERA (Thermal Radiation), входящий в состав пакета прикладных программ TSAR (Toolkits for Severe Accident Research) позволяет осуществлять расчет теплообмена излучением с поверхности расплава на расположенные выше конструкции 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. Расчет теплообмена излучением осуществляется зональным методом расчета в трехмерной расчетной области, которая разбивается на N треугольных элементов, для каждой пары рассчитываются угловые коэффициенты с учетом возможного затенения. Учет сложной геометрии расчетной области обеспечивается за счет высокой степени дискретизации ограничивающих задачу поверхностей.

В настоящей работе проведено моделирование радиационного теплообмена модулем THERA на стадии заполнения расплавом блоков наполнителя до момента подачи воды применительно к анализу внекорпусной стадии тяжелой аварии на АЭС с реактором типа ВВЭР-1200. В качестве исходных данных по составу расплава и его теплофизическим характеристикам используются результаты моделированию обобщенного сценария гипотетической тяжелой аварии на АЭС с реактором ВВЭР-1200 кодом СОКРАТ-В1/В2. Хронология поступления расплава во внутренний объем УЛР получена на основе моделирования внекорпусной стадии тяжелой аварии кодом ГЕФЕСТ-УЛР. По результатам моделирования получено распределение плотностей тепловых потоков излучения на конструкциях тепловых защит и фермы-консоли. Полученные значения плотностей тепловых потоков были использованы в качестве граничных условий для сопряженного теплового расчета. В результате получено распределение температуры по конструкции фермы-консоли, важной для функционирования УЛР.

Оценка выхода водорода из воды приреакторного бассейна выдержки ОЯТ АЭС с реактором РБМК-1000 на начальной стадии аварии с полным обесточиванием

Жулина Ю.К.^{1,2}, Грязев А.С.¹, Осипов А.М.¹, Поляков В.В.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва;

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), Москва
yuliya.zhulina.01@mail.ru

Ключевые слова: водород, радиолиз, растворимость газов в воде, бассейн выдержки, водородная взрывобезопасность, адиабата Гюгонио, детонация, РБМК-1000

Исследование процессов образования водорода в бассейне выдержки отработавшего ядерного топлива (БВ ОЯТ) является важной и актуальной задачей, так как водород обладает свойством образовывать горючую смесь с воздухом. Оценка массы водорода, образующегося в результате радиолиза, проводится в поддержку детерминистического анализа безопасности (ДАБ), который, в том числе, необходим для проведения вероятностного анализа безопасности (ВАБ) блока и станции в целом.

В данной работе исследуются процессы образования водорода в приреакторном БВ ОЯТ АЭС с реактором РБМК-1000 на начальной стадии запроектной аварии с полным обесточиванием (до начала кипения воды). На момент начала аварии в воде бассейна выдержки ОЯТ присутствует растворенный водород, который в процессе аварии (при разогреве) выходит из воды. Другими источниками водорода являются радиолиз воды и пароциркониевая реакция. Так как на рассматриваемой стадии аварии твэлы полностью погружены в воду, то пароциркониевая реакция не происходит.

Методика расчета выглядит следующим образом. Начальная концентрация водорода в воде БВ принимается равной предельной растворимости водорода в воде для заданных давления и температуры p и T [1]. Далее, на каждом шаге расчета текущая концентрация водорода в воде (с учетом образующегося радиолитического водорода, расчет которого проводится согласно [2]) сравнивается с предельной концентрацией для текущих p и T . Если текущая концентрация водорода оказывается больше предельной, то рассчитывается количество водорода, которое выделится из объема воды в надводное пространство. Консервативно считается, что весь образующийся водород остается в надводном пространстве, а избыток воздуха вытесняется в центральный зал энергоблока.

Для расчетов принимаются некоторые допущения:

1. Выделяющийся из объема воды водород впоследствии не может раствориться заново.
2. Образование радиолитического водорода происходит равномерно по всему объему воды.
3. Выход растворенного водорода происходит равномерно из всего объема воды.
4. В воде отсутствует растворенный воздух.

Тепловой расчет проведен для полной загрузки БВ с учётом аварийной выгрузки отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) из реактора, с общей мощностью всех ОТВС, равной 1000 кВт, при этом принимается, что на радиолиз идет 10 % от этой величины.

Представлена оценка взрывоопасности приреакторного бассейна выдержки в ходе запроектной аварии с учетом возможности спонтанного развития детонации, зависящей от величины детонационной ячейки и характерного размера помещения (критерий 7λ [3]).

Литература

1. Dean J.A. Lange's handbook of chemistry.1999.
2. Кабакчи С.А., Пикаев А.К. Методы расчета газовыделения и оценки взрывоопасности радиационно-химических аппаратов с водяным теплоносителем или биологической защитой. – М.: Энергоиздат, 1981. – 51 с. – (Радиационно-химическая технология; Вып. 7).
3. Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear Safety // OECD Nuclear Energy Agency. – France, 2000.

Расчетные исследования конденсационных гидравлических ударов в трубопроводе аварийного впрыска в компенсатор давления в ВЭР-1300

Кучерова В.В., Чуркин А.Н.

*Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), Подольск
K_valera@vk.com*

Ключевые слова: ВВЭР, компенсатор давления, трубопровод аварийного впрыска, конденсационный гидравлический удар, КОРСАР/ГП, расчетные исследования

Анализ возникновения гидравлических ударов (ГУ) на действующих АЭС мира показал, что, они, прежде всего, возникают во вспомогательных трубопроводных системах реакторных установок (РУ), и в большинстве зафиксированных случаев являются конденсационными гидравлическими ударами (КГУ). Нагрузки на оборудование и трубопроводы, связанные с КГУ, должны учитываться в проектах РУ.

В современных проектах реакторных установок ВВЭР трубопровод аварийного впрыска в компенсатор давления (КД) предназначен для обеспечения подачи холодного теплоносителя в паровую часть КД от системы аварийного ввода бора (САВБ) с целью снижения давления в первом контуре. Автоматический впрыск происходит в ходе протекания аварии с течью теплоносителя из первого контура во второй. Возможно также использование аварийного впрыска по команде оператора в ходе управления проектными или запроектными авариями.

Конфигурация трубопровода аварийного впрыска предполагает наличие насыщенного пара в его верхней части, а срабатывание САВБ обеспечивает поступление в верхнюю часть холодного (вплоть до 20 °С) теплоносителя, что является одним из условий для возникновения КГУ.

Целью данной работы является расчетный анализ возможности возникновения КГУ в трубопроводе аварийного впрыска в КД ВВЭР-1300 и сравнение результатов с экспериментальными исследованиями в АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Для выполнения анализа использовался расчетный код КОРСАР/ГП, который может применяться в дальнейшем при обосновании проектов РУ для оценки нагрузок на оборудование и трубопроводы, связанных с КГУ.

Экспериментальная установка включала в себя имитатор КД, модель участка трубопровода аварийного впрыска, расположенного вблизи КД, и выполненного в масштабе 1:1, емкости для производства пара с внешним обогревом, насосы, питательный бак, обвязывающие трубопроводы с арматурой, теплообменники и контрольно-измерительную аппаратуру.

Эксперименты проводились в диапазоне давлений пара от 1 до 7 МПа. Расход впрыска воды варьировался от 1,5 до 14,5 м³/ч. Диапазон температур впрыскиваемой воды составлял от 21 до 29 °С.

Каждый эксперимент на определенном уровне давления пара и расхода впрыска включал в себя четыре фазы. На первой фазе эксперимента (фаза впрыска) включался насос, обеспечивающий подачу воды в трубопровод, заполненный паром. Время увеличения расхода до заданного максимального значения составляло от 6 до 8 с. По показаниям температуры среды в модели трубопровода отслеживался процесс заполнения модели трубопровода аварийного впрыска водой. После полного заполнения исследуемых участков трубопроводов подача воды прекращалась.

Вторая фаза эксперимента (фаза замещения) происходила при выключенном насосе. Вода в наклонном участке трубопровода замещалась паром из имитатора КД. Окончанием второй фазы эксперимента являлось повышение температуры в самом верхнем участке модели трубопровода аварийного впрыска до значений температуры насыщения воды при заданном давлении.

Третья фаза (фаза впрыска) начиналась с повторного включения насоса с требуемым расходом. Подача воды прекращалась после полного заполнения исследуемых участков трубопроводов холодной водой.

Четвертая фаза эксперимента (фаза замещения) аналогична второй. Как только пар замещает воду в модели трубопровода аварийного впрыска четвертая фаза и эксперимент в целом закачивались. После этого начиналась подготовка к следующему эксперименту с новыми граничными условиями.

В выполненных авторами расчетных исследованиях с использованием расчетного кода КОРСАР/ГП моделировалась не вся экспериментальная установка, а только участок с моделью трубопровода аварийного впрыска. Параметры среды в имитаторе КД и подача воды от САВБ моделировались соответственно с помощью граничного условия и источника массы.

Сравнение температуры теплоносителя в местах размещения термопар на экспериментальной модели показало, что в целом, результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными, но наблюдается некоторое расхождение во времени прохождения фронтов охлаждения/нагрева, что может объясняться, в частности, точечным (локальным) измерением температуры в сечении трубопровода.

Основной задачей исследования было расчетное предсказание возникновения КГУ в трубопроводе аварийного впрыска. Детальный анализ результатов расчетов показал, что в трубопроводе на поверхности раздела фаз возникают волны (локальное увеличение доли жидкости в трубе при расслоенном течении теплоносителя) которые под действием встречного движения пара перемещаются вверх по потоку жидкости, образуя в ряде случаев паровые полости, окруженные со всех сторон более холодной жидкостью. Такая конфигурация пара и жидкости может привести к возникновению КГУ, что и было зафиксировано в эксперименте при давлениях ниже 4 МПа.

Расчеты также подтвердили выводы экспериментальных исследований, что КГУ не возникают при проектном функционировании САВБ на впрыск в КД при давлении выше 8 МПа в ходе протекания аварии с течью теплоносителя из первого контура во второй.

Выполненные расчетные исследования являются одним из этапов валидации расчетного кода КОРСАР/ГП по явлению КГУ.

Расчётный анализ аварии с блокировкой проходного сечения ТВС РУ БН с учетом погрешностей и неопределённостей

Анфимов А.М., Кирилов И.Н.

*Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), г. Нижний Новгород;
kirilov_in@okbm.nnov.ru*

Ключевые слова: погрешность, неопределенность, анализ безопасности, проектная авария, РУ БН, натрий, авария с блокировкой проходного сечения, ТВС, твэл, кипение натрия, плавление топлива

В соответствии с НП-18-05 «Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности атомных станций с реакторами на быстрых нейтронах» при обосновании безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН) рассматривается проектная авария (ПА) с блокировкой проходного сечения ТВС. Так как рассматриваемая авария является проектной, при её анализе используется консервативный подход, что определяется требованиями НП-001-15.

Целью анализа ПА является подтверждение непревышения установленных для неё приемочных критериев. Для этого проводится сравнение консервативных значений параметров безопасности с принятыми критериями. Определение консервативного значения рассчитываемого параметра проводится с использованием методики на базе метода

Монте-Карло, которая учитывает неопределенности и погрешности расчета.

Расчетный анализ основных процессов в условиях аварии с полной блокировкой проходного сечения одной ТВС выполнялся с использованием аттестованного кода СОКРАТ-БН.

В докладе представлены методический подход и результаты расчетного анализа ПА с блокировкой проходного сечения ТВС РУ БН с учетом погрешностей и неопределённостей.

Расчётный анализ теплогидравлических характеристик фильтр-ловушки перспективного реактора БН

Пяткин Е.Р., Пахолков В.В., Рогожкин С.А.

*Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени
И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), Нижний Новгород;
pyatkin@okbm.nnov.ru*

Ключевые слова: БН, теплогидравлический расчет, холодная фильтр-ловушка, натрий

Анализ опыта освоения жидкого натрия как теплоносителя реакторных установок (РУ) БН показывает, что работоспособность таких установок во многом определяется химической активностью этого металла по отношению к кислороду, водороду и ряду других химических элементов. Примеси, неизбежно присутствующие в теплоносителе, могут вызывать эффекты, усложняющие эксплуатацию РУ. В качестве средства очистки теплоносителя от примесей в РУ БН наибольшее распространение получили холодные фильтр-ловушки (ХФЛ).

ХФЛ представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд, к нижнему основанию которого приварены направленные внутрь сосуда трубки Фильда. Теплоноситель, поступающий в ХФЛ по центральной трубе, охлаждается до температуры, при которой происходит кристаллизация и высаживание примесей. Примеси, присутствующие в теплоносителе в количествах, превышающих концентрацию, соответствующую растворимости при данной температуре, улавливаются в рабочей полости ХФЛ. Охлаждение теплоносителя производится за счет газа, циркулирующего вдоль поверхности сосуда и внутри трубок Фильда.

Исходя из компоновочных ограничений для перспективного реактора БН возникла необходимость оценить теплогидравлические характеристики альтернативного варианта конструкции ХФЛ. Данный вариант предполагает замену одной холодной фильтр-ловушки на две ХФЛ с уменьшенной производительностью по натрию в два раза.

Для расчета теплогидравлических характеристик ХФЛ разработана методика расчета, основанная на законе сохранения энергии с замыкающими соотношениями для коэффициентов теплоотдачи. Методика верифицирована по проектным расчетам ХФЛ БН-600. Процессы тепломассообмена в ХФЛ не моделировались, распределение температуры теплоносителя по высоте рабочей полости ловушки принято по опыту проектирования и эксплуатации ХФЛ.

В результате работы определён расход охлаждающего газа, необходимый для поддержания требуемой температуры теплоносителя в ловушке. Сформулированы задачи для дальнейших исследований процессов тепломассообмена в ХФЛ.

Расчетный анализ аварии с разгерметизацией вытеснителя-нейтроновода реактора БН

Самойлов А.М., Богданова Е.В., Пахолков В.В., Рогожкин С.А.

*Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), Нижний Новгород
samoilov77@okbm.nnov.ru*

Ключевые слова: БН, разгерметизация, вытеснитель-нейтроновод, натрий

В реакторе БН вытеснители-нейтроноводы расположены в баке реактора и предназначены для обеспечения необходимого нейтронного потока от активной зоны к ионизационным камерам, установленным за пределами реактора. При обосновании безопасности реактора БН рассмотрена гипотетическая аварийная ситуация, связанная с разгерметизацией вытеснителей и последующим их заполнением теплоносителем (натрием). Заполнение вытеснителя сопровождается уменьшением плотности потока нейтронов на ионизационные камеры, что может привести к нерегламентному увеличению мощности реактора за счет действий системы автоматического управления мощностью реактора.

В результате анализа установлено, что характер протекания аварии будет зависеть, в основном, от скорости заполнения вытеснителя теплоносителем. Поэтому рассмотрено два предельных случая – с «медленным» и «быстрым» заполнением вытеснителя.

При «медленном» заполнении теплоноситель поступает в вытеснитель через незначительный дефект в результате неустойчивости поверхности «газ-жидкость» в дефекте. Объем вытекающего газа равен объему втекающего теплоносителя и тем самым обеспечивается равенство давлений внутри и снаружи вытеснителя в течение всего процесса заполнения. Для оценки скорости заполнения использовалась формула Полянина Л.Н. для скорости всплытия одиночного пузырька в жидкости, обобщающая экспериментальные данные по всплытию пузырьков в жидкостях с существенно отличающимися свойствами.

При «быстром» заполнении теплоноситель поступает в вытеснитель через настолько большой дефект, что по сигналам от системы автоматического управления регулирующие стержни извлекаются из активной зоны реактора с максимально возможной скоростью. В результате происходит срабатывание аварийной защиты по температуре теплоносителя на выходе из реактора.

В результате расчетного анализа определены скорость заполнения вытеснителя теплоносителем, а также признаки, по которым оперативный персонал может идентифицировать исходное событие с разгерметизацией вытеснителя для принятия корректирующих мер по предотвращению опасных последствий аварии. Получено, что безопасность установки будет обеспечена срабатыванием систем автоматического управления или действиями оперативного персонала, при этом будет исключено превышение установленных в проекте пределов безопасной эксплуатации.

Разработка модели окисления карбида бора, учитывающей образование водорода и угарного газа

Долженков Е.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Москва
dolzhenkov@ibrae.ac.ru

Ключевые слова: окисление, карбид бора, моделирование, тяжелая авария, водород, угарный газ

Карбид бора, обладая высоким значением сечения поглощения нейтронов, широко используется в качестве материала поглощающего элемента в российских РУ ВВЭР и РБМК, а также западных BWR и некоторых PWR. В условиях тяжелой аварии происходит отказ оболочки пэла вследствие эвтектических взаимодействий или плавления материала оболочки. В результате создаются условия для прямого доступа пара к поверхности карбида бора. Важность реакции окисления карбида бора паром определяется ее вкладом в источник водорода и формированием газообразных углерод- и борсодержащих соединений, которые могут влиять на химию и перенос в первом контуре некоторых продуктов деления, в частности, йода (газообразные формы) и цезия.

Учитывая небольшое количество карбида бора в активных зонах РУ ВВЭР и PWR, количество водорода, образуемого в результате его окисления при тяжелой аварии, значительно меньше количества водорода, образуемого в результате окисления циркония (не более 8 % для ВВЭР-1000, 10 % – для французских PWR). Однако, относительно сильная кинетика окисления карбида бора способствует наличию определенного вклада этого процесса в локальные эффекты в РУ: например, образование «водородных карманов». Принимая во внимание текущие исследования по разработке современных материалов активных зон, важность окисления карбида бора как источника водорода может значительно возрасти, особенно в случае аварийно-устойчивого топлива, в том числе с оболочками ТВЭЛов из материалов, менее склонных к окислению относительно классически циркониевых сплавов.

Целью настоящей работы является разработка модели окисления карбида бора, учитывающей образование водорода и угарного газа – наиболее важных газообразных продуктов реакции с точки зрения пожаровзрывобезопасности.

Отличительной особенностью процесса окисления карбида бора является его нелинейность: в зависимости от температурного режима и условий по пару (дефицит или избыток) возможно взаимодействие реагентов путем трех различных химических реакций, каждая из которых протекает в две стадии; при этом в зависимости от реакции образуется различный набор углерод- и борсодержащих продуктов реакции, а также различное количество водорода. Моделирование полного набора продуктов реакции, в общем случае, требует сопряженного диффузионного и термодинамического расчета, однако в международных экспериментальных программах по исследованию соответствующего физического процесса было показано, что образование некоторых продуктов реакции незначительно или возможно лишь в определенных режимах, которые слабо прототипны условиям тяжелых аварий. В этой связи разработка модели выполняется на основе диффузионного подхода, дополненного рядом модельных предположений.

В результате работы разработана модель окисления карбида бора, учитывающая образование указанных выше продуктов реакции, а также выполнена ее валидация на данных экспериментов по высокотемпературному окислению карбида бора в пар-аргоновой атмосфере в диапазоне температур, прототипном условиям тяжелых аварий. Результаты валидации, и, в частности, приемлемая точность моделирования, позволяют судить о допустимости используемых модельных предположений.

Исследование теплофизических и физико-химических характеристик экспериментального стенда лаборатории KALLA

Свирид К.О., Сергеенко К.М.

*Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалы» (АО «НИКИЭТ»), Москва
km.sergeenko@nikiet.ru*

Ключевые слова: модель, расчёт, CFD, KALLA, жидкий металл, свинец, эрозия

В настоящее время по всему миру ведутся работы по созданию реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Например, в конструкциях реакторов ALFRED и BREST-OD-300 используется свинцовый теплоноситель, в то время как в реакторах MYRRHA и SVBR-100 используется свинцово-висмутовый теплоноситель. Высокая коррозионная и эрозионная активность охлаждающей жидкости требует контроля концентрации кислорода и скорости потока. Из-за сложной геометрии контура охлаждения реакторов широко используются методы численного моделирования для обоснования режимов работы жидкометаллического теплоносителя. Правильное обоснование сложных процессов переноса кислорода в жидких металлах требует детальной физико-химической расчетной модели, которая учитывает основные реакции кислорода с теплоносителем и конструкционными материалами.

В данной работе представлена физико-химическая модель, которая учитывает следующие процессы: эрозию, рост и растворение двухслойной оксидной пленки, осаждение и растворение оксидов металлов в контуре с последующим осаждением в фильтре, а также приток кислорода через массообменник. Физико-химическая модель была реализована с использованием модели пассивного скаляра, которая позволяет моделировать перенос примесей в теплоносителе.

Возможности представленной модели продемонстрированы на основе результатов исследования теплогидравлических и физико-химических процессов на экспериментальной установке лаборатории KALLA. Продолжительность моделирования составляет 1000 часов.

Были получены пространственные распределения концентраций оксидов металлов, областей повышенной эрозионной активности, а также массы оксидов, осаждающихся на фильтре, и количества кислорода, поступающего в контур. Также было рассчитано поверхностное распределение толщины оксидной пленки на поверхностях контура, контактирующих с жидкометаллическим теплоносителем.

Учет термопар и технологии изготовления позволил повысить точность расчета теплогидравлических характеристик потока теплоносителя по сравнению с более ранними исследованиями.

Алфавитный указатель

- Абдулазизов О.М. 63
Алексеев В.В. 18, 47
Алчагиров Б.Б. 41, 44
Альмяшев В.И. 30
Анищенко А.М. 155
Анфимов А.М. 179
Апальнов Е.А. 34
Арестова А.А. 104
Асипенко Д.С. 84
Асхадуллин Р.Ш. 24, 28, 34, 61
Ахмедов И.С. 162
Ахмедов Э.Г. 155
- Баисов А.М. 92
Балуев Д.Е. 149
Баясхаланов М.В. 134
Белавина Е.А. 73
Бенедиктов Д.В. 152
Бердюгин Д.А. 73
Богданова Е.В. 181
Бокова Т.А. 52, 78, 125
Болтенко Э.А. 90
Борисова К.Г. 32
Босенко С.В. 105
Букреева А.Д. 85
Бурцев С.А. 122
- Вакарин А.В. 152
Василенко В.А. 22
Великанов А.В. 168, 173
Верещагина Т.Н. 119, 123
Вершинина Ю.В. 93
Волков Н.С. 52, 78, 125
Волкова С.Н. 126, 151, 152
Воронин И.А. 84
- Гаврилов М.В. 155
Ганичев Н.С. 39
Гаца П.В. 70
Гембицкий Н.Д. 164
Голубев М.А. 168, 173
Гончар Н.И. 20, 51
Горностаев Д.А. 159
Грабежная В.А. 80, 85
Грицай А.С. 126, 151
Грушичева Е.А. 49
Грязев А.С. 175
Гуч И.В. 47
- Данилов Е.А. 144
Данилов И.Г. 126
Дворецкий С.В. 61
- Дельнов В.Н. 10
Денисова Н.А. 10, 66
Дёмкина Т.Д., 98, 101
Диденко Д.В. 149
Дмитриев Д.В. 51, 157
Дмитриев С.М. 98, 101, 120, 145
Добони К.А. 107
Добров А.А. 98, 101, 120
Долганов К.С. 164
Долженков Е.А. 182
Доронков Д.В. 98, 101
Доронкова Д.С. 98, 101
Дудкин К.О. 136
Дышекова Ф.Ф. 41, 44
- Ермаков А.И. 47
- Жданов В.П. 47
Жилкин А.С. 157
Жулина Ю.К. 175
- Загорулько Ю.И. 39
Залесов А.С. 142
Зборовский В.Г. 166
Зуборева М.В. 84
Зырянова Т.К. 52, 125
Зюбанов В.А. 62
- Иванов А.Ю. 166
Иванов Ю.А. 166
Иванова Е.А. 130
Ивков М.И. 155
Игнатъев В.В. 70, 132
Ильичева Н.С. 39
- Казанцев А.А. 130, 138
Канаметова О.Х. 41, 44
Кирилов И.Н. 179
Кирюхин А.В. 111
Киселев А.Е. 162
Коврежкин Н.В. 47
Колик М.В. 22
Колобовников И.П. 132
Коновалов М.А. 39
Коновалов О.И. 169
Корсун А.С. 134
Котов Я.А. 16
Кочергин В.М. 90
Кошелев М.М. 56, 59
Кремлёва В.С. 56, 59
Круглов А.Б. 68
Крушинов Е.В. 30

- Крылов В.С. 113
Крыжановская Т.И. 89, 154
Кудряева Ю.В. 123
Кузнецов В.И. 36
Кузина Ю.А. 10, 18, 66
Куприянов К.С. 132
Курицин Д.Д. 101
Кучерова В.В. 177
- Лазорцев А.С. 65
Латкин Д.Ю. 89, 154
Лебезов А.А. 87
Левашов П.Р. 117
Легких А.Ю. 24, 28, 34
Легких К.Г. 47, 49, 54
Лиханский В.В. 166
Логинов В.Н. 124
Логинов Н.И. 17, 108, 119
Логинов П.А. 159
Лосев М.И. 75
Лотов В.С. 61, 64, 65
Лубина А.С. 149
Лутков М.А. 36
Лучина К.А. 132
Лучинкин Н.А. 71
Лысиков А.В. 36
- Марков П.В. 136
Маров А.Р. 52, 78, 125
Матвеев Е.Л. 140
Матюшин А.А. 106
Махова Т.В. 34
Мелихов В.И. 147
Мельников И.А. 168, 173
Меринов И.Г. 134
Меркулов В.В. 169
Мигров Ю.А. 126, 152
Мильман О.О. 111
Минаков Д.В. 115
Миссорин Д.С. 36
Митрофанова О.В. 13
Михайлова Ю.В. 109
Михальчик В.В. 36
Михеев А.С. 80, 108
Мицкевич А.В. 126
Мишин Г.А. 93
Морозов А.В. 87, 96, 117
Мосеева Н.А. 130
Мосунова Н.А. 128
Мурашкин А.В. 64
- Нащекин М.Д. 169
- Невиница В.А. 16
Недайвозов А.В. 140
Нигматулин Б.И. 21
Никаноров О.Л. 149
Никитин Э.М. 47
Николаев Д.С. 101
Никулин А.С. 147
Ниязов С.-А.С. 24
Носков А.В. 90
- Образцов Е.П. 155
Олексюк Д.А. 104
Осипов А.А. 63, 64, 65, 82, 83
Осипов А.М. 175
- Паредес Л.П. 68
Пахолков В.В. 180, 181
Персиянова Е.И. 166
Петкевич И.Г. 89, 154
Петров Л.В. 171
Погорелов М.Д. 52, 78, 125
Поляков В.В. 175
Полянская О.Н. 1 71
Попандопуло Х.Ю. 93
Попов А.О. 126, 151
Посаженников А.М. 84
Прибатурин Н.А. 128
Приказчикова А.А. 56, 59
Пронин А.Н. 98, 101
Птахин А.В. 111, 113
Пустовалов С.Б. 16
Пяткин Е.Р. 180
Пятницкая Н.Ю. 73
- Разуванов Н.Г. 71
Рахимов Р.Ф. 73
Резанов Д.С. 124
Рогожкин С.А. 149, 180, 181
Рыбин А.Н. 47
Рязанов А.В. 98, 101, 120
- Савекин С.С. 172
Садовничий Р.П. 24, 61, 65
Самойлов А.М. 181
Сахипгареев А.Р. 87, 117
Свирид К.О. 183
Седов А.А. 16, 149, 160
Семенов Д.А. 47
Семин С.Д. 47
Сергеев Вл.В. 138
Сергеенко К.М. 77, 183
Сережкин Л.Н. 111

- Сидоров А.Е. 122
Смирнов А.М. 96
Смыков В.Б. 47, 49
Соборнов А.Е. 145
Сокуренок Е.Д. 159
Соловьев С.С. 144
Сорокин А.П. 10, 18, 66
Сорокин Г.А. 66
Сошкина А.С. 87
Степанов В.С. 22
Стрижов В.Ф. 128
Субботин С.А. 16
Судариков В.К. 109
Суджян А.М. 160
Сумин Р.В. 52, 78, 125
Супотницкая О.В. 130
Сурин В.И. 39
- Тарасов Б.А. 166
Тенишев А.В. 36
Тимчук А.В. 30
Томашик Д.Ю. 167
Тошинский Г.И. 22
Третьяков Е.А. 155
Трифанова Е.М. 49
Троянов В.М. 22
Тутукин А.В. 140
- Ульянов В.В. 56, 59, 80, 108
Усов Э.В. 128
- Федоринов А.В. 13
Федоров М.С. 169
Федотов А.В. 36
Фейнберг О.С. 132
Филимонов Е.В. 157
Фокина Д.А. 54
Фомин А.В. 159
Фомиченко П.А. 16
Фролов А.А. 149
- Хабилов З.Ю. 44
Харитонов В.С. 68, 134
Харитонов Е.Ю. 32
Харчук С.Е. 28, 61, 62
Хоружий О.В. 166
- Цапко Ю.В. 32
- Черкасова М.С. 140
Чибисова А.С. 39
Чуркин А.Н. 92, 105, 106, 142, 177
- Шевченко Е.В. 30
Шелеметьев В.М. 64
Шмельков Г.Б. 168, 173
Шмельков Ю.Б. 171, 172
Ширяев К.А. 41
Шлёпкин А.С. 87, 117
Шуваева Е.Б. 30
Шутов Н.В. 171
- Ярушина А.В. 126, 152
Яснев И.М. 32

Подписано в печать 01.04.2024.

Тираж 200 экз. Заказ № 74. Уч.-изд. л. 11,12. Усл. п. л. 10,95.

Отпечатано в ОПиНТИ АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».

249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.

АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского».