

ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

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

Научно-техническая конференция

ТЕПЛОФИЗИКА РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА-2020

Тезисы докладов

23–25 сентября 2020 г.

Обнинск



УДК 536.24:621.039.524.4:621.039.58

Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2020) : Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2020)», 23 – 25 сентября 2020, Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2020. – 148 с.

Сборник тезисов докладов конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2020)», отражает состояние и задачи теплофизических исследований легководных и быстрых реакторов с жидкометаллическими теплоносителями. В пленарных докладах рассмотрены фундаментальные проблемы и инженерные вопросы использования жидких металлов в ядерной и термоядерной энергетике, разработки технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (Pb, Pb-Bi), механизмов процессов кипения щелочных жидких металлов и фрагментации капель жидкого металла при паровых взрывах, гидродинамики активной зоны реакторов ВВЭР и различных коллекторных систем ЯЭУ, теплогидравлической эффективности и надежности работы транспортных установок нового поколения, физики и теплогидравлики перспективных реакторов с водой сверхкритического давления. В докладе «В.И. Субботин – основатель научной школы «Тепломассоперенос, физическая химия и технология теплоносителей в энергетических системах» (к 100-летию со дня рождения)» представлена его деятельность. В докладах семи тематических секций рассмотрен обширный круг задач в области исследований теплофизических свойств теплоносителей, физхимии и массопереноса в жидкометаллических системах, гидродинамики и теплообмена в обоснование повышения эффективности и безопасности водоохлаждаемых реакторов и реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями, турбулентного тепломассообмена, магнитной гидродинамики, сейсмостойкости, вибропрочности и термоакустики в ядерных энергетических установках, высокотемпературной ядерной энерготехнологии для производства водорода и других инновационных применений. В докладах специализированных секций рассмотрены результаты разработки и валидации расчетных моделей, теплофизических кодов, их верификации и численного моделирования гидродинамики и тепло- и массопереноса в номинальных режимах и аварийных режимах в обоснование безопасности для ядерных энергетических установок различного назначения, разработки и испытаний датчиков, систем контроля и оборудования для реакторных установок, использование технологий ядерной энергетики в других отраслях экономики, включая переработку органического и неорганического сырья, утилизацию тепла непрерывного литья заготовок.

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

Под общей редакцией

*докт. техн. наук А.П. Сорокина, канд. техн. наук Ю.А. Кузиной,
докт. техн. наук Т.Н. Верецагиной*

Технический редактор Н.А. Денисова

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные доклады

В.И. Субботин — основатель научной школы «Тепломассоперенос, физическая химия и технология теплоносителей в энергетических системах» (к 100-летию со дня рождения).....	9
<i>Арнольдов М.Н., Орлов Ю.И., Сорокин А.П., Рачков В.И.</i>	
Жидкие металлы в термоядерной энергетике	14
<i>Асхадуллин Р.Ш., Арнольдов М.Н.</i>	
Проблемы повышения теплогидравлической эффективности и надежности работы транспортных ЯЭУ нового поколения	15
<i>Митрофанова О.В.</i>	
Современное состояние и задачи разработок по технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (Pb, Pb-Bi).....	17
<i>Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю., Ульянов В.В., Воронин И.А.</i>	
Гидродинамика типичных раздающих коллекторных систем ЯЭУ: современные представления и перспективы исследования	18
<i>Дельнов В.Н.</i>	
Проблемы физики и теплогидравлики в реакторах, охлаждаемых водой сверхкритического давления	19
<i>Глебов А.П.</i>	
Целевые показатели и характеристики АЭС для обеспечения конкурентоспособности на мировом рынке	20
<i>Махин В.М., Пиминов А.А., Кулаков А.В., Семешкин В.П., Чусов И.А.</i>	
Гидродинамика теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА различных конструкций.....	22
<i>Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Лыскова В.Э., Пронин А.Н., Рубцова Е.В., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е.</i>	
Кипение жидкости, недогретой до температуры насыщения: механизм процесса, инженерные проблемы	24
<i>Зейгарник Ю.А., Васильев Н.В.</i>	
Фрагментация жидкометаллических капель при паровых взрывах: возможные механизмы и практические приложения	27
<i>Ивочкин Ю.П.</i>	
Секция 1. Физическая химия и технология жидкометаллических теплоносителей	
Концептуальные исследования высокотемпературной ядерной энерготехнологии для производства водорода и других инновационных приложений	29
<i>Сорокин А.П., Гулевич А.В., Клинов Д.А., Кузина Ю.А., Камаев А.А., Иванов А.П., Алексеев В.В., Морозов А.В.</i>	
Оценки состава гетерогенной системы натрия – кислород – водород	33
<i>Алексеев В.В., Борисов В.В., Камаев А.А., Ганичев Н.С., Сулягин И.А.</i>	
Расчетно-теоретическая оценка параметров, ответственных за совместимость металлических материалов с жидким сплавом Sn-20% Li	35
<i>Красин В.П., Союстова С.И.</i>	
Исследование механизма шлаконакопления в контурах со свинецсодержащими теплоносителями и его предотвращение высокотемпературной обработкой смесями водорода и водяного пара.....	37
<i>Кошелев М.М., Ульянов В.В., Харчук С.Е.</i>	

Повышение коррозионной стойкости конструкционных материалов стенов и установок с ТЖМТ	39
<i>Харчук С.Е., Асхадуллин Р.Ш., Ульянов В.В., Кошелев М.М.</i>	
Исследование геттерной очистки натрия от кислорода	41
<i>Кузина Ю.А., Алексеев В.В., Сорокин А.П., Воронин И.А., Коновалов М.А., Зыкова Р.О.</i>	
Поведение химически-реагирующих органических примесей в циркулирующем натриевом контуре	43
<i>Загорюлько Ю.И., Ганичев Н.С., Коновалов М.А.</i>	
Проблемы определения науглероживающего потенциала натриевого теплоносителя ..	44
<i>Загорюлько Ю.И., Ганичев Н.С., Коновалов М.А.</i>	
Оценка неопределенности растворимости кислорода в расплаве свинца	45
<i>Легких А.Ю., Скоморохов А.Н., Садовничий Р.П.</i>	
Исследование характеристик гранул оксида свинца после длительной выдержки в жидком свинце	46
<i>Скобеев Д.А., Легких А.Ю.</i>	
Вопросы нормативного регулирования химических режимов теплоносителей на АЭС России с реакторами на быстрых нейтронах	47
<i>Харитонова Н.Л., Шарафутдинов Р.Б., Хренников Н.Н.</i>	
Оценка низкокислородной границы плюмбоферритных фаз в расплаве свинца	49
<i>Осипов А.А., Асхадуллин Р.Ш., Лаврова О.В., Иванов К.Д., Ниязов С.-А.С., Чепоров Р.Ю.</i>	
К вопросу о влиянии дисперсных оксидов железа на термодинамическое состояние ТЖМТ в неизотермических условиях	50
<i>Осипов А.А., Иванов К.Д., Ниязов С.-А.С.</i>	
О возможности оценки содержания дисперсных оксидов железа в ТЖМТ в рамках нестехиометрической модели	51
<i>Осипов А.А., Иванов К.Д.</i>	
Диссоциация оксидов железа в расплавах тяжелых металлов	52
<i>Осипов А.А., Иванов К.Д.</i>	
Термодинамическая оценка устойчивости оксидных систем применительно к материалам датчика контроля кислорода в натрии	53
<i>Лаврова О.В., Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю.</i>	
Влияние свойств покрытий на теплообмен при охлаждении высокотемпературных цилиндрических тел	54
<i>Молотова И.А., Забиров А.Р., Виноградов М.М., Ягов В.В.</i>	
Измерение скорости звука в жидком свинце в широком диапазоне плотности	56
<i>Кондратьев А.М., Рахель А.Д.</i>	
Поверхностное натяжение эвтектического расплава свинец-висмут в вакууме и атмосфере воздуха	57
<i>Алчагиров Б.Б., Канаметова О.Х., Хибиев А.Х., Дышекова Ф.Ф.</i>	
От анализа свойств пульсаций к количественным характеристикам переноса. Эффект структурирования дисперсии пульсаций	59
<i>Осипов А.А.</i>	
Применение нестехиометрической модели к оценке поверхностных эффектов в системе оксид железа — расплав свинца	60
<i>Осипов А.А., Иванов К.Д., Асхадуллин Р.Ш.</i>	

Исследование теплофизических свойств жидкометаллических теплоносителей при высоких давлениях в экспериментах по электрическому взрыву фольг	61
<i>Кондратьев А.М., Коробенко В.Н., Рахель А.Д.</i>	
Исследование диффузионного выхода железа из стали ЭП-823 в расплав свинца	63
<i>Иванов К.Д., Асхадуллин Р.Ш., Осипов А.А., Ниязов С.-А.С.</i>	
Секция 2. Гидродинамика и теплообмен в реакторных установках с жидкометаллическими теплоносителями	
Экспериментальные и расчетные исследования процесса кипения жидкого металла при развитии аварии в быстром реакторе: теплообмен и устойчивость циркуляции	65
<i>Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Кузина Ю.А., Сорокин Г.А., Денисова Н.А., Низовцев А.А., Привезенцев В.В.</i>	
Результаты экспериментальных исследований характеристик проточных частей осевых насосов, перекачивающих тяжелый жидкометаллический теплоноситель, в обоснование главных циркуляционных насосов контуров со свинцовым теплоносителем.....	68
<i>Бокова Т.А., Боков П.А., Львов А.В., Волков Н.С., Маров А.Р.</i>	
Расчётный анализ теплогидравлической устойчивости обратного парогенератора ИЯУ МБИР.....	69
<i>Семченков А.А., Кустова И.Н., Никель О.А., Кабанов Ю.А.</i>	
Экспериментальное исследование подшипников скольжения насосов применительно к исследовательским и реакторным контурам с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.....	71
<i>Безносков А.В., Бокова Т.А., Боков П.А., Маров А.Р., Волков Н.С., Львов А.В.</i>	
Особенности теплогидравлики активных зон быстрых натриевых реакторов-наработчиков малой и большой мощности для системы замкнутого топливного цикла	73
<i>Лубина А.С.</i>	
Моделирование теплогидравлических процессов в сложных каналах судовых ЯЭУ....	75
<i>Митрофанова О.В., Байрамуков А.Ш., Старовойтов Н.А., Федоринов А.В.</i>	
Исследование влияния формоизменения элементов активной зоны на установление температурного режима в реакторе на быстрых нейтронах в процессе кампании.....	77
<i>Гордеев С.С., Сорокин А.П.</i>	
О влиянии содержания кислорода на теплообмен при поперечном обтекании парогенерирующих труб в режимах нормального теплообмена и с замораживанием свинца	78
<i>Грабежная В.А., Михеев А.С., Крюков А.Е.</i>	
Конструктивная схема и контур циркуляции реакторного блока на быстрых нейтронах с горизонтальным парогенератором БРС	80
<i>Безносков А.В., Бокова Т.А., Боков П.А.</i>	
Секция 3. Гидродинамика и теплообмен в водоохлаждаемых реакторах	
Экспериментальное моделирование процессов перемешивания петлевых потоков теплоносителя в опускной камере ядерного реактора	81
<i>Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.</i>	
Исследование влияния перемешивающих решеток на расхолаживание ТВС-2М в условиях повторного залива.....	83
<i>Сергеев В.В., Лоцинин В.М., Гальченко Э.Ф.</i>	

Экспериментальные исследования критических тепловых потоков в активной зоне реакторной установки РИТМ-200 АСММ.....	84
<i>Куприянов А.В., Самойлов О.Б., Шипов Д.Л., Осин А.Б., Сорокин В.Д.</i>	
Экспериментальное исследование особенностей растворимости борной кислоты в паре при кипении теплоносителя реактора ВВЭР в случае аварии	85
<i>Сахингареев А.Р., Шлепкин А.С., Морозов А.В.</i>	
Обзор современных концепт-проектов энергетических реакторов с водяным теплоносителем сверхкритических параметров.....	87
<i>Сахингареев А.Р., Шлепкин А.С., Морозов А.В.</i>	
Постановка задачи в обоснование возбуждения колебаний твэлов при наличии винтообразного вихря	88
<i>Шутилов В.В., Авдеев Е.Ф.</i>	
Разработка и автоматизация измерения и регулирования расхода в ячейках твэл модельных ТВС.....	90
<i>Авдеев Е.Ф., Смирнова В.О.</i>	
Теплогидравлический расчет экономайзера для парогенератора перспективной РУ с ВВЭР	92
<i>Лякишев С.Л., Короткова О.В., Блохина А.Н., Шарый Н.В.</i>	
Определение комплекса теплофизических свойств водных растворов борной кислоты при параметрах, характерных для аварийного режима ВВЭР	93
<i>Морозов А.В., Шлепкин А.С., Сахингареев А.Р.</i>	
Применение аэрозольного мелкодисперсного спрея для повышения эффективности охлаждения оребренных труб.....	94
<i>Шлепкин А.С., Морозов А.В.</i>	
Секция 4. Тепломассообмен, магнитная гидродинамика, вибрации и акустика в энергетических установках	
Многофункциональное магнитогидродинамическое устройство	95
<i>Логонов Н.И.</i>	
Особенности формирования гидродинамических нагрузок на твэлы в зависимости от структуры течения теплоносителя на входе в ТВС ВВЭР	97
<i>Перевезенцев В.В.</i>	
Теплообмен при смешанной конвекции жидких металлов в вертикальных каналах	99
<i>Беляев И.А., Сардов П.А., Лучинкин Н.А., Разуванов Н.Г.</i>	
Исследование специфики МГД-течения жидкого металла в условиях неоднородного обогрева	100
<i>Беляев И.А., Сардов П.А., Листратов Я.И.</i>	
Термоакустический эффект и его применение	102
<i>Верещагина Т.Н., Михеев А.С., Кудряева Ю.В.</i>	
Испытания привода СУЗ ШЭМ-3 на стойкость к сейсмическим воздействиям для условий площадки блоков № 3, 4 АЭС «Куданкулам»	103
<i>Селезнев А.В., Макаров В.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В., Пучков М.В., Носенко А.П., Егоров Ю.В.</i>	
Исследование теплогидравлики имитатора расплава соли при течении в канале в условиях неоднородного обогрева	104
<i>Белавина Е.А., Беляев И.А., Пятницкая Н.Ю.</i>	

Секция 5. Расчетные модели, коды и результаты численного моделирования

Полное описание механики турбулентности в текущей жидкости	106
<i>Щербаков С.И.</i>	
Тестовые расчеты гидродинамики раздающих коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ	108
<i>Лунина С.В., Дельнов В.Н.</i>	
Применение приближения анизотропного пористого тела для исследования процессов тепломассопереноса в пучках стержней с различными способами дистанционирования, охлаждаемых жидкометаллическим теплоносителем	109
<i>Баясхаланов М.В., Меринов И.Г., Харитонов В.С., Корсун А.С.</i>	
Диффузия нанопузырьков в металлическом топливе: результаты молекулярно-динамического моделирования	111
<i>Антропов А.С., Стегайлов В.В.</i>	
Диффузия дефектов в металлических топливах: результаты первопринципных расчетов и атомистического моделирования	113
<i>Смирнов Г.С., Стегайлов В.В.</i>	
Совершенствование физико-математических моделей двухфазной теплогидравлики при модернизации системных кодов для обоснования безопасности ЯЭУ с ВВЭР.....	114
<i>Корниенко Ю.Н., Чуркин А.Н., Быков М.А.</i>	
Разработка и верификация трёхмерной модели разрушения активной зоны — интегрального кода Евклид/V2	116
<i>Бутов А.А., Климонов И.А., Кудашов И.Г., Сычева Т.В., Усов Э.В., Чухно В.И.</i>	
Расчетный анализ одновременно возникающих запроектных аварий на энергоблоках № 3 и 4 БАЭС.....	118
<i>Анфимов А.М., Кириллов И.Н., Кузнецов Д.В., Никаноров О.Л., Салеев А.В.</i>	
Расчетно-аналитические исследования образования и накопления отложений в контуре с ТЖМТ в рамках согласованной модели протекания физико-химических процессов	119
<i>Авдеенков А.В., Ачаковский О.И.</i>	
Моделирование уноса капель в струйно-вихревом конденсаторе системы локализации аварий ВВЭР-440	120
<i>Казанцев А.А., Супотницкая О.В., Сергеев Вл.В.</i>	
Особенности расчетного моделирования тепловых режимов бассейнов выдержки БиАЭС.....	121
<i>Сергеев Вл.В.</i>	
Расчет мощности прямотрубного парогенератора с жидкометаллическим теплоносителем	123
<i>Блохина А.Н., Лякишев С.Л., Короткова О.В.</i>	
Валидация кодов КОРСАР/ГП и СОКРАТ/В1 для условий потери охлаждения бассейна выдержки отработанного ядерного топлива.....	124
<i>Бедретдинов М.М., Степанов О.Е.</i>	
Расчет параметров газовой среды в контейнменте АЭС с учетом полного адиабатического сгорания водорода кодом КУПОЛ-М	125
<i>Кругликов Ю.С., Супотницкая О.В., Янцева Л.М.</i>	
Об анализе чувствительности результатов тепловых расчетов ТУК к неопределенностям в исходных данных при использовании ANSYS	126
<i>Курындин А.В., Киркин А.М., Каримов А.З., Карякин М.Ю.</i>	

Расчетное исследование фильтрующих аппаратов на постоянных магнитах применительно к контурам водо-водяных реакторных установок	127
<i>Мамаев А.В., Рязанов Р.Р., Соборнов А.Е., Котин А.В., Треушников М.В.</i>	
Секция 6. Датчики, системы контроля и оборудование для реакторных установок	
Технология ТПТС для построения систем любого класса безопасности.....	129
<i>Артемьев К.П., Гриценко С.Ю.</i>	
Система охлаждения импульсного реактора периодического действия	131
<i>Грибачёва В.А., Щербаков С.И.</i>	
Аттестация датчика контроля термодинамической активности кислорода в расплаве свинца для реакторных установок в качестве средства измерения утвержденного типа.....	133
<i>Садовничий Р.П., Скоморохов А.Н., Асхадуллин Р.Ш., Левченко В.М., Лунина С.В., Легких А.Ю.</i>	
Опыт использования газовых датчиков ТДА кислорода в экспериментах по испытаниям конструкционных сталей в ТЖМТ	134
<i>Ниязов С-А.С., Чепоров Р.Ю., Иванов К.Д., Осипов А.А.</i>	
Повышение тепловой мощности парогенератора для перспективных РУ С ВВЭР	135
<i>Короткова О.В., Лякишев С.Л., Блохина А.Н.</i>	
Гидравлика газлифтного зонда со свинцовым теплоносителем	136
<i>Верещагина Т.Н., Лемехов В.В., Моркин М.С.</i>	
Оценка чувствительности газлифтного зонда в системе контроля герметичности оболочек твэлов по модели растворения/дегазации газообразных продуктов деления в свинцовом теплоносителе	137
<i>Гончар Н.И., Моркин М.С.</i>	
Экспериментальное исследование применимости твердого оксидного электролита для определения нижней границы контроля кислорода в натрии.....	140
<i>Блохин В.А., Борисов В.В., Жмурин В.Г., Засорин И.И., Камаев А.А., Пахомов И.А.</i>	
Секция 7. Использование технологий ядерной энергетики в других отраслях	
Поддержание качества свинецсодержащих теплоносителей в перспективных технологиях переработки органического и неорганического сырья	141
<i>Ульянов В.В., Кошелев М.М., Харчук С.Е.</i>	
Моделирование процессов теплопереноса в перспективном комплексе «сталь – жидкометаллический кристаллизатор», решающем задачу утилизации тепла машин непрерывного литья заготовок	143
<i>Ульянов В.В., Кошелев М.М., Коновалов М.А., Харчук С.Е.</i>	
О возможности создания природоподобных биохимических аккумуляторов для накопления низкопотенциальной тепловой энергии АЭС.....	144
<i>Сахингареев Д.Р.</i>	

Пленарные доклады

В.И. Субботин — основатель научной школы «Тепломассоперенос, физическая химия и технология теплоносителей в энергетических системах» (к 100-летию со дня рождения)

Арнольдов М.Н.¹, Орлов Ю.И.¹, Сорокин А.П.¹, Рачков В.И.²

¹ Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации — физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск
sorokin@ippe.ru

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва

Ключевые слова: научная школа, ядерные реакторы, вода, жидкие металлы, эксперимент, расчетные коды, активная зона, бак реактора, коллекторные системы, гидродинамика, тепломассообмен, контактное сопротивление, кризис теплообмена, турбулентный перенос, кипение, конденсация, физическая химия, технология, примеси, контроль, очистка, безопасность.

Формирование научной школы «Тепломассообмен, физическая химия и технология теплоносителей в энергетических системах» связано с развитием в нашей стране и в мире программы создания ядерных энергетических установок (ЯЭУ) для атомных электростанций (АЭС), флота и космоса, а также с решением новых задач – термоядерные и электроядерные установки и нейтронно-генерирующие мишени, (водородная энергетика). Реализация этой программы началась в 50-е годы прошлого столетия. В нашей стране она была связана с разработкой ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями (ЖМТ) и теплоносителем вода [1–5].

Основателем создания и научным руководителем научной школы явился академик Валерий Иванович Субботин. В.И. Субботин родился 12 декабря 1919 г. в г. Баку в семье военного моряка. В 1937 г. он окончил с золотой медалью школу в Баку и поступил в Азербайджанский индустриальный институт на энергетический факультет. В марте 1942 г. после окончания института В.И. Субботин был призван в Красную Армию и направлен в Артиллерийскую академию имени Ф.Э. Дзержинского. В июле он заболел, был отчислен из академии и до декабря 1942 г. находился на излечении в госпиталях.

С января 1943 г. В.И. Субботин работал в монтажном управлении «Кавказэнерго-монтаж» в должности инженера, затем прораба. В возрасте 26 лет он был назначен начальником монтажа Ткварчельской ТЭС в Абхазии. Успешно развивающейся карьере инженера-руководителя В.И. Субботин предпочёл занятия наукой и в 1948 г. поступил в аспирантуру при Энергетическом институте Академии наук Азербайджанской ССР, в 1952 г. защитил кандидатскую диссертацию и остался работать в этом институте. Здесь он прошел путь от младшего научного сотрудника до ученого секретаря.

В 1953 г. жизнь Валерия Ивановича кардинально изменилась. 8 июня 1953 г. вышло постановление Правительства СССР «О мероприятиях по развитию Лаборатории

«В» Первого главного управления при Совете Министров СССР». В одном из первых пунктов постановления Совмина говорилось: «Обязать Академию наук СССР, Министерство сельского хозяйства и заготовок СССР и Академию наук Азербайджанской ССР откомандировать в распоряжение Первого главного управления при Совете Министров СССР для постоянной работы в Лаборатории «В» следующих научных работников: канд. физ.-мат. наук Марчука Г.И. из «Геофизического института Академии наук СССР», канд. физ.-мат. наук Булеева Н.И. из «Центрального института прогнозов Министерства сельского хозяйства и заготовок СССР» и канд. тех. наук Субботина В.И. из «Энергетического института Академии наук Азербайджанской ССР».

В Лаборатории «В» В.И. Субботин принял под свое руководство теплофизическую лабораторию из 30 человек. Приход ВИС по времени совпал с завершающей стадией работ по строительству и подготовке к пуску Первой в мире атомной станции (начатое по инициативе И.В. Курчатова), уже было принято решение о строительстве наземного стенда-прототипа ядерной энергетической установки (ЯЭУ) для атомной подводной лодки (АПЛ) с теплоносителем вода, а при разработке реакторов с жидкометаллическими теплоносителями (ЖМТ) были выбраны: для АЭС с реакторами на быстрых нейтронах — натрий, ЯЭУ для АПЛ — эвтектический сплав свинец-висмут, а для ЯЭУ космических аппаратов — эвтектический сплав натрий-калий (в перспективе — литий).

Молодой энергичный ученый с первых дней работы включился в решение сложнейших теплофизических и технологических проблем по созданию новых ЯЭУ, разрабатываемых под руководством И. В. Курчатова, А. П. Александрова и А. И. Лейпунского.

С самого начала проявился стиль работы В.И. Субботина как руководителя научного коллектива. Для этого стиля были характерны достаточная жесткость и высокая требовательность к себе и подчиненным, стремление опираться в решении научных и технических задач на мнение научного коллектива. В научной работе для стиля В.И. Субботина был характерен комплексный подход. Исследовались: теплогидравлика, механизмы турбулентного теплообмена, кипение и конденсация жидких металлов, физическая химия и технология ЖМТ, теплофизика термоэмиссионных преобразователей, жидкие металлы — рабочее тело, тепловые трубы.

На всех этапах их выполнения большое внимание уделялось фундаментальным исследованиям. Разработка новых методик и перспективной техники измерений, включая создание уникальных датчиков температуры, скорости, контроля концентрации примесей и др., всегда была одной из главных задач руководимого им коллектива.

Основной заботой Валерия Ивановича всегда были кадры. Он поддерживал молодых научных сотрудников в работе, всячески поощрял их намерение подготовить и защитить диссертацию, а зачастую инициировал эту работу, создавал благоприятствующие условия. В результате молодые специалисты быстро росли, защищали диссертации и становились учеными, имеющими высокий авторитет в научных кругах.

В 1954 году на специально созданном первом водяном стенде высокого давления (100 ата) были испытаны все партии твэлов реактора АМ Первой АЭС. Они позволили внести необходимые изменения в технологию изготовления твэлов, что обеспечило успешный пуск Первой АЭС. В дальнейшем работы по воде получили развитие в связи с созданием реактора для первой атомной подводной лодки. Была доказана необходимость уменьшения допустимых критических тепловых потоков, заложенные в проект первой АПЛ.

О значимости результатов, полученных в 1953–1954 гг. в коллективе теплофизиков, и положительной оценке его работы свидетельствует тот факт, что в июле 1954 г. В.И. Субботин был назначен начальником вновь созданного теплофизического отдела. В дальнейшем работы по ЯЭУ с теплоносителем вода получили развитие в ФЭИ благодаря поддержке И.В. Курчатова и А.П. Александрова. За участие в создании атомной



Рис. 1. Руководство теплофизического сектора ФЭИ (начало 1960-х годов)

подводной лодки с водо-водяным реактором В.И. Субботин был награжден орденом «Знак Почета» (1959 г.). Комплексные исследования в ФЭИ по данной тематике легли в основу проектирования и эксплуатации реакторов энергетических установок Белоярской АЭС, Нововоронежской АЭС, транспортной установки ТЭС-3, Билибинской АЭС, ПЛА, атомного ледокола «Ленин» и других. В настоящее время эта тематика составляет существенную часть работ теплофизического коллектива (рис. 1).

Но главной задачей, на решение которой В.И. Субботин мобилизовал коллектив, было научно-техническое обоснование теплогидравлики, физической химии и технологии уникальных вновь создаваемых ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями.

В результате комплексных исследований под руководством В.И. Субботина был обоснован подход к изучению теплоносителей как сложной многокомпонентной гетерогенной системы, состояние которой определяется взаимодействием теплоноситель – примеси – конструкционные (технологические) материалы – защитный газ.

В конце 1950-х годов в периодической печати появилась статья академика А.П. Александрова, в которой высоко оценивались работы по исследованию температурных полей и турбулентной структуры потока жидкого металла. По результатам этих работ Валерием Ивановичем в 1959 году была защищена докторская диссертация, а в 1960 году ему присвоено звание профессора. В 1964 г. на базе теплофизического отдела был сформирован Теплофизический сектор. ФЭИ стал исполнять функции головной организации Министерства среднего машиностроения СССР по теплофизике реакторов с жидкометаллическим и водяным охлаждением. На Теплофизический сектор была возложена координация исследований по теплофизике ЯЭУ, выполняемых в организациях атомной отрасли и других ведомствах. В 1969 году В.И. Субботина назначают заместителем директора ФЭИ по научной работе.

Получение указанных результатов стало возможным благодаря исследованиям по физико-химическому обоснованию применения ЖМТ в ЯЭУ различного назначения и созданным на их основе систем и аппаратов для реализации технологических процессов очистки теплоносителей от примесей и контроля за их содержанием. В дальнейшем эти работы получили широкое развитие.

При разработке корабельной ЯЭУ со свинцово-висмутовым теплоносителем, создаваемой под научным руководством А.И. Лейпунского, В.И. Субботин отвечал за комплекс работ по обоснованию теплогидравлики теплоносителя.

В критической ситуации (авария на АПЛ проекта 645) ведущие специалисты теплофизического сектора были привлечены к решению возникшей проблемы, связанной с технологией свинцово-висмутового теплоносителя (рис. 2). В результате проведенных исследований впервые в мире были изучены физико-химические закономерности сис-

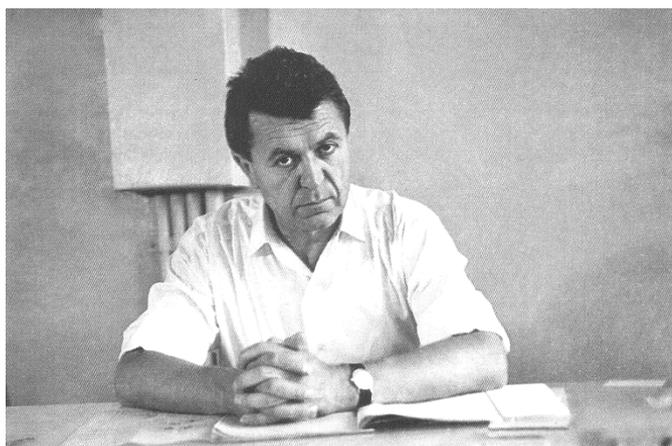


Рис. 2. В.И. Субботин: было о чем задуматься ...

темы «теплоноситель свинец-висмут – конструкционные материалы – примеси (кислород)» и на их основе разработаны научно-технические рекомендации по поддержанию качества теплоносителя. За активное участие в обосновании и реализации проекта этой АПЛ ему в числе других была присуждена Ленинская премия (1964 г.).

Под руководством В.И. Субботина были проведены обширные исследования по обоснованию теплогидравлических параметров ЯЭУ космического назначения «БУК» и «Тополь» и технологии натрий-калий теплоносителя для этих установок. Когда возникли сомнения по работоспособности твэлов установки БУК, было сделано всё возможное для выполнения решения, принятого А.И. Лейпунским, о срочном проведении испытаний на модернизированном экспериментальном стенде. В результате была продемонстрирована работоспособность твэлов. В 1971 году за вклад в обоснование работоспособности космической ЯЭУ БУК Валерий Иванович был награжден орденом Октябрьской Революции.

В 1975 году В.И. Субботин был переведен на работу в Москву директором вновь создаваемой широкопрофильной организации НПО «Энергия» Министерства энергетики и электрификации СССР. Находясь на этой должности, он приложил много сил для создания принципиально нового института в атомной энергетической отрасли, занимающегося научным и техническим сопровождением эксплуатации атомных электростанций – ВНИИАЭС. Он также был инициатором и добился создания нового для атомной отрасли института – ВНИИАМ.

В 1977–1988 годах В.И. Субботин работал заведующим кафедрой теплофизики в МИФИ. За время его работы в этой должности состав кафедры вырос с 39 до 120 человек; три сотрудника защитили докторские диссертации, более 30 – кандидатские, С.Б. Шихов получил Государственную премию. Кафедра стала одной из наиболее крупных и значимых в МИФИ.

Признанием высокого авторитета В.И. Субботина в стало избрание его в 1968 г. членом-корреспондентом Академии наук СССР, а в 1987 г. – действительным членом Академии наук СССР. В 1988 г. Валерий Иванович после избрания его членом Президиума академии перешёл на работу в Академию наук СССР. В эти годы совместным решением Академии и Минсредмаша ему было поручено возглавить комиссии по анализу безопасности АЭС с реакторами ВВЭР и БН-800.

В 1991 году по приглашению директора ФЭИ М.Ф. Троянова Валерий Иванович вернулся в ФЭИ в качестве научного руководителя института. Многие помнят его встречи с научными коллективами института, продолжительные обсуждения состояния и перспектив исследований, вдохнувшие надежду на перемены к лучшему.

В последние годы своей жизни Валерий Иванович – советник Президиума РАН и начальник лаборатории в Институте машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, главный научный сотрудник Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН. В Институте теоретической и экспериментальной физики РАН В.И. Субботин последние четыре года своей жизни руководил работой Совета по физико-техническому анализу энергетических систем. Основное направление работы этого Совета – определить, какой именно должна быть новая энергетика в России. Кроме этого, В.И. Субботин был членом разных научных советов РАН, Минатома и редколлегий нескольких научных журналов.

Валерия Ивановича нет с нами. Но остались созданные им Теплофизический коллектив и научная школа теплофизиков ФЭИ. Лучшие традиции этой школы сохраняются и развиваются учениками, соратниками и последователями Валерия Ивановича Субботина.

Список литературы

1. Ефанов А.Д., Козлов Ф.А., Рачков В.И., Сорокин А.П., Черноног В.Л. Научная школа ГНЦ РФ – ФЭИ «Тепло- и массоперенос, физическая химия и технология теплоносителей в энергетических системах // Сборник «60-летие создания ТФ отдела ФЭИ». – Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ – ФЭИ, 2014. – 39 с.
2. Рачков В.И., Калякин С.Г., Кухарчук О.Ф., Орлов Ю.И., Сорокин А.П. От первой АЭС до ЯЭУ IV поколения (к 60-летию Первой в мире АЭС) // Теплоэнергетика. – 2014. – № 5. – С. 11–19.
3. Рачков В.И., Арнольдов М.Н., Ефанов А.Д., Калякин С.Г., Козлов Ф.А., Логинов Н.И., Орлов Ю.И., Сорокин А.П. Использование жидких металлов в ядерной, термоядерной энергетике и других инновационных технологиях // Теплоэнергетика. – 2014. – №5. – С. 20–30.
4. Кузина Ю.А., Сорокин А.П. Теплофизика щелочных жидких металлов. Часть 1: теплогидравлика и безопасность (ретроспективно-перспективный взгляд) // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2019. – № 3. – С. 210–232. <https://vant.ippe.ru/year2019/3/thermal-physics-hydrodynamics/1765-19.html>
5. Кузина Ю.А., Сорокин А.П. Теплофизика щелочных жидких металлов. Часть 2: технология и инновационные приложения (ретроспективно-перспективный взгляд) // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2019. – № 3. – С. 233–251. <https://vant.ippe.ru/year2019/3/thermal-physics-hydrodynamics/1766-20.html>

Жидкие металлы в термоядерной энергетике

Асхадуллин Р. Ш., Арнольдов М. Н.

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

Ключевые слова: термоядерный реактор, ТОКАМАК. бланкет, дивертор, тритий, литий, олово, свинец, сплав свинец-висмут, натрий, теплофизические свойства, ИТЭР.

Доклад посвящен обзору литературных сведений о ядерных, физико-химических и теплофизических свойствах металлов и их сплавов с литием, которые предлагаются для использования в качестве теплоносителя и тритий-воспроизводящего вещества в термоядерных реакторах типа ТОКАМАК.

Широко рассматривается в таком качестве сплав свинца и лития ($^{83}\text{Pb}-^{17}\text{Li}$). Несмотря на большой объём выполненных исследований, показано, что представленные данные по теплофизическим и другим свойствам этого сплава имеют невысокую точность. Коррозионная активность этого сплава достаточно велика.

Поэтому рассмотрены свойства сплавов лития с другими металлами, которые могут обладать необходимыми свойствами как теплоносители и тритий-воспроизводящее вещество. К этим сплавам относятся тройной сплав свинца, висмута и лития, сплав олова и лития, сплав натрия и лития. Однако все эти сплавы имеют значительную электропроводность, что может затруднить их использование из-за высокого магнитогидродинамического сопротивления, которое может достигать десятков МПа, вследствие воздействия сильных магнитных полей.

Следует отметить, что естественный металлический литий обладает хорошими теплофизическими и бридерными свойствами. Он хорошо изучен как теплоноситель ядерных реакторов деления и представляется одним из наиболее подходящих теплоносителей и тритий воспроизводящих сред для проектируемых термоядерных энергетических установках.

Как известно, тепло, выделяемое в бланкете сооружаемого реактора ИТЭР, предполагается снимать с помощью воды. Вместе с тем отдельные секции этого бланкета предназначены для исследования других сред для снятия тепла и воспроизводства трития, в том числе, и жидкометаллических.

По мнению академика Е. П. Велихова, окончательный выбор теплоносителя и тритий-воспроизводящего вещества может быть сделан только на основе опыта, приобретённого на основе сооружаемой в настоящее время установки ИТЭР.

Проблемы повышения теплогидравлической эффективности и надежности работы транспортных ЯЭУ нового поколения

Митрофанова О. В.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва
omit@yandex.ru

Ключевые слова: транспортные ядерные энергетические установки, парогенерирующие системы, гидродинамика, теплообмен, математическое моделирование, акустика, резонансные эффекты, теплогидравлическая эффективность.

Многолетний опыт эксплуатации судов и кораблей с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) позволяет выявить ряд актуальных проблем, решение которых необходимо для повышения теплогидравлической эффективности и надежности работы транспортных ЯЭУ. К таким проблемам можно отнести: низкий КПД реакторной установки, зависящий не только от эффективности паросилового цикла, но и непосредственно от внутреннего устройства парогенерирующих систем; снижение ресурсных показателей трубных систем парогенераторов из-за наводораживания титановых сплавов в зонах трубных соединений; повышенную шумность при работе на номинальных режимах циркуляции теплоносителя при увеличении мощности ЯЭУ; засоление трубных систем парогенераторов в результате попадания забортной воды в конденсатно-питательную систему в процессе эксплуатации и др.

Необходимость решения перечисленных выше проблем выдвинули на первый план следующие направления, по которым проводились теплофизических исследования:

- выявление механизмов генерации закрутки потока и вихревой структуризации течений в сложных каналах многоконтурной циркуляции теплоносителя и рабочих сред и их влияния на безопасность и надежность работы транспортных ЯЭУ;
- выявление причин, вызывающих эффект снижения теплогидравлической эффективности ЯЭУ при повышении мощности ядерного реактора, и предложение способов его устранения;
- исследование механизмов генерации акустических колебаний и виброшумовых эффектов в теплогидравлическом контуре и других системах ЯЭУ;
- решение сопряженных задач, обусловленных влиянием сложной гидродинамики потоков теплоносителя и рабочих сред на процессы термоциклирования и генерацию акустических колебаний в различных частотных диапазонах с возникновением резонансных эффектов, что приводит к снижению прочностных характеристик конструкций.

В настоящей работе показано, что в различных элементах контуров циркуляции теплоносителя и рабочих сред системы компенсации давления (КД) и парогенерирующей системы ЯЭУ, имеющих изгибные участки с кривизной в различных плоскостях, змеевиковую геометрию, переменную площадь проходного сечения каналов, создаются условия, приводящие к крупномасштабному вихреобразованию и закрутке потока. При этом реализуется не только режим закрученного течения, но и эффект, который может быть назван кризисом закрученного потока.

С помощью проведенных вычислительных экспериментов, например, удалось установить, что физические условия, способствующие генерации закрутки потока и возникновению локальных температурных аномалий в системах КД, связаны с наличием конструктивных элементов, сочетающих в себе диффузорное расширение проходного сечения и изгибы каналов. Расчеты проводились с помощью универсальной программной системы ANSYS и использования модели турбулентности $k-\omega$ SST.

Важная роль в выбранной методологии теплофизических исследований отводится выбору критериев, необходимых для решения оптимизационных задач. Выбор критерия эффективности зависит от цели оптимизации и не является однозначным. В качестве целей могут быть выбраны: снижение массогабаритных характеристик установок, увеличение их полезной мощности, снижение потерь на собственные нужды, повышение надежности и безопасности работы, снижение экономических и материальных затрат.

Для определения критерия теплогидравлической эффективности применительно к парогенераторам транспортных ЯЭУ может быть рекомендовано соотношение двух параметров: мощности на прокачку теплоносителя N , отнесенной к единице объема V аппарата (N/V) и тепловой мощности $Q_T = \alpha F \Delta t$, отнесенной к единице объема и единичной разности температур ($Q_T / (V \Delta t) = \alpha F / V$). В этом случае оценка эффективности аппарата с оптимизированной геометрией каналов по сравнению с действующим прототипом может быть выражена критерием:

$$\Psi_1 = \left(\frac{\alpha F}{N} \right) / \left(\frac{\alpha_0 F_0}{N_0} \right), \quad (1)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, F — площадь поверхности теплообмена; индекс «0» относится к прототипу.

Формула (1) показывает, что критерий ψ_1 должен быть больше единицы в случае положительного эффекта оптимизации за счет уменьшения потерь мощности на прокачку рабочей среды. Значение критерия ψ_1 может также возрастать за счет дополнительной интенсификации теплообмена.

В случае использования интенсифицирующих устройств различной геометрии, влияние которых может быть учтено при определении гидравлического диаметра эквивалентного канала d_h , критерий эффективности ψ_1 может быть оценен для двух случаев:

1) при $\Delta P = const$ — условия постоянства потерь давления на прокачку:

$$\Psi_{11} = \left(\frac{\alpha l}{u d_h} \right) / \left(\frac{\alpha_0 l_0}{u_0 d_{h0}} \right), \quad (2)$$

где l и l_0 — соответственно длины каналов с интенсификацией и без интенсификации;

2) при постоянстве расхода теплоносителя в эквивалентном канале $G = \rho u S = const$, где ρ — плотность, u — средняя расходная скорость теплоносителя, S — проходное сечение канала:

$$\Psi_{12} = \left(\frac{\alpha l d_h}{\Delta P} \right) / \left(\frac{\alpha_0 l_0 d_{h0}}{\Delta P_0} \right). \quad (3)$$

Так, проведенные вычислительные эксперименты для парогенераторов змеевикового типа с круглыми трубами показали, что значение критерия теплогидравлической эффективности ψ_{12} может приближаться к значению 2 за счет перекомпоновки трубного пучка и изменения геометрии каналов в зоне перехода от опускного к подъемному движению питательной воды. При этом удается исключить эффект «запирания» расхода, соответствующий кризису закрученного потока и наличию зон рециркуляционного (возвратного) течения, что приводит к существенному снижению потерь давления ΔP на прокачку рабочего тела.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований — грант РФФИ 19-08-00223-а и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.а03.21.0005).

Современное состояние и задачи разработок по технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (Pb, Pb-Bi)

Асхадуллин Р. Ш., Легких А. Ю., Ульянов В. В., Воронин И. А.

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

Ключевые слова: реакторная установка, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, подготовка теплоносителя, очистка, поддержание заданного режима, массообменный аппарат, датчик активности кислорода, диспергатор газа, фильтр теплоносителя, фильтр газовый, обоснование характеристик, экспериментальная методика, модель.

Технология тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ) является комплексом мер, позволяющих:

- подготовить теплоноситель для заполнения первого контура реакторной установки (РУ);
- поддерживать условия в теплоносителе для обеспечения коррозионной стойкости конструкционных сталей;
- выполнять очистку теплоносителя от твердофазных шлаков как на основе оксидов свинца, так и на основе оксидов компонентов конструкционных сталей;
- выполнять очистку защитного газа от аэрозолей теплоносителя и продуктов коррозии;
- выполнять диагностику состояния контура.

К настоящему времени выполнен значительный объем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для реализации ТЖМТ в РУ «БРЕСТ-ОД-300» и РУ специального назначения.

К значимым достижениям в области технологии ТЖМТ можно отнести:

- создание установки для поверки датчиков активности кислорода (ДАК) и ее аттестацию в качестве эталона средств измерений РФ;
- аттестацию ДАК для РУ «БРЕСТ-ОД-300» в качестве средства измерения утвержденного типа;
- разработку методики расчета характеристик массообменных аппаратов (МА) с твердофазным источником кислорода, предназначенных для регулируемого ввода растворенного кислорода в ТЖМТ и её внедрение при разработке конструкций МА для РУ;
- результаты исследования характеристик наполнителя МА (гранулированного оксида свинца) после длительной выдержки в расплаве свинца;
- обоснование нескольких конструкций МА для применения в составе РУ;
- разработку методики расчета характеристик дожигателя водорода (ДВ) с твердофазным окислителем, предназначенного для удаления водорода из защитного газа РУ, а также её внедрение при разработке конструкций ДВ для РУ;
- обоснование конструкции рабочей части диспергатора газа, предназначенного для ввода газовой смеси в свинцовый теплоноситель;
- разработку методики экспериментального определения выхода железа из конструкционной стали в ТЖМТ;
- создание модели выхода железа из стали ЭП-823Ш в свинцовый теплоноситель;
- результаты измерения распределения кислорода в ТЖМТ на участке заданной геометрии для использования при верификации кодов расчета массопереноса;
- обоснование фильтрационных материалов для фильтров теплоносителя и защитного газа.

Гидродинамика типичных раздающих коллекторных систем ЯЭУ: современные представления и перспективы исследования

Дельнов В. Н.

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

Ключевые слова: гидродинамика, проточная часть, раздающая коллекторная система, теплообменник, ядерный реактор, ядерная энергетическая установка, научное открытие, закономерность, свойство, струя.

В работе рассмотрены вопросы гидродинамики типичных раздающих коллекторных систем теплообменников и реакторов ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

Выполнен анализ гидродинамических особенностей течения теплоносителя в РКС.

Приведены характерные схемы течения теплоносителя в проточных частях указанных РКС.

Представлена классификация различных типичных РКС.

Показано, что в относительно затесненной и свободной РКС течение теплоносителя имеет струйный характер. При этом имеет место несколько типов струй и процессов преобразования одних типов струй в другие.

Приведены краткое описание и формула зарегистрированной в виде научного открытия закономерности распределения теплоносителя на выходе из плоских и цилиндрических РКС с центральным и боковым подводом теплоносителя.

Рассмотрено свойство подобия гидродинамики в плоской и цилиндрической РКС, отличающихся местом подвода теплоносителя в коллектор.

Предложены перспективные направления исследования гидродинамики РКС, направленные на выявление гидродинамических эффектов в РКС и получением дополнительной информации о влиянии различных факторов на течение теплоносителя в ней.

Список литературы

- 1 Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н. Особенности гидродинамики коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ. — Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. — 215 с.

Проблемы физики и теплогидравлики в реакторах, охлаждаемых водой сверхкритического давления

Глебов А. П.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Обнинск, glebov@ippe.ru

Ключевые слова: ядерный реактор, охлаждаемый водой сверхкритического давления, перспективные реакторы IV-поколения, прямоточная одноконтурная схема, быстрый спектр нейтронов, коэффициент воспроизводства топлива, отработанное ядерное топливо, МОХ-топливо, замкнутый топливный цикл, закономерность.

Ядерный реактор, охлаждаемый водой сверхкритического давления (ВВЭР-СКД) — SCWR (Supercritical Water-cooled Reactor), принят в качестве одного из перспективных реакторов IV-поколения в рамках Международного форума «Поколение-IV» (МФП). По этой программе концептуальные предложения SCWR разрабатывают более 45 организаций в 16 странах с развитой атомной энергетикой. Концепция SCWR основывается на реализации прямоточной одноконтурной схемы ЯЭУ, охлаждаемой водой СКД. Внедрение ЯЭУ этого типа позволит повысить КПД до 45%, увеличить коэффициент воспроизводства топлива, снизить металлоемкость и строительные объемы, улучшить экономические и экологические показатели.

Страны, участвующие в МФП по направлению SCWR, первоочередной задачей считают разработку реактора с тепловым спектром нейтронов и урановым топливом, а на последующих этапах, при увеличении проблем с хранением отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и младшими актинидами (МА), возможен переход к реактору с быстрым спектром нейтронов, МОХ-топливу и замкнутому топливному циклу (ЗТЦ). В рамках МФП разрабатываются различные варианты SCWR, отличающиеся параметрами теплоносителя и схемами его циркуляции в активной зоне. Созданы группы по исследованию вопросов физики, теплогидравлики, теплообмена, материалов, подготовки кадров.

В течение ~15 лет в ГНЦ РФ – ФЭИ, ОКБ «Гидропресс», НИЦ «Курчатовский институт» проведены исследования с реакторами ВВЭР-СКД с тепловым и быстрым спектрами нейтронов, одно- и двухконтурными схемами охлаждения, средней и большой мощностями. В течение ~10 лет в ГНЦ РФ – ФЭИ и ОКБ «Гидропресс» выбран вариант и ведется совместная работа по концептуальному проекту ВВЭР-СКД — одноконтурная РУ с быстро-резонансным спектром нейтронов мощностью $N_3 = 1700$ МВт. Этот реактор признан перспективой развития технологии ВВЭР с возможностью использования уранового топлива и перехода в перспективе на МОХ-топливо на основе (U-Pu-Th) и к ЗТЦ.

При разработке ВВЭР-СКД необходимо решить комплекс научно-технических проблем: разработка и верификация расчетных кодов улучшенной оценки для нейтронной физики, гидродинамики и теплообмена воды СКД в тепловыделяющих сборках (ТВС) активной зоны и во всем реакторе; разработка конструкций ТВЭлов и ТВС, обоснование их работоспособности; анализ устойчивости реактора при переходных и аварийных режимах; выбор жаропрочных конструкционных материалов для ТВЭлов и корпуса реактора с высокой стойкостью к коррозии; обоснование и разработка оптимального водно-химического режима и др.

Некоторые из этих проблем исследуются при стендовых и петлевых испытаниях, но для решения большинства из них и обоснования технологии для последующего лицензирования, необходимо создание экспериментального — тестового — реактора. Применительно к реактору ВВЭР-СКД $N_3 = 1700$ МВт в работе приводятся результаты расчетов топливных циклов с МОХ и нитридным топливами, обосновывается использование ЯЭУ в ЗТЦ, обсуждаются проблемы теплообмена и теплогидравлики, предлагается вариант тестового реактора.

Целевые показатели и характеристики АЭС для обеспечения конкурентоспособности на мировом рынке

Махин В. М., Пиминов А. А., Кулаков А. В., Семишкин В. П., Чусов И. А.

Акционерное общество «Опытно-конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС»
(ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), Подольск
makhin@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: реактор, установка реакторная, энергоблок, безубыточность, конкурентоспособность, себестоимость, индикаторы, императивный, индикативный.

Рассматриваются целевые показатели АЭС для использования при проектировании реакторной установки и проектировании АЭС: приведенная стоимость электроэнергии, производимой энергоблоком — Levelised Unit Energy Costs (LCOE), относительный уровень стоимости капиталовложений, отнесенный к 1 кВт производимой электроэнергии — Total Capital Investment Cost (TCIC) и индикативные показатели.

LCOE определяет условия «безубыточности» АЭС за время ее эксплуатации. TCIC необходим для оценки стоимости капитальных вложений. LCOE и TCIC являются императивными, то есть показателями, обязательными для исполнения.

Подтверждены условия конкурентоспособности: LCOE должно быть менее LCOE действующих установок (АЭС, установок тепловой энергетики и других энергоустановок); TCIC должен быть менее 0,8 TCIC_{минимум} действующих АЭС.

Рассматриваются зарубежные индикативные показатели (индикаторы), которые применяются на стадии выполнения конструкторских и проектных работ. При их использовании возможно создание условий для выполнения указанных императивных требований по LCOE и TCIC.

По значениям TCIC можно выделить две группы стран: первая группа стран — OECD и США; вторая группа — Республика Корея и Китай. Значения TCIC для этих групп различаются в 2–3 раза (максимальное значение: 6220 долл./кВт — Венгрия и минимальное значение: 2020 долл./кВт — Республика Корея).

Различие в TCIC и LCOE в Корее и Китае (2-я группа) в сравнении с США и OECD (1-я группа) составляет: TCIC — 3000–6220 долл./кВт (1-я группа) и 1500–3000 долл./кВт (2-я группа); LCOE — 5–8 цент/(кВт·ч) и 3–5 цент/(кВт·ч). Ставка дисконтирования при расчетах LCOE и TCIC принята равной 5%. Возможные отклонения значений LCOE и TCIC составляют ±15%.

Причиной отмеченного различия для двух групп стран является не только разница в оплате труда и стоимости материалов и комплектующих, но и технические различия конструкций энергоблоков, в том числе отличие в электрической мощности.

В Корее разработан и эксплуатируется энергоблок с реактором APR-1400 (разработчик — KERSCO/KHNP) с электрической мощностью, выдаваемой в сеть, 1400 МВт, КПД энергоблока 35%. В реакторной установке APR-1400 применяются 2 петли (по 2 насоса на «холодной» части каждой петли) и 2 парогенератора (по одному парогенератору на каждую петлю, аналогично AP-1000). В Венгрии планируется строительство энергоблока ВВЭР-1200 мощностью 1200 МВт эл. с 4 петлями (4 насоса и 4 парогенератора, то есть в 2 раза больше, чем в APR-1400). Таким образом, имеется различие в конструкции и мощности используемых реакторов и АЭС и, соответственно, в их стоимости.

В Китае в результате строительства различных по конструкции энергоблоков с водоохлаждаемыми реакторами (ВВЭР-1000 — четырехпетлевая установка, AP-1000 — двухпетлевая установка и HPR-1000 — трехпетлевая установка) установлена эконо-

мичность создания трехпетлевых установок HPR-1000 (тепловая мощность — 3150 МВт, электрическая мощность — 1212 МВт). Удельная стоимость капиталовложений в HPR-1000, отнесенная к 1 кВт эл. на 18% меньше, чем в CAP-1000 (AP-1000, сооруженный в Китае). Ранее трехпетлевые установки применялись в PWR мощностью 900 МВт эл. Таким образом, проектные и конструкторские решения оказывают существенное влияние на экономические показатели.

Отмечается отличие в капитальных затратах первого и серии энергоблоков, выполненных по одному проекту. Строительство первого энергоблока дороже остальных примерно на 20%. Строительство на одной площадке двух энергоблоков по одному проекту приводит к снижению TCIC на ~15%.

Как показывает опыт строительства AP-1000 и EPR в Китае, различие проектной и реальной стоимостей строительства этих блоков не столь значительно, как это установлено в США и Финляндии. Основная причина различия значений стоимости строительства в Китае — наличие недоработок в проекте; в других странах наряду с недоработками в проекте отмечаются недостатки в организации строительства.

При освоении технологии AP-1000 в Китае снижено время строительства от «первого бетона» до сдачи в коммерческую эксплуатацию, которое равняется 66,2 месяца, что меньше, чем при строительстве АЭС с ВВЭР и PWR.

Таким образом, энергоблоки с реакторами ВВЭР и PWR модернизируются и совершенствуются. При этом актуальной задачей является снижение стоимости установок, то есть снижение TCIC.

На примере энергоблока с закритическими параметрами воды HPLWR (установка «Поколение-4») рассмотрены используемые при проектировании индикативные показатели (индикаторы):

- удельная масса первого контура, отнесенная к электрической мощности;
- удельный объем контайнмента, отнесенный к электрической мощности;
- отношение массы турбины к электрической мощности.

В качестве объектов для сравнения использованы данные для PWR (1400 МВт эл.) и BWR (1344 МВт эл.), которые были сооружены в Германии. Установлено, что одноконтурные установки HPLWR (Германия) по большинству показателей имеют меньшие значения индикаторов, чем установки, принятые для сравнения. Прогнозируемые значения LCOE равны от 5,0 до 7,8 цент/(кВт·ч) и среднее значение равно 6,2 цент/(кВт·ч); TCIC – от 2874 до 4818 долл/кВт эл. и среднее значение – 3320 долл/кВт эл.

Указанное значение $TCIC_{HPLWR} = 3320$ долл/кВт эл меньше 0,8 TCIC для энергоблока в OECD: $TCIC \leq 0,8 \times 4249 = 3400$ долл/кВт эл. Таким образом, выполнено требование по стоимости конкурентоспособной установки.

В Китае проектируется аналогичный энергоблок с CSR-1000 (Китай), который близок по конструкции и параметрам HPLWR.

Таким образом, рассмотрены основные технико-экономические характеристики энергоблоков с ВВЭР и PWR, определяющие их экономическую конкурентоспособность. Установлена связь экономических характеристик с техническими показателями и показана полезность индикативных показателей (индикаторов), которые на стадии разработки проекта ориентируют разработчиков на создание конкурентоспособной установки.

Гидродинамика теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА различных конструкций

Дмитриев С. М., Добров А. А., Доронков Д. В., Лыскова В. Э., Пронин А. Н., Рубцова Е. В., Рязанов А. В., Солнцев Д. Н., Хробостов А. Е.

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

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, твэл, дистанционирующая решетка, перемешивающая решетка, гидродинамика теплоносителя.

Конкурентоспособность продукции организаций ГК «Росатом» на мировом рынке является ключевой, глобальной целью. Поставленной цели в современных условиях можно достичь только при условии постоянного совершенствования технологических и организационных процессов. Необходимо постепенно и поэтапно модернизировать отдельные элементы реакторных установок, а также повышать их технологические и эксплуатационные параметры. Важнейшей частью реактора является активная зона. Активные зоны реакторов ВВЭР, несмотря на отсутствие возможности увеличения их геометрических размеров, даже на действующих однотипных энергоблоках достаточно вариативны в своей конфигурации за счет дальнейшего совершенствования конструкции тепловыделяющих сборок (ТВС).

АО «ОКБМ Африкантов» осуществляет разработку ТВС для реакторов ВВЭР, расположенных как в России, так и за ее пределами. Одним из важнейших партнеров предприятия является чешская АЭС «Темелин». В рамках планово-предупредительного ремонта на АЭС «Темелин» в активную зону реактора ВВЭР второго энергоблока были загружены 48 тепловыделяющих сборок новой модификации ТВСА-Т.mod.2, пришедшие на замену штатным ТВСА-Т.

По сравнению с тепловыделяющими сборками ТВСА-Т, ранее поставлявшимися на АЭС «Темелин», конструкция ТВСА-Т.mod.2 отличается оптимизированным размещением дистанционирующих решеток (ДР) и применением перемешивающих решеток (ПР), что обеспечивает большую жёсткость каркаса, меньшее гидравлическое сопротивление и более интенсивное перемешивание теплоносителя в поперечном сечении сборки, что положительно отразилось на эксплуатационных характеристиках новой кассеты.

Поскольку оба типа ТВС являются бесчехловыми, перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними сборками. Данное явление необходимо учитывать в процессе обоснования теплотехнической надёжности активной зоны, что обусловило необходимость проведения комплексных исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя.

Данные задачи решаются на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева в научно-исследовательской лаборатории «Реакторной гидродинамики» путем моделирования процессов течения потока теплоносителя на аэродинамическом стенде. Исследования проводились на экспериментальной модели (ЭМ) фрагмента активной зоны реактора ВВЭР, с целью выявления закономерностей процесса межкассетного взаимодействия потока.

Исследования гидродинамики теплоносителя внутри трубного пучка ЭМ, заключающиеся в измерении модуля вектора скорости, полного и статического давлений. Измерения проводились пятиканальным пневмометрическим зондом. Вектор скорости

измерялся в характерных зонах как в самих ТВСА, так и в межкассетном пространстве модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР.

Полученные сведения позволили выявить особенности межкассетного взаимодействия потока в активной зоне реактора ВВЭР. Результаты могут быть использованы в качестве базы экспериментальных данных для верификации CFD-кодов с целью уменьшения консерватизма при обосновании надежности установок данного типа.

Кипение жидкости, недогретой до температуры насыщения: механизм процесса, инженерные проблемы

Зейгарник Ю. А., Васильев Н. В.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва
zeigar@oivtran.ru

Ключевые слова: кипение, недогретая жидкость, характеристики кипения, модель механизма процесса, кризисы теплоотдачи, гидравлическое сопротивление.

Кипение жидкости, недогретой до температуры насыщения («поверхностное кипение») является одним из самых эффективных способов отвода тепла при экстремальных тепловых потоках. Оно используется для охлаждения ракетных сопел, пучковых мишеней и ряда других аппаратов современной техники. В силу того, что в основном потоке охладителя отсутствует двухфазная среда, как при кипении жидкости при температуре насыщения, технология кипения недогретой жидкости может эффективно применяться в каналах сложной формы, малого диаметра, разветвленных систем охлаждения. Тем самым, радикально облегчается проектирование систем охлаждения. Чрезвычайно важно то обстоятельство, что гидравлическое сопротивление каналов, в которых реализуется кипение недогретой жидкости, находится на уровне гидравлического сопротивления каналов, охлаждаемых однофазной (некипящей) средой при тех же массовых скоростях охладителя.

Коэффициенты теплоотдачи при кипении охладителя, недогретого до температуры насыщения, в условиях вынужденного течения очень высоки. Для воды они составляют многие десятки и могут превышать сотню кВт/(м²·К).

Исследование механизма кипения недогретой жидкости ведутся в разных организациях многие десятки лет. В последнее десятилетие с помощью современных высокоскоростных видеосъемок (с частотой кадров до 100 кГц), быстродействующей тепловизионной аппаратуры были получены новые данные, заметно уточняющие и детализирующие механизм процесса. Такого рода эксперименты были осуществлены в последние годы и в ОИВТ РАН. Исследования проводились с водой при атмосферном давлении. Был получен достаточно большой массив опытных данных по размерам пузырей (они были в среднем 400–600 мкм), продолжительности их жизни (в среднем 300–500 мкс) эволюции пузыря во времени (продолжительность стадии роста составляла примерно 100 мкс, и примерно после 50 мкс постоянного максимального размера пузырь полностью уменьшался в размерах, вплоть до полного схлопывания), деактивации центров парообразования после схлопывания пузыря, заселенности поверхности нагрева действующими центрами парообразования (она выше, чем больше плотность теплового потока q) и при $q = (4–5) \text{ МВт/м}^2$ она достигала $(2–3) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Эти данные позволили уточнить возможный механизм процесса. В максимальной степени, полученные опытные данные по характеристикам кипения коррелируют с феноменологической (механистической) моделью кипения недогретой жидкости Снайдера — Берглеса, согласно которой испарение жидкости в пузырь происходит с поверхности жидкого микрослоя под пузырем, образовавшегося в процессе быстрого роста пузыря на динамической (инерционной) стадии его развития, а конденсация пара осуществляется на куполе парового пузыря с отводом тепла конденсации в поток холодной жидкости. По всей видимости, этот отвод теплоты осуществляется путем нестационарной теплопроводности, при которой в начальный период плотности теплового потока очень велики и, в зависимости от величины недогрева Δt_n , составляют многие

МВт/м², но затем быстро изменяются обратно пропорционально корню квадратному от времени. Дисбаланс потоков массы конденсирующего и испаряющегося пара определяет эволюцию парового пузыря во времени, вплоть до его схлопывания (исчезновения).

При схлопывании пузыря в недогретой жидкости, пребывавший в работе центр парообразования полностью деактивируется, а новый центр возникает в новом месте греющей поверхности, чаще всего по соседству с ранее действующим, в отличие от случая кипения при температуре насыщения. Значительный недогрев жидкости до температуры насыщения стимулирует этот процесс.

При определенном сочетании недогрева Δt_n и плотности теплового потока q , дисбаланс потоков массы конденсирующегося и испаряющегося пара в пользу испарения возникает до схлопывания пузыря, и появляются условия для слияния соседних пузырей, а затем и появления крупных паровых образований — агломератов, которые тем больше в размерах, чем выше q , чем меньше Δt_n и чем протяженнее зона обогрева.

Слой жидкости под агломератом, по-видимому, прогревается до температуры, близкой к температуре насыщения t_s . В пользу такого заключения говорит возникновение и относительно продолжительное существование паровых пузырьков в слое жидкости (макрослое) под агломератом.

Характерным для режима кипения с агломератами является возникновение «сухих пятен» — участков поверхности нагрева, лишенных слоя смачивающей их жидкости. Размеры сухих пятен достаточно велики, их площадь составляет по крайней мере несколько мм². Причиной возникновения сухих пятен могут быть разрывы сплошности макропленки под действием термокапиллярных сил (градиента поверхностного натяжения), слияния паровых пузырьков в макропленке, разрыв макропленки растущими пузырями. Сегодня, нельзя достаточно уверенно говорить об истинной причине возникновения сухих пятен — любая из вышеуказанных версий имеет «право на жизнь».

Интенсивное испарение жидкости в зоне контактной линии на границе сухого пятна, по-видимому, «стимулирует» его устойчивость. В большинстве случаев возникшие сухие пятна не «замываются» (не покрываются жидкостью) при прохождении над ними жидкой пробки, существующей в промежутке между паровыми агломератами.

Кризис теплоотдачи и пережог греющей поверхности (burnout) практически всегда проходит через «сухое пятно», то есть появление «сухих пятен», а тем самым крупных паровых агломератов являются предтечей кризиса. Более того, если иметь в виду, что в разветвленной системе охлаждения, имеющей параллельные каналы, паровые агломераты являются источником гидравлической разверки параллельных каналов, то предельными значениями режимных параметров являются те, которые ведут к образованию агломератов, а они обычно примерно на 20–25% ниже критических (пережога).

Заметим, что роль сухих пятен в провоцировании быстрого роста температуры стенки и ее пережога особенно высока в экспериментах с поверхностями нагрева малой толщины, с плохими условиями для «растечки» тепла. Но из методических соображений в экспериментах преобладают именно такие греющие поверхности.

Опытные данные по критическим тепловым потокам при кипении недогретой воды при вынужденном течении получены в ОИВТ РАН, Ispra (Италия), ряде других научных организаций. Эмпирическая формула ОИВТ РАН, имеющая структуру $q_{кр} = A + B(\rho w)\Delta t_n$, где ρw — массовая скорость, а Δt_n — недогрев до температуры насыщения, хорошо описывает достаточно большой массив опытных данных в диапазоне давлений 0,1–3 МПа, массовых скоростей 2000–43000 кг/(м²·с), недогревов 25–160 °С. Приведены данные по влиянию толщины греющей стенки на $q_{кр}$ (чем она больше, тем выше $q_{кр}$ в пределах до 20–25%), неравномерности подвода тепла по периметру канала (оно слабое), диаметру канала ($q_{кр} \sim d^{1/3}$), влиянию давления (в указанных пределах оно незначительное).

Опыты, проведенные с греющими поверхностями, имеющими структурированную поверхность нагрева (покрытие, образованное методом микродугового окисления), показали, что статистические характеристики кипения (размеры пузырей, их эволюция во времени и др.) оказались близкими к таковым на гладкой поверхности. Коэффициенты теплоотдачи на структурированных поверхностях оказались несколько выше, чем на гладких. Но для уверенных количественных заключений (в отличие от кипения жидкости при температуре насыщения в большом объеме) данных пока недостаточно (во всяком случае, они не ниже, чем на гладких поверхностях). Однако, учитывая усложнение и удорожание технологии изготовления аппарата при использовании структурированной поверхности и очень высокий уровень теплоотдачи, целесообразность применения покрытий при кипении недогретой жидкости в канале обычно требует специального обоснования.

Критические тепловые потоки на поверхностях с покрытиями, как правило, выше. Различия с $q_{кр}$ для гладких поверхностей составляют несколько десятков процентов. Паровые агломераты на структурированных поверхностях появляются примерно при тех же параметрах и тепловых потоках, что и на гладких поверхностях, но при этом вопрос об условиях появления «сухих пятен» требует дополнительных исследований. Рост критической плотности теплового потока также говорит в пользу тезиса о задержке возникновения сухих пятен, которая может быть связана с усиленной подпиткой высыхающих зон поверхности нагрева жидкостью по капиллярной структуре.

Фрагментация жидкометаллических капель при паровых взрывах: возможные механизмы и практические приложения

Ивочкин Ю. П.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва,
ivochkin@yandex.ru

Ключевые слова: паровой взрыв, жидкий металл, расплав, охладитель, пар, фрагментация, дробление, аморфные металлы, водородная энергетика.

Применительно к проблемам безопасности АЭС и в металлургии процесс протекания парового взрыва (ПВ), который обусловлен взаимодействием холодной жидкости с расплавом горячего металла, принято разделять на следующие четыре стадии: 1) начальное грубое перемешивание (премиксинг) — гидродинамическое дробление на крупные (~1 см) капли струи расплава, падающего в охлаждающую жидкость; 2) инициирование (триггеринг) парового взрыва — совокупность процессов, приводящих к взрывной фрагментации одной или нескольких капель расплава с образованием слабой ударной волны (амплитуда ~1 МПа); 3) тонкая фрагментация всех капель расплава, сопровождающаяся резким увеличением горячей поверхности; 4) быстрая генерация большой массы пара, приводящая к распространению мощной ударной волны и выбросу продуктов взрыва в окружающее пространство. В докладе представлен обзорный анализ работ по описанию вероятных механизмов фрагментации жидкометаллических капель на второй и третьей стадиях паровых взрывов подобного типа, а также рассмотрены возможные полезные практические применения этого процесса.

В научном плане паровые взрывы начали изучаться с конца 50-х — начала 60-х годов прошлого столетия (в связи с четким осознанием возможных катастрофических последствий, вызванных рядом аварий в металлургии и атомной энергетике). Эти работы в рамках различных программ с переменной активностью проводятся до настоящего времени. На начальном этапе подобные исследования были направлены на экспериментальное изучение механизмов взрывной фрагментации отдельных жидкометаллических капель, падающих в охладитель (так называемый маломасштабный паровой взрыв). Было выполнено множество разнообразных, в том числе уникальных, экспериментальных работ, результаты которых позволили разработать несколько различных теорий фрагментации капель в этом процессе. В дальнейшем акцент экспериментальных исследований сместился в направлении создания больших установок и моделирования на них всех этапов парового взрыва. Результаты этих исследований использовались для разработки и верификации расчетных кодов. В настоящее время наблюдается возрастание интереса к исследованиям, направленным на детальное изучение механизмов маломасштабного парового взрыва, а также его предотвращения, что не в последнюю очередь связано с активным включением в изучение подобных вопросов китайских ученых.

О том, что проблема предотвращения паровых взрывов на АЭС далека от своего успешного разрешения свидетельствуют недавние промежуточные итоги работы специальной группы по паровому взрыву, которая создана и действует с 2002 г. при Агентстве атомных исследований (The Nuclear Energy Agency). В них, в частности, отмечается, что в настоящее время неудовлетворительно изучены вопросы, связанные с протеканием слоистых паровых взрывов и влиянием окислов на поверхности горячего расплава. Кроме того, недостаточно полно исследованы механизмы тонкой фрагментации капель расплава. Недавние обзорные статьи по механизмам фрагментации при паровом взрыве подтверждают это обстоятельство и свидетельствуют, что основные тео-

ретические модели фрагментации были предложены еще в 70-х годах прошлого столетия. На некоторых из них остановимся более подробно.

В настоящее время наиболее полно проработана и доминирует в научной литературе модель, которая связывает фрагментацию расплава со струями окружающей холодной жидкости, которые образуются при вскипании охладителя и схлопывании его паровых полостей. Эти струи проникают в горячую каплю и взрывным образом вскипают в ней, что приводит к дроблению горячей жидкости. Данная теория воспроизводит многоэтапный лавинообразный процесс фрагментации, однако она представляется слишком сложной, что позволяет усомниться в ее достоверности.

Другое направление теоретического анализа тонкой фрагментации связано с учетом термических напряжений, возникающих в каплях расплава в процессе их быстрого охлаждения. Предполагается, что в результате разрушения паровой оболочки охладителя, окружающую жидкометаллическую каплю, происходит быстрое остывание и затвердевание поверхностного слоя расплава, которое сопровождается возникновением в нем растягивающих механических напряжений. Последнее обстоятельство инициирует образование трещин в затвердевшем поверхностном слое и выбросы дробящихся струй горячей жидкости в охладитель. Существенный недостаток данной гипотезы состоит в невозможности с ее помощью описать процесс тонкой взрывной фрагментации расплава. Как свидетельствуют результаты численных оценок, время протекания процесса фрагментации капли при термомеханическом способе дробления может достигать несколько миллисекунд, что на один-два порядка величины превышает регистрируемые в эксперименте времена тонкой фрагментации горячих капель.

С точки зрения значения временной длительности процесса взрывного дробления, для описания тонкой фрагментации капель наиболее подходит так называемая кавитационно-акустическая гипотеза. В ней предполагается, что при вскипании охладителя на поверхности горячей жидкометаллической капли, вследствие роста и схлопывания паровых пузырей, генерируются ударные волны. Указанные волны распространяются, в частности, и в объеме капли, а их отражение от внутренней поверхности приводит к возникновению в расплаве череды импульсов разрежения. Подобные импульсы отрицательного давления по своей амплитуде и длительности могут достигать значений, достаточных для возникновения кавитационных полостей внутри капли горячего теплоносителя и ее фрагментации при их схлопывании. Наличие растворенных газов может интенсифицировать этот процесс. Главное ограничение применения этой гипотезы связано с необходимостью допущения о наличии высокоинтенсивных (сотни, тысячи атмосфер) импульсов давления, необходимых для возникновения кавитации в жидком металле. Кроме того, слабо изучено влияние на этот процесс растворенных газов.

Углубленное исследование механизмов фрагментации горячих жидкометаллических капель важно также для разработки и оптимизации оригинальных технологий, основанных на этом процессе. Например, высокая (10^8 — 10^{10} К/с) скорость охлаждения частиц, образующихся при взрывной фрагментации, позволяет получить разнообразные материалы, находящиеся в аморфном состоянии. Результаты проведенных нами экспериментально-расчетных исследований, которые были выполнены с использованием низкоплавких металлов, дали обнадеживающие результаты и подтвердили эту возможность. Вопрос о получении по разработанной методике аморфных структур из металлов с более высокими температурами плавления (например, сплавы никеля и лантана, применяемые в качестве металлгидридов для хранения водорода) тесно связан с проблемой слабого воспроизводства режима взрывной фрагментации расплавов и требует дальнейшей более детальной экспериментально-расчетной проработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-01497).

СЕКЦИЯ 1.

Физическая химия и технология жидкометаллических теплоносителей

Концептуальные исследования высокотемпературной ядерной энерготехнологии для производства водорода и других инновационных приложений

Сорокин А. П., Гулевич А. В., Клинов Д. А., Кузина Ю. А., Камаев А. А.,
Иванов А. П., Алексеев В. В., Морозов А. В.

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

Ключевые слова: высокотемпературный ядерный реактор, производство водорода, натрий, физика реактора, теплогидравлика активной зоны, конструкционные материалы, примеси, технология теплоносителя, системы безопасности, пассивная безопасность, аварийное расхолаживание.

Одной из наиболее важных проблем, определяющих развитие экологически чистой энергетики, является вовлечение в топливный цикл водорода. В настоящее время основным способом производства водорода является паровая конверсия метана. В долгосрочной перспективе крупномасштабного получения водорода этот способ не жизнеспособен из-за потребления невозобновляемых ресурсов и выделением парниковых газов. Альтернативные способы производства водорода методами расщепления воды с помощью термохимических или электролизных процессов требуют высокотемпературного источника тепла.

Высокотемпературными источниками тепла могут стать наиболее освоенные в настоящее время ядерные реакторы Поколения IV в силу предлагаемого использования таких теплоносителей, как газы, жидкие металлы (натрий, свинец), расплавы солей [1, 2]. Температура теплоносителя на выходе из активной зоны в этих реакторах может достигать 900—950 °С. Они представляют новый класс мощных реакторов, которые могут быть нацелены как на производство электроэнергии с высоким КПД (до 50%), так и обеспечение очень важных технологических процессов при производстве водорода, газификации и ожигении угля, углублённой переработке нефти, преобразовании биомассы в жидкое топливо, в химической промышленности, металлургии и т. д.

Для реализации технологии быстрых реакторов с высокотемпературным натриевым теплоносителем в промышленных масштабах необходимо решить проблемы технической реализации их конструкции с обоснованием ядерно-физических и теплофизических характеристик, применимости выбранных жаропрочных конструкционных коррозионно- и радиационно стойких материалов для оболочек твэлов, корпуса реактора и конструкционных элементов при высоких температурах на длительный ресурс работы реактора, разработки и обоснования технологических систем контроля примесного состояния и очистки от примесей высокотемпературного натриевого теплоносителя на длительный ресурс. Выполненные в ГНЦ РФ – ФЭИ под руководством

В.М. Поплавского поисковые исследования по выбору облика энергетического высокотемпературного натриевого реактора для крупномасштабной ядерно-водородной энергетики показали, что создание такого реактора является реальной задачей.

Учитывая неослабевающий интерес к нахождению приемлемых ядерных источников высокопотенциального тепла, авторами проведены концептуальные исследования облика высокотемпературного реактора как естественное инновационное развитие реакторов на быстрых нейтронах, позволяющих осуществлять интенсивный теплообмен при низком давлении теплоносителя и высоком КПД в область высоких температур до ~900—950 °С [3, 4]. Условия их работы характеризуются высокими нейтронными и тепловыми потоками, большим выгоранием, высокой температурой топлива и оболочки. В результате нейтронно-физических и теплофизических исследований высокотемпературной реакторной установки с тепловой мощностью 600 МВт показано, что имеется принципиальная возможность обеспечить требуемые параметры такой установки для производства большого количества водорода, например, на основе одного из термохимических циклов или высокотемпературного электролиза с высоким коэффициентом теплового использования электроэнергии. Относительная малогабаритность, вид теплоносителя, выбор делящегося вещества и конструкционных материалов позволяют создать реактор с внутренними присущими ему свойствами (исключение разгона реактора на мгновенных нейтронах, пассивное снятие остаточного тепловыделения), обеспечивающими повышенную ядерную и радиационную безопасность [3, 4].

Требования безопасности при этом будут соблюдены. Удаление натрия вызывает незначительный отрицательный натриевый пустотный эффект реактивности, что обусловлено урановым топливом. Таким образом, можно не требовать значительного увеличения давления в первом контуре. Для организации замкнутого топливного цикла имеется возможность рассмотреть уран-ториевый цикл с близкими характеристиками эффектов реактивности.

Ключевая проблема для высокотемпературного реактора — стойкость твэла. В предлагаемом конструктивном решении реакторной установки ситуация смягчена за счёт выбора низкой тепловой нагрузки на твэлы, можно дополнительно снизить и максимальное выгорание.

Самым сложным в конструкционном плане является выбор высокотемпературного материала для реакторных условий. Обсуждаются возможности применения для оболочек твэлов имеющих жаропрочных радиационно стойких до уровня 100 сна и коррозионно-стойких в натриевом теплоносителе при температурах 900–1200 °С конструкционных материалов и использования предлагаемой технологии высокотемпературного натриевого теплоносителя при высокой концентрации водорода. В качестве таких сплавов могут быть рассмотрены молибденовые и ниобиевые сплавы, обладающие технологичностью и высокими жаропрочными свойствами, удовлетворительной коррозионной стойкостью в натриевом теплоносителе. Разработка необходимого жаропрочного материала и изучение его поведения под облучением требуют проведения дальнейших исследований.

Важным вопросом является расчетное обоснование температурного режима, термомеханических характеристик и работоспособности твэлов с учетом эффектов их формоизменения вследствие неравномерностей температуры, распухания и радиационной ползучести материала оболочки, случайных отклонений параметров.

Анализируются особенности поведения высокотемпературной сложной многокомпонентной гетерогенной системы «натриевый теплоноситель — примеси — конструкционные (технологические) материалы — защитный газ», связанные с экспоненциальной зависимостью от температуры констант, характеризующие процессы тепломассопереноса (диффузия, проницаемость, растворимость, скорость абсорбции, равновесные

давления газов и др.), описываемой формулой Аррениуса. При возрастании интенсивности источников водорода, поступающего из третьего контура во второй, по сравнению с АЭС БН-600 на два-три порядка, условием ее реализации является повышение концентрации водорода в натрии на два-три порядка по сравнению с современными АЭС в сочетании с удалением водорода из натрия вакуумированием через мембраны из ванадия или ниобия [5].

Система технологии, обеспечивающая соблюдение требований технологии высокотемпературного натриевого теплоносителя (900—950 °С), должна существенно отличаться от существующих систем на современных АЭС с уровнем температуры 550 °С. Она включает:

- как обязательные компоненты системы очистки — холодные и горячие ловушки окислов, использующие геттеры для глубокой очистки натрия от кислорода, углерода, азота;

- для очистки от водорода во втором контуре установки использование мембраны из материалов с высокой проницаемостью по водороду, например из ниобия или ванадия;

- учитывая возрастание скорости коррозии конструкционных материалов и массопереноса примесей при повышении температуры в контурах, разработка специальных массообменно-фильтрующих аппаратов для очистки натрия от продуктов коррозии.

Расчетные оценки указывают, что для первого контура высокотемпературной реакторной установки количество продуктов коррозии, образующихся при концентрации кислорода в натрии 1 млн^{-1} , составляет 900 кг/год, если оболочки твэлов изготовлены из стали ЭП-912-ВД, и 464 кг/год с оболочкой из молибденового сплава. Для второго контура это 263 кг/год на каждую петлю. С учетом высокотемпературных опытов, в которых показана высокая эффективность удержания взвесей продуктов коррозии на фильтрах, установленных в низкотемпературной зоне, предлагается использовать принцип работы холодной ловушки: охлаждать натрий до необходимой температуры с одновременным удержанием продуктов коррозии на поверхностях массообмена, включая фильтры.

Расчеты для высокотемпературной реакторной установки для производства электроэнергии и водорода на основе твердооксидного электролиза массопереноса водорода и трития показали, что к.п.д. такой системы ~40%, объем производимого водорода $2,810^4$ л/с. Опасность от трития в готовом продукте возникает после сгорания водорода в атмосфере. Поэтому при расчете параметров второго контура было принято, что предельно допустимая концентрация трития в производимом водороде не должна превышать 3,26 Бк/л. Предельно допустимая концентрация трития в воздухе почти в 1000 раз выше — $2,44 \cdot 10^3$ Бк/л. Очистка натрия от трития до концентрации, обеспечивающей в производимом водороде предельно допустимую концентрацию, равную 3,26 Бк/л, предъявляет дополнительные требования к системе очистки от водорода на основе принципиально нового метода — вакуумированием через специальные мембраны, при этом коэффициент проницаемости системы очистки второго контура от трития должен превышать 140 кг/с.

На первый план выходит решение вопросов технологического характера, связанных с высоким уровнем температуры в реакторной установке, включающее реализацию широкого комплекса исследований фундаментальных характеристик теплогидравлических, физико-химических процессов, протекающих в сложных многокомпонентных, в том числе с реагирующими между собой компонентами, гетерофазных системах. Экономическая эффективность и надежность АЭС с высокотемпературными ядерными реакторами с натриевым теплоносителем должна быть обеспечена за счёт поддержания надлежащего качества теплоносителя в его контурах, проведения исследований и разработок с учетом закономерностей поведения примесей при различных технологических операциях при повышенной температуре.

Список литературы

1. Innovation in Nuclear Energy Technology. – NEA, N. 6103, OECD Nuclear Energy Agency, 2007.
2. Альбицкая Е.С. Развитие ядерно-энергетических систем // Атомная техника за рубежом. – 2013. – № 11. – С. 3–16.
3. Калякин С.Г., Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Богословская Г.П., Иванов А.П., Коновалов М.А., Морозов А.В., Стогов В.Ю. Нейтронно-физические и теплофизические исследования в обоснование высокотемпературной ядерной энерготехнологии с реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем для производства водорода // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 3. – С. 104–115.
4. Сорокин А.П., Гулевич А.В., Камаев А.А., Кузина Ю.А., Иванов А.П., Алексеев В.В., Морозов А.В. Исследования в обоснование высокотемпературной ядерной энерготехнологии с реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем для производства водорода и других инновационных применений // Сборник докладов 11-й Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2018), Москва, АО «Концерн Росэнергоатом», 23–24 мая 2018 г., 10 с.
5. Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Алексеев В.В., Коновалов М.А. Технология высокотемпературного натриевого теплоносителя в ядерных энергетических установках для водородной энергетики // Теплоэнергетика. – 2014. – № 5. – С. 31–39 / Kozlov F.A., Sorokin A.P., Alekseev V.V., Kononov M.A. The high temperature sodium coolant technology in nuclear power installations for hydrogen power engineering // Thermalengineering. – 2014. – № 5. – P. 348–356.

Оценки состава гетерогенной системы натрий–кислород–водород

Алексеев В. В., Борисов В. В., Камаев А. А., Ганичев Н. С., Сутягин И. 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: натрий, кислород, пузырьки водорода, растворение, концентрация, компоненты реакции, насыщение, щелочь, температура, равновесная система.

Для повышения уровня безопасности ЯЭУ с натриевым теплоносителем необходимо своевременное обнаружение аварийного истечения воды в натрий второго контура. Исследование закономерности массопереноса продуктов реакции натрий–вода в объеме ПГ позволит правильно интерпретировать показания приборов контроля.

В связи с изменением состава системы натрий–кислород–водород при взаимодействии примесей в натрии и при изменении температуры системы меняются показания измерителей водорода и кислорода в натрии, что не позволяет адекватно определять характеристики водяной течи в натриевый контур. Изучение поведения системы натрий–кислород–водород проводится для определения ее компонентного состава при поступлении в натриевый теплоноситель таких примесей как кислород, водород или их соединений, в том числе при попадании воды в натрий, с последующим их переносом потоком натрия и перераспределением концентраций образующихся компонентов.

В исследованиях массопереноса компонентов реакции натрий–вода в натрии в объеме межтрубного пространства неизотермического трубного пучка ПГ необходимо учитывать взаимодействие всех компонентов гетерогенной системы, включая газообразный водород.

В межтрубном пространстве ПГ, в связи с перемешиванием загрязненных струй натрия с потоками в соседних каналах, суммарная концентрация продуктов взаимодействия будет уменьшаться. Это приводит к изменению соотношения концентраций компонентов реакции, соответственно концентраций кислорода и водорода в натрии. При математическом моделировании этого процесса в данной работе эффект перемешивания задается параметрически величиной разбавления раствора компонентов.

Задача экспериментальных исследований состоит в определении концентрации растворенных компонентов реакции натрий–вода и газа в натрии по ходу его течения и в сечении межтрубного пространства в неизотермическом участке.

С использованием расчетного метода дано обоснование возможности проведения экспериментов по исследованию кинетики поведения продуктов взаимодействия воды с натрием в изотермическом режиме работы модели ПГ вместо неизотермического режима. Выполнены расчеты изменения концентраций компонентов реакции натрий–вода по высоте трубного пучка для обоих рассматриваемых режимов.

Показано, что на распределение концентраций компонентов реакции натрий–вода в натрии по длине трубного пучка главным образом влияет разбавление раствора и незначительно — режим работы ПГ (изотермический или неизотермический). При этом разбавление компонентов реакции в условиях межтрубного пространства зависит от диффузионных процессов, в основном от теплогидравлических параметров потока натрия.

Разработана методика расчета изменения концентрации компонентов реакции натрий–вода в натрии по длине ПГ с учетом образования и растворения пузырьков водорода. Доля гидроксида натрия, образующегося в результате растворения пузырьков водо-

рода, для рассматриваемых условий приближается к 30% от его общего содержания в натрии. Для пузырька размером 10 мм время растворения составляет около 1,67 с.

Задача дальнейших исследований состоит в определении степени разбавления концентрации растворенных компонентов реакции натрий–вода в натрии по ходу его течения в межтрубном пространстве ПГ.

Для решения указанной проблемы предлагается разработка трехмерной расчетной модели и создание экспериментального участка, моделирующего неизотермическое течение натрия в межтрубном пространстве парогенератора. В ходе эксперимента должно измеряться содержание кислорода в натрии по длине неизотермического участка при подаче водяного пара в натрий. Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволит определить значения недостающих констант.

Расчетно-теоретическая оценка параметров, ответственных за совместимость металлических материалов с жидким сплавом Sn-20% Li

Красин В. П., Союстова С. И.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский политехнический университет» (МПУ), Москва,
vkrasin@rambler.ru

Ключевые слова: внутрикамерные элементы, капиллярно-пористые системы, термодинамическое моделирование, параметр взаимодействия, энергия Гиббса, молярная энтальпия, сплавы литий-олово.

Использование жидких металлов в конструкциях внутрикамерных элементов будущего термоядерного реактора позволяет устранить ряд проблем, связанных с разрушением в результате плавления и перекристаллизации, которые неизбежны при использовании твердых конструкционных материалов. Жидкие сплавы литий-олово обладают таким набором физико-химических свойств, который делает их привлекательными с точки зрения возможного использования в качестве жидкометаллического компонента капиллярно-пористых систем (КПС) в токамаках. По сравнению с жидким литием, с которого и началась реализация идеи использования жидких металлов при проектировании внутрикамерных компонентов токамака, сплавы Li-Sn характеризуются более низкими значениями давления пара над расплавом. Это, как ожидается, позволит повысить максимально допустимую температуру при их использовании в КПС.

Сплавы Li-Sn стали возможной альтернативой литию, но существует ряд обстоятельств, которые требуют дополнительных исследований для обоснования возможности применения этих сплавов во внутрикамерных компонентах токамака. В частности, одной из таких проблем может оказаться загрязнение плазмы токамака оловом как элементом с высоким значением зарядового числа Z вследствие ионного распыления. Другая особенность этих сплавов связана с тем, что при использовании сплавов литий-олово следует учитывать, что, с точки зрения совместимости этих расплавов с конструкционными материалами, олово является одним из наиболее агрессивных жидких металлов.

Целью настоящей работы было получение информации о растворимости компонентов конструкционных материалов в жидком сплаве Sn-20% Li в диапазоне температур, представляющих практический интерес. Для решения этой проблемы использовался метод термодинамического моделирования, который включал следующие этапы: 1) выбор моделей для расчета энергий Гиббса; 2) выбор и оценка исходных данных; 3) оптимизация параметров модели; 4) расчеты и сравнения.

Основываясь на информации об энергиях Гиббса компонентов в различных фазах бинарных систем, а также используя базу термодинамических данных для чистых элементов, методом термодинамического моделирования рассчитаны температурные зависимости для растворимости никеля, железа, хрома, молибдена и вольфрама в жидком сплаве Sn-20% Li. Среди рассмотренных переходных металлов только Mo и W характеризуются приемлемыми уровнями растворимости в $Li_{20}Sn_{80}$ при температурах выше 600 °C. Результаты расчетов хорошо согласуются с известными из литературы данными коррозионных испытаний ферритно-мартенситной стали JLF-1 (Fe-9Cr-2W-0.1C) в сплаве $Li_{20}Sn_{80}$.

Рассматривая результаты настоящих расчетов с точки зрения их возможного практического применения к промышленным сплавам на основе молибдена и на основе вольфрама, необходимо учитывать влияние химических реакций между оксидами этих тугоплавких металлов и оксидом лития на процесс растворения компонентов конструкционного материала в жидком сплаве $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$. Возможность протекания таких реакций не может быть исключена, поскольку присутствие небольшого количества оксидов по границам зерен и на поверхности сплавов непосредственно связано с современными технологиями получения этих материалов. Из анализа литературы следует, что в качестве наиболее термодинамически стабильных соединений среди других сложных оксидов, являющихся продуктами реакций с участием простых оксидов тугоплавких металлов и Li_2O , в системах Li-Mo-O и Li-W-O можно рассматривать Li_2MoO_4 и Li_2WO_4 . Термодинамическая стабильность Li_2MoO_4 и Li_2WO_4 с повышением температуры снижается, и, по мнению некоторых исследователей, часть этих соединений переходит в жидкометаллический расплав. Это может приводить к увеличению эффективной растворимости Mo и W в жидкой фазе системы.

Поскольку в дополнение к низкой растворимости в жидком сплаве конструкционный материал также должен быть устойчивым к другим факторам коррозии, выбор такого материала невозможен без проведения значительного объема экспериментальных исследований. В этом контексте оксидные керамические материалы также считаются перспективными, как и металлические материалы.

Исследование механизма шлакообразования в контурах со свинецсодержащими теплоносителями и его предотвращение высокотемпературной обработкой смесью водорода и водяного пара

Кошелев М. М., Ульянов В. В., Харчук С. Е.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Обнинск, mkoshelev@ippe.ru

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, шлаки на основе оксидов свинца, свинец, сплав свинец-висмут, кислород воздуха, очистка от шлаков, устройство ввода газа в поток теплоносителя.

По отношению к кислороду тяжелые жидкометаллические теплоносители, к которым относятся свинец и эвтектический сплав свинца с висмутом, представляют сложную термодинамическую систему. При малом содержании кислорода в теплоносителе его свойства могут быть подобны таким сильным раскислителям, как хром или железо. В состоянии насыщения взаимодействие с газообразным кислородом приводит к образованию твердофазного оксида свинца вплоть до полного перевода теплоносителя в оксидную фазу.

Вышеуказанное свойство может быть использовано для селективного окисления в теплоносителе примесей, имеющих большее сродство к кислороду, с их переводом из растворенного во взвешенное состояние. Однако неконтролируемое взаимодействие тяжелых жидкометаллических теплоносителей с газообразным кислородом, являющимся основным компонентом воздуха, может приводить к образованию и накоплению шлаков на основе оксидов теплоносителя.

Образование шлаков может происходить при непосредственном взаимодействии теплоносителя с кислородом. В этом случае взаимодействие можно условно разбить на две стадии: интенсивное формирование оксида свинца при реакции прямого окисления свинца кислородом и медленное окисление теплоносителя в ситуации, когда, например, произошла разгерметизация газовой системы, поверхность реакции ограничена зеркалом теплоносителя, на зеркале образовался слой оксида свинца, а образование шлаков происходит только за счет медленного прироста толщины слоя оксида. В последнем случае образование на поверхности раздела «теплоноситель — газ» сплошного слоя оксидов, трудно проницаемого для газообразного кислорода, приводит к локализации шлакообразования и уменьшению масштабов образования шлаков. То есть при контакте с окислителем теплоноситель обладает полезным свойством самопассивируемости, защищающим циркуляционный контур от чрезмерного шлакообразования.

В то же время, еще при обосновании технологии теплоносителя свинец-висмут для транспортных установок, выявлена возможность косвенного шлакообразования за счет поглощения кислорода холодными поверхностями контура в отсутствие теплоносителя с последующей десорбцией и окислением теплоносителя в ходе повторного заполнения циркуляционного контура теплоносителем. Масштабы шлакообразования при таком сценарии могут быть колоссальными при длительной разгерметизации с переводом в шлак до 1% теплоносителя. По этой причине при эксплуатации исследовательских контуров следует минимизировать их нахождение в разгерметизированном состоянии как в ходе исследований, так и в нерабочие периоды, а при разогреве и заполнении теплоносителем следует создавать и поддерживать вакуум в контуре.

Для очистки тяжелых жидкометаллических теплоносителей от шлаков на основе оксидов свинца, в принципе, могут применяться разные методы. Разработчики реактора MYRRHA (проект реактора с теплоносителем свинец-висмут Бельгийской академии

наук) отдают предпочтение фильтрационной очистке теплоносителя от шлаков, в результате которой устраняется опасность пожаров и взрывов в результате применения водорода, но повышаются требования к емкости фильтров и исключается возможность раскисления теплоносителя от состояния насыщения. На ранних этапах освоения теплоносителя свинец-висмут применялась низкотемпературная очистка гидразингидратом ($N_2H_4 \cdot H_2O$). Этот метод хорошо зарекомендовал себя для очистки контуров с чрезмерной зашлаковкой, например стенда испытаний главного циркуляционного насоса московского отделения Центрального котлотурбинного института, где было восстановлено ~250 кг шлаков. Недостатками использования гидразингидрата, воспрепятствовавшими его широкому внедрению, являются его чрезвычайно высокая токсичность (1 класс опасности по степени воздействия на организм человека) и мощные восстановительные свойства, способствующие не только очистке от оксидов свинца, но и разрушению оксидных покрытий на поверхности конструкционных материалов, сопровождающегося жидкометаллической коррозией.

Наиболее технологичным, на взгляд авторов, методом очистки тяжелых жидкометаллических теплоносителей от шлаков на основе оксида свинца является обработка поверхностей контура и собственно теплоносителя газовыми смесями «водород — водяной пар — инертный газ». За счет химической реакции взаимодействия водорода и оксида свинца шлаки разрушаются, образуется водяной пар и свинец. Последний при этом возвращается в состав теплоносителя. Водяной пар добавляется в исходную газовую смесь для исключения возможности химического разрушения защитных оксидных покрытий на конструкционных сталях, а инертный газ необходим для обеспечения безопасной концентрации водорода в воздухе при возможной разгерметизации контура и облегчения контроля процесса очистки по скорости уменьшения содержания водорода в газовой смеси.

Важно отметить, что очистку необходимо проводить, вводя газовую смесь в поток теплоносителя, поскольку подача смеси «водород — водяной пар — инертный газ» только в газовый объем позволяет выводить шлаки из теплоносителя за счет медленного процесса растворения шлаков в раскисляемом водородом с поверхности теплоносителя. В случае большого локального скопления отложений процесс может идти следующим образом: при взаимодействии с водородной смесью шлаки на основе оксидов свинца становятся рыхлыми и отваливаются от мест своего отложения, увлекаясь потоком теплоносителя. Дисперсные частицы разрыхляющихся и разрушающихся отложений примесей за счет эффекта флотации могут «высаживаться» на границы раздела «газовая фаза — теплоноситель» и далее транспортироваться с пузырьком в составе двухкомпонентного потока или непосредственно потоком теплоносителя. В последующем происходит сепарация всех взвешенных в теплоносителе примесей на его зеркале и завершающее полное восстановление свинца из этих примесей.

Для ввода газовой смеси в поток теплоносителя в зависимости от конструктивных особенностей циркуляционного контура могут быть применены различные устройства: эжекторы и инжекторы, сопловые насадки, механические диспергаторы газа с движущимися элементами конструкции. Для каждого контура выбор устройства ввода газовой смеси индивидуален. Однако, как правило, контуры экспериментальных стендов имеют петлевою конструкцию, поэтому для них целесообразно применение эжекторов. Проекты крупногабаритных реакторных установок имеют моноблочную или усовершенствованную петлевою конструкцию без трубопроводов и со значительными поверхностями раздела «теплоноситель — газ», поэтому для них предпочтительнее применение механических диспергаторов газа большой производительности. В случаях невозможности использования эжекторов и механических диспергаторов может быть оправдано проведение очистки теплоносителя при вводе газовой смеси при помощи сопловых насадок.

Повышение коррозионной стойкости конструкционных материалов стенов и установок с ТЖМТ

Харчук С. Е., Асхадуллин Р. Ш., Ульянов В. В., Кошелев М. М.

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

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, свинец, эвтектический сплав свинца с висмутом, защитные покрытия, пассивация стали, коррозионная стойкость.

В циркуляционных контурах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями Рb и Рb-Vi (ТЖМТ) протекает ряд процессов характерных для контуров и с другими теплоносителями. К ним относятся накопление в теплоносителе различных примесей, их взаимодействие между собой и с теплоносителем, термический и изотермический перенос масс, высаживание примесей на поверхностях контура циркуляции теплоносителя, загрязнение поверхностей оборудования газового объема контура примесями и продуктами испарения теплоносителя и другие. Однако имеются и специфические особенности, обусловленные их высокой коррозионной активностью. Последняя во многом определяет ресурс и безопасность работы ядерных энергетических установок с реакторами, охлаждаемыми тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ).

В расплавах Рb и Рb-Vi хорошо растворяются очень многие химические элементы и соединения, в том числе и компоненты конструкционных материалов. Следствием этого могут быть:

- разрушение конструкционных материалов и, как следствие, нарушение герметичности контура;
- отложение примесей на поверхностях циркуляционных контуров, закупорка проходных сечений и ухудшение теплогидравлических характеристик энергетических установок.

В настоящее время коррозионная стойкость конструкционных сталей обеспечивается созданием на их поверхностях защитных покрытий из оксидных соединений, состоящих из компонентов, входящих в состав сталей. Использование такого рода защиты сталей позволяет обеспечивать коррозионную стойкость последней на временной базе порядка нескольких тысяч часов при температуре теплоносителя ~450 °С, достигнутой при эксплуатации реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем. Перспективные установки с тяжелыми теплоносителями предполагают работу при более высоких температурах и ориентированы на достижение существенно более высоких ресурсов. Эти различия в условиях их эксплуатации приводят к появлению дополнительных трудностей в обеспечении коррозионной стойкости используемых конструкционных сталей. Учитывая возросшие требования к использованию конструкционных сталей, существует потребность в разработке новых способов и технологий их защиты при эксплуатации в тяжелых теплоносителях. Поэтому разрабатывались и разрабатываются различные способы дополнительной защиты их поверхности. Одним из таких способов предположительно является термодинамическое и диффузионное упрочнение наносимых на поверхности сталей защитных покрытий. Это упрочнение может быть достигнуто путем обогащения покрытий оксидными фазами термодинамически более устойчивыми по сравнению с оксидами железа, являющимися на сегодняшний день основой используемых защитных покрытий. В результате возможно достижение

повышенных эксплуатационных характеристик реакторных установок за счет повышения температурного уровня работы конструкционных сталей, а также увеличения ресурса их работы.

Поиск альтернативных методов защиты сталей от коррозии в ТЖМТ проводится во многих исследовательских центрах, в том числе исследования в обоснование применения керамических материалов.

Предлагается технология формирования защитных покрытий на сталях, основанная на обогащении приповерхностного слоя стали легирующими добавками в среде жидкометаллических расплавов «Pb – Bi – Мелег» («Pb – Мелег»), где Мелег – Al легирующая растворенная металлическая примесь в матричном расплаве и в последующем окислении поверхности стали в жидкометаллическом расплаве «Pb – Bi – O» («Pb – O») с формированием защитных покрытий сложного состава из оксидов компонентов стали и оксидов металлов легирующей добавки.

Согласно описанной схеме процесса были проведены экспериментальные исследования по образованию защитного антикоррозионного покрытия на образцах реакторной стали ЭП-302 и ЭП-823 на созданном в ГНЦ РФ – ФЭИ рабочем участке.

Проведенные исследования показали следующие результаты:

- подтверждена возможность формирования на сталях ЭП-302 и ЭП-823 защитных покрытий сложного состава, включающего оксиды компонентов стали и оксиды металлов легирующей добавки;

- выявлены преимущества новых покрытий и подтверждена перспективность и необходимость дальнейшей разработки нового вида защитных покрытий на конструкционных сталях ЯЭУ с целью повышения ресурса и безопасности работы ядерных энергетических установок с реакторами, охлаждаемыми ТЖМТ.

Исследование геттерной очистки натрия от кислорода

Кузина Ю. А., Алексеев В. В., Сорокин А. П., Воронин И. А.,
Коновалов М. А., Зыкова Р. О.

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

Ключевые слова: натрий, геттер, кислород, цирконий, магний, температура, очистка, хемосорбент, комбинированная очистка, концентрация, экспериментальный стенд

В связи с необходимостью создания внутрибаковой системы очистки натрия от примесей, альтернативной системе с холодными ловушками, возрастает роль исследований по очистке натрия геттерными ловушками. В первом контуре ЯЭУ требуется в основном очистка натрия от кислорода. Для очистки натрия от кислорода могут быть использованы как сорбционные, так и хемосорбционные геттеры. Температурные режимы работы этих геттеров отличаются, поэтому была предложена концепция комбинированной системы очистки натрия. В проведенных исследованиях хемосорбционный геттер был растворимым и работал при более низкой температуре, чем сорбционный.

Работа по обоснованию комбинированной системы очистки натрия первого контура от кислорода применительно к реакторной установке (РУ) включала экспериментальное обоснование, подтверждающее принятый выбор хемосорбента, геттера и фильтрующего материала для очистки натрия от растворённого кислорода и взвесей при параметрах теплоносителя, приближенных к натурным.

Исследования процесса высокотемпературной ($t \geq 550$ °С) геттерной очистки натрия от растворённого кислорода цирконием показали применимость этого метода. Результаты наших исследований на экспериментальном натриевом стенде Протва-1 подтвердили эффективность высокотемпературной геттерной очистки.

Модуль хемосорбционной очистки содержал гранулированный магний, заключенный между удерживающими решетками. На выходе из модуля устанавливался фильтр. Первоначальная загрузка магния в хемосорбционном модуле — 25 г, то есть 100 млн^{-1} при полном растворении в натрии стенда «Протва-1». Испытания модуля хемосорбционной очистки проводилось на стенде «Протва-1». В ходе испытания температура натрия поддерживалась около 300 °С.

После испытаний модуля в течение 20 часов концентрация кислорода в натрии была понижена на 12 млн^{-1} , что соответствует расходу 4,5 г магния. На фильтроматериале обнаружено ~ 1,0 г магния. Суммарная масса магния, оставшегося в модуле после испытаний, составляет ~ 6 г (без учета осадков на стенках модуля и решетках). Содержание магния в металлическом натрии после испытаний составляет ~ 40 млн^{-1} . В пересчете на весь натрий в контуре это соответствует массе растворенного магния ~ 10 г. Полученные данные указывают на то, что значительная часть магния поступила в натриевый контур, а эффективность фильтра оказалась невысокой. Тем не менее, данный результат указывает на возможность низкотемпературной хемосорбционной очистки натрия от растворенного кислорода.

Оценки показывают, что целесообразно исследовать возможность использования церия для очистки натрия от кислорода. При геттерной реакции взаимодействия с кислородом в натрии образуются твердые оксиды церия (Ce_2O_3 и CeO_2), удаляемые последующей фильтрацией. Достаточно низкая растворимость церия в натрии позволяет значительно снизить вынос растворимого геттера из устройства комбинированной очистки.

В ходе испытаний модуля геттерной очистки при температуре 550 °С (около 20 ч) наблюдалась устойчивая тенденция к постоянному снижению концентрации кислорода в натрии от исходного значения около 57 млн⁻¹ до 7 млн⁻¹.

Рассмотрены предложения по разработке двух вариантов комбинированной системы очистки натрия от кислорода:

- геттерная циркониевая ловушка и фильтр для удержания окислов циркония: в стояночных режимах – с подогревом, при работе на номинальных параметрах — при максимальной температуре теплоносителя в первом контуре;

- низкотемпературный хемосорбционный модуль в сочетании с высокотемпературным геттерным модулем, устанавливаемыми в капсулах ТВС (в их холодной и высокотемпературной зонах соответственно). В качестве материала хемосорбента предполагается использовать растворимый геттер, а высокотемпературного геттера — цирконий в форме мелкодисперсной насадки.

Для дальнейших испытаний предполагается создание модуля комбинированной очистки, который включает в себя комбинацию двух модулей: хемосорбционной очистки с растворимым геттером и геттерной очистки с цирконием.

Поведение химически-реагирующих органических примесей в циркулирующем натриевом контуре

Загорюлько Ю. И., Ганичев Н. С., Коновалов М. А.

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

Ключевые слова: органические теплоносители, турбинные масла, взаимодействие с натрием, твердые и газообразные продукты пиролиза.

Минеральные масла и целый ряд других веществ на основе углеводов используются на реакторах с натриевым теплоносителем в виде смазок и охладителей подвижных механизмов реакторного оборудования. В нормальных режимах эксплуатации установок они могут попадать в газовые полости в виде паров и аэрозолей. При этом в газовых полостях обнаруживаются водород и различные углеводороды, дальнейшее превращение которых за счет термолиза, процессов гидрирования и взаимодействия с натрием и его парами зависит от температуры и при ее изменении от 350 до 500 °С для некоторых форм увеличивается на 1-2 порядка. Возможно образование и накопление отложений за счет взаимодействия продуктов пиролиза масел с конденсатом натрия на относительно холодных поверхностях. Попадание веществ, содержащихся в этих отложениях, в натрий при 550 °С может приводить к резкому возрастанию концентрации водорода и активных форм углеродсодержащих примесей.

Известны случаи аварийных протечек большого количества масла из системы охлаждения и смазки подшипников главного циркуляционного насоса в первый контур реактора. Для возобновления эксплуатации реактора потребовались перегрузка активной зоны и проведение обширного комплекса исследований, в которых моделировались условия аварии и выполнялись оценки состояния натриевого теплоносителя.

В докладе представлены:

- результаты исследований по определению состава и кинетики выхода летучих форм углеводов и отложений на стенках трубопроводов натриевого контура, относящиеся к аварийным протечкам масла;
- обобщенные результаты сравнительных испытаний реакционной способности различных видов масел, используемых на реакторных установках при их взаимодействии с натрием, а также продуктов их пиролиза на стенках газовой полости над натрием;
- приведены первые результаты исследований термолиза и взаимодействия с натрием охладителя на основе полиалкилбензола.

Проблемы определения науглероживающего потенциала натриевого теплоносителя

Загорулько Ю. И., Ганичев Н. С., Коновалов М. А., Ильичева Н. С.

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

Ключевые слова: массоперенос, углерод, натрий, взвешенная фаза, источник углерода, науглероживание.

Основной проблемой экспериментального моделирования процессов массопереноса углерода в натриевых циркуляционных контурах реакторных установок на натриевых стендах является различие в механизмах фазовых переходов в системе «натрий–углерод» в зависимости от масштабного параметра установок, определяемого отношением массового расхода натрия к единичной смоченной поверхности трубопроводов и оборудования в зонах с отрицательным температурным градиентом.

При общей концентрации углерода в натрии 30 млн^{-1} в температурном интервале 673—823 К система «натрий–углерод» является двухфазной. Доля растворенного в натрии углерода при этом составляет от $5,3 \cdot 10^{-3}$ до $1,2 \cdot 10^{-1}$. Остальная масса углерода находится в натрии в виде дисперсной системы, транспортируемой потоком теплоносителя. Эта система обладает седиментационной и концентрационной устойчивостью при гидродинамических условиях, имеющих место в реакторных установках. Средний характерный размер частиц углерода соответствует интервалу значений $(1—5) \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Для экспериментальных установок характерны низкие значения масштабного параметра, что, при наличии источника растворенного в натрии углерода в высокотемпературной зоне контура, приводит к его преимущественной кристаллизации на стенках теплообменного оборудования. Концентрация углерода в низкотемпературной зоне контура в основном определяется частицами углерода, образующимися за счет гомогенного механизма кристаллизации или эрозионного выноса из отложений. Таким образом, экспериментальные исследования процессов науглероживания/обезуглероживания конструкционных материалов в натрии в условиях неизотермического контура являются адекватными, если на установке в зоне испытаний исследуемых материалов обеспечено поддержание постоянного, контролируемого уровня термодинамической активности углерода.

В докладе представлены результаты исследований науглероживания аустенитных сталей при высоких температурах в зависимости от уровней термодинамической активности углерода в натрии. Показано, что при значениях активности близких к 0,1 науглероживание аустенитных сталей при 700—750 °С превышает ~ 1,2 масс. %. Равновесная активность углерода в сталях 04X16H15M3Б, 08X16H15M3Б при 700—750 °С близка к значению $5 \cdot 10^{-3}$, характерному для сталей 304 и 316.

Экспериментально установлено существенное превышение скорости науглероживания аустенитных сталей при значениях активности углерода в натрии 0,1 по сравнению со скоростью их последующего обезуглероживания при активности углерода в натрии, составляющей 0,01—0,02. Таким образом, кратковременные «удары» высокой активности в натриевом теплоносителе, например, при аномальных или аварийных загрязнениях углеродсодержащими примесями, способны вызвать катастрофическое науглероживание конструкционных материалов при 700—750 °С. Высокая концентрация углерода в конструкционных материалах длительно сохраняется при низких уровнях активности углерода в последующее время.

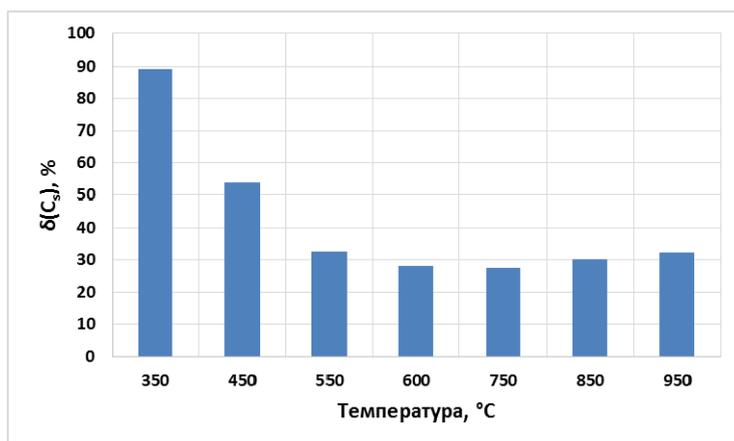
Оценка неопределенности растворимости кислорода в расплаве свинца

Легких А. Ю., Скоморохов А. Н., Садовничий Р. П.

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

Ключевые слова: дисперсия, кислород, концентрация, неопределенность, растворимость, свинец, температурные зависимости.

Для обеспечения защиты конструкционных сталей от коррозионно-эрозионного воздействия свинцового теплоносителя в настоящее время выбран метод пассивации поверхностей конструкционных сталей, для реализации которого в процессе эксплуатации циркуляционного контура реакторной установки необходим непрерывный контроль окислительного потенциала свинцового теплоносителя и его корректировка, в случае выхода за установленные границы. Контроль окислительного потенциала свинцового теплоносителя осуществляется с помощью датчиков активности кислорода. При использовании упомянутых датчиков измеряемым параметром является термодинамическая активность кислорода. В качестве параметра, характеризующего уровень окислительного потенциала теплоносителя, используется концентрация кислорода, растворенного в свинцовом теплоносителе. Связь между концентрацией и термодинамической активностью кислорода осуществляется с помощью растворимости кислорода в жидком свинце. Неопределенность растворимости кислорода в жидком свинце вносит вклад в общую неопределенность концентрации растворенного в свинце кислорода. В докладе выполнена оценка неопределенности растворимости кислорода в жидком свинце на основании имеющихся в литературе экспериментальных данных и её вклада в неопределенность концентрации кислорода, растворенного в свинцовом теплоносителе. На рисунке представлены результаты оценки относительной неопределённости растворимости кислорода в расплаве свинца при разных температурах.



Результаты оценки относительной неопределенности растворимости кислорода в расплаве свинца

Исследование характеристик гранул оксида свинца после длительной выдержки в жидком свинце

Скобеев Д. А., Легких А. Ю.

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

Ключевые слова: тяжёлый жидкометаллический теплоноситель, массообменный аппарат, растворенный кислорода, оксид свинца, гранулы, эксперимент.

В массообменных аппаратах, разрабатываемых для реализации твердофазного метода регулируемой подпитки тяжелого жидкометаллического теплоносителя растворенным кислородом, в качестве наполнителя используются гранулы оксида свинца. Одним из важных вопросов при обосновании надежности массообменных аппаратов является исследование свойств гранул оксида свинца после их длительного нахождения под уровнем тяжелого жидкометаллического теплоносителя при рабочей температуре.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик гранул оксида свинца после их выдержки в расплаве свинца при температуре $(420 \pm 10)^\circ\text{C}$ в безрасходном режиме в течение 6000 часов.

Вопросы нормативного регулирования химических режимов теплоносителей на АЭС России с реакторами на быстрых нейтронах

Харитонов Н. Л., Шарафутдинов Р. Б., Хренников Н. Н.

Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), Москва
kharitonova@secnrs.ru

Ключевые слова: химический режим, теплоноситель, реактор на быстрых нейтронах, нормативное регулирование.

Рассмотрены основные направления совершенствования нормативных документов в части установления требований к химическим режимам теплоносителей и регулирования химического режима атомных станций с реакторами на быстрых нейтронах в России.

Показана необходимость оптимизации нормативного регулирования, обусловленная требованиями обеспечения целостности защитных барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду, а также надежностью и доступностью систем и элементов, важных для безопасности. Рассмотрены вопросы установления требований к разработке, обоснованию и поддержанию химических режимов. Перечислены принципы, на основании которых разрабатываются, устанавливаются и поддерживаются показатели качества теплоносителя и рабочих сред систем АЭС, важных для безопасности.

Приведена информация об основных требованиях безопасности, отраженных в действующих нормативных документах, устанавливающих общие требования к качеству жидкометаллических теплоносителей для быстрых реакторов (НП-018-05, НП-001-15, НП-082-07).

Показано, что для натриевого теплоносителя первого и второго контуров быстрых натриевых реакторов (БН) ключевыми требованиями к химии теплоносителя являются:

- минимизация коррозии конструкционных материалов в натрии с целью исключить контакт натрия с водой и течи натрия;
- обеспечение противопожарных мероприятий;
- минимизация массопереноса продуктов коррозии в натриевых контурах;
- обеспечение контроля чистоты натрия и защитного газа;
- обеспечение очистки натрия от примесей;
- обеспечение отмывки оборудования от натрия.

Рассмотрены общие требования, относящиеся к технологии обеспечения надлежащего качества тяжелых жидкометаллических теплоносителей (свинец, свинец-висмут), принципиально важные для обеспечения безопасности реакторных установок.

В частности, отмечены требования:

- по исключению зашлаковывания оксидами свинца и продуктами коррозии конструкционных материалов теплопередающих поверхностей систем, важных для безопасности, а также систем безопасности;
- по обеспечению минимальной коррозии конструкционных сталей оборудования и трубопроводов, находящихся в контакте со свинцовым теплоносителем;
- по обеспечению минимального количества отложений на теплопередающих поверхностях твэлов, оборудования и в трубопроводах систем, важных для безопасности (в том числе, в газовых системах);

- о наличии сертифицированных контрольно-измерительных устройств, позволяющих контролировать правильность ведения технологического процесса и целостность оборудования и трубопроводов;
- по исключению создания взрывоопасных концентраций водорода в системах и оборудовании, в котором в процессе эксплуатации возможно накопление водорода.

Оценка низкокислородной границы плюмбоферритных фаз в расплаве свинца

Осипов А. А., Асхадуллин Р. Ш., Лаврова О. В., Иванов К. Д.,
Ниязов С-А. С., Чепоров Р. Ю.

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

Ключевые слова: плюмбоферриты, жидкий свинец, термодинамическая активность кислорода, оксид железа, дисперсная фаза.

В настоящее время в качестве перспективных ядерных энергетических установок рассматриваются установки с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) на основе расплавов свинца, так как данные теплоносители обладают рядом преимуществ по сравнению со щелочными металлами и другими теплоносителями. Особенностью тяжелых жидких металлов является их достаточно высокая коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам, однако в настоящее время эта проблема частично решена за счет формирования на поверхностях сталей защитных оксидных покрытий на основе оксидов железа. Это определяет основные задачи современной технологии ТЖМТ, заключающиеся в обеспечении условий формирования и поддержания оксидных слоев с оптимальными защитными свойствами на поверхностях конструкционных сталей. Успешность решения данных задач в общем случае зависит от адекватного представления и количественного описания свойств системы «жидкометаллический расплав — оксидная фаза». В данной работе рассматриваются вопросы о возможности образования в жидком свинце плюмбоферритных фаз, их состава и термодинамических свойств. Рассмотрен подход к расчету стандартной энергии образования плюмбоферритных фаз в системе Pb-Fe-O как функции их состава и температуры. В рамках данного подхода для нахождения стандартной энергии образования фазы используются известные термодинамические потенциалы соединений, образование которых возможно из компонентов системы. Сделана оценка низкокислородной границы плюмбоферритных фаз в расплаве свинца.

К вопросу о влиянии дисперсных оксидов железа на термодинамическое состояние ТЖМТ в неизотермических условиях

Осипов А. А., Иванов К. Д., Ниязов С-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: массоперенос, жидкий металл, свинец, термодинамическая активность кислорода, оксид железа, дисперсная фаза.

Исследования тяжелых жидких металлов (ТЖМТ) в качестве теплоносителей ядерных энергетических установок (ЯЭУ) показывают, что интенсивность взаимодействия конструкционных материалов с ТЖМТ зависит, в частности, от величины термодинамической активности кислорода в нем. При этом для обеспечения работоспособности и безопасности ЯЭУ с ТЖМТ на длительной временной базе необходимо поддерживать определенную уровень ТДА кислорода жидком металле для поддержания на поверхности конструкционного материала условий существования защитного оксидного слоя, компонентами которого являются основные компоненты конструкционных сталей (как правило, железо и хром). Однако оксидный слой не является абсолютной преградой для компонентов сталей, которые неизбежно выходят в теплоноситель. Больше всего в теплоноситель выходит железо, которое взаимодействует с растворенным в жидком металле кислородом и образует дисперсные оксиды железа. Ранее было показано, что наблюдаемые в эксперименте результаты можно количественно описать термодинамическими моделями (стехиометрической и нестехиометрической), в которой измеряемая величина ТДА кислорода a_O является функцией локальных параметров температуры T и интегральных (с учетом дисперсной оксидной фазы) содержаний железа $C_{\Sigma Fe}$ и кислорода $C_{\Sigma O}$ в жидком металле. В обеих моделях рассматривается двухфазная область ($a_{FeO_\beta} = 1$), в которой $a_O = f(T, \Delta)$, где $\Delta = C_{\Sigma O} - \beta C_{\Sigma Fe}$, а $\beta = O/Fe$ — состав оксида, и, следовательно, в стехиометрической модели ($\beta = const$) ТДА кислорода a_O не зависит от содержания оксида. Действительно, изменение массы оксида в системе оставляет параметр Δ неизменным. В данной работе показано, что активность оксидной фазы a_{FeO_β} в общем случае является функцией параметров T , $C_{\Sigma O}$ и $C_{\Sigma Fe}$ и, следовательно, в рассмотренных ранее моделях условие двухфазности $a_{FeO_\beta} = 1$ является частным случаем состояния системы и в общем случае может не выполняться. Показано, что в отличие от изотермической системы, ТДА кислорода в неизотермической системе зависит от содержания дисперсной фазы. Характерным является случай, когда рафинирование теплоносителя в холодной точке приводит к нарушению условия термодинамической устойчивости магнетита в горячей зоне. Сделаны количественные оценки влияния содержания дисперсных оксидов в ТЖМТ на термодинамическое состояние теплоносителя в неизотермических условиях в изоконцентрационном и неизоконцентрационном режимах.

О возможности оценки содержания дисперсных оксидов железа в ТЖМТ в рамках нестехиометрической модели

Осипов А. А., Иванов К. Д.

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

Ключевые слова: массоперенос, жидкий металл, свинец, термодинамическая активность кислорода, оксид железа, дисперсная фаза.

Исследования процессов массопереноса в ТЖМТ с участием твердофазных оксидов на основе компонентов конструкционных сталей связано со значительными сложностями, главными из которых являются, не только технические трудности формирования таких частиц в потоке теплоносителя, но и отсутствие адекватных методик контроля их содержания в теплоносителе. Единственным способом такого контроля в настоящее время является периодический отбор проб теплоносителя с их последующим химико-спектральным анализом на содержание примесей, по которому расчетным путем можно количественно определить содержание твердофазных оксидов. Однако практика использования данного метода контроля показала его высокую чувствительность к конкретным условиям его реализации, что часто приводило к значительному разбросу результатов, который мог составлять один порядок и выше от измеряемой величины. Это, в свою очередь, способствовало формированию достаточно широко распространенного в настоящее время мнения о не представительности данного метода контроля. Следует заметить, что данный метод, несмотря на его недостатки, используется уже в течение многих (более 50) лет. Других методов контроля твердофазных оксидов в тяжелых теплоносителях на сегодняшний день нет. Таков в настоящее время уровень разработок методик контроля примесного состава ТЖМТ.

В данной работе рассматривается возможность косвенного контроля твердой фазы на основе оксидов железа. В основе метода лежит нестехиометрическая модель, согласно которой состав дисперсных оксидов железа в ТЖМТ является переменной величиной, зависящей, в частности, от температуры и ТДА кислорода в теплоносителе. Это позволяет количественно оценить содержание дисперсных оксидов в ТЖМТ по реакции ТДА кислорода на возмущения температуры или других параметров, влияющих на термодинамическое состояние теплоносителя.

Диссоциация оксидов железа в расплавах тяжелых металлов

Осипов А. А., Иванов К. Д.

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

Ключевые слова: термическая диссоциация, жидкий свинец, оксиды железа термодинамическая активность, кислорода

В настоящее время в качестве перспективных ЯЭУ рассматриваются установки с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) на основе расплавов свинца, так как данные теплоносители обладают рядом преимуществ по сравнению со щелочными металлами и другими теплоносителями. Особенностью тяжелых жидких металлов является их достаточно высокая коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам. Решения данной проблемы предлагается достичь за счет формирования на поверхностях сталей защитных оксидных покрытий на основе компонентов конструкционных сталей и регулирования кислородного потенциала в теплоносителе в определенном диапазоне значений. Однако для существования любых соединений в жидких металлах (как и в любой другой среде) должны быть выполнены условия необходимые для их существования. В случае оксидных соединений не только значение термодинамической активности кислорода, но и активность металлического компонента определяет термодинамическую устойчивость соединения. Опыт показывает, что необходимое значение активности металлического компонента (например, железа) на границе оксид – расплав может быть достигнуто за счет его диффузионного выхода через оксидный слой из стали. Так как в общем случае диффузионный выход железа является функцией состава оксида и условий в объеме теплоносителя можно представить ситуацию, когда поток железа из стали сильно ослаблен (например, в случае значительной толщины оксидного слоя или плохих диффузионных свойств) и не способен обеспечить необходимое значение активности на внешней оксидной границе. В этих условиях оксид начнет диссоциировать (аналогичная ситуации может возникнуть и по причине нехватки кислорода на внешней оксидной границе). В неизотермических условиях оксид будет диссоциировать в горячей зоне, а продукты диссоциации стремится образовать оксид, но уже в объеме теплоносителя и с меньшим значением температуры. Если оксиды образуются в объеме теплоносителя и рафинируются из него, то это приводит к дальнейшей диссоциации оксида на поверхности стали в горячей зоне. Очевидно, что в таком режиме интенсивность процессов массопереноса в контуре зависит в том числе и от количества продиссоциировавшего оксида. В данной работе рассматривается вопрос о количественной характеристике процессов диссоциации оксидов железа в расплавах тяжелых металлов. Получены численные значения величин, характеризующих процессы диссоциации как функции температуры и кислородного потенциала теплоносителя. Показано, что результаты работы могут быть использованы при экспериментальных исследованиях кинетических и термодинамических характеристик процессов диссоциации соединений в жидких металлах.

Термодинамическая оценка устойчивости оксидных систем применительно к материалам датчика контроля кислорода в натрии

Лаврова О. В., Асхадуллин Р. Ш., Легких А. Ю.

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

Ключевые слова: термодинамический расчет, кислород, натрий, датчик контроля кислорода, керамика, взаимодействие материалов, электрод сравнения, диаграммы, разность потенциалов.

Применительно к материалам чувствительного элемента датчика контроля кислорода в натрии проведен термодинамический анализ некоторых металлооксидных систем при их контакте с натриевым теплоносителем герметичного неизотермического циркуляционного контура.

Показано, что в определенных условиях раскисленный натрий может частично восстанавливать оксиды керамики на основе циркония и гафния с добавками оксидов некоторых лантаноидов. Кроме того, натрий восстанавливает оксид кремния, на основе которого производят ситалл, являющийся кандидатным материалом для герметизации чувствительного элемента датчика.

Влияние свойств покрытий на теплообмен при охлаждении высокотемпературных цилиндрических тел

Молотова И. А.^{1, 2}, Забиров А. Р.^{1, 2}, Виноградов М. М.¹, Ягов В. В.¹

¹ Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт (НИУ МЭИ), Москва,

² Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва

irina_molotova1705@mail.ru

Ключевые слова: безопасность АЭС, толерантное топливо, нестационарный теплообмен, микропузырьковое кипение, недогретая жидкость.

Процесс охлаждения высокотемпературных тел является распространенным физическим процессом и наблюдается как в различных технических приложениях (безопасность атомных станций, термическая обработка металлов в металлургии), так и в природе (например, при взаимодействии лавы с водой во время подводных или прибрежных вулканических извержений). Что касается ядерной энергетики, в частности безопасности АЭС, то во время аварии с потерей теплоносителя (LOCA — loss-of-coolant-accident) топливная оболочка ядерного реактора перегревается, в этом случае наискорейшее охлаждение разогретых твэлов — это единственный способ предотвращения катастрофы. Также возникновение тяжелой аварии с расплавлением активной зоны ядерного реактора и взаимодействие расплава с охлаждающей водой чревато опасностью парового взрыва.

После аварии на АЭС Фукусима-1 в 2011 г. были начаты широкомасштабные исследования по поиску нового устойчивого к авариям толерантного топлива. Исследование влияния свойств новых материалов на теплообмен при охлаждении в случае повторного залива активной зоны и возможность точного предсказания температуры перехода к интенсивному режиму охлаждения позволят обосновать с позиций теплофизики выбор нового вида толерантного топлива. Если начальная температура тела превышает критическую температуру охлаждающей жидкости, то имеет место пленочный режим кипения, характеризующийся низкими коэффициентами теплоотдачи и низкими плотностями отводимых тепловых потоков. Во многих технологических процессах стараются избежать или сократить длительность этого режима и добиться перехода к более интенсивному режиму кипения. Многочисленные отечественные и зарубежные исследования свидетельствуют о прямом влиянии свойств поверхности на теплообмен при охлаждении высокотемпературных тел в жидкостях. Изменение параметров поверхности путем их модификации или нанесения различных покрытий может существенно повысить температуру перехода к интенсивному режиму охлаждения.

Целью данной работы является экспериментальное исследование процессов охлаждения высокотемпературных цилиндрических тел в жидкостях, а также определение влияния свойств покрытий на теплообмен при охлаждении. На кафедре инженерной теплофизики НИУ МЭИ был создан экспериментальный стенд для проведения экспериментов в широком интервале температур (от -80 до $+100$ °С) и давлений (от атмосферного до 10 МПа).

Рабочие образцы представляют собой цилиндры из различных металлов со сферической головкой диаметром 10 мм и длиной 50 мм. Был получен большой массив экспериментальных данных по охлаждению цилиндрических образцов, эксперименты проводились на гладких цилиндрах, выполненных из различных металлов (никель, нержавеющая сталь), а также на медных цилиндрах с различными покрытиями разной

степени шероховатости (золотое покрытие, покрытия из нержавеющей стали). Температура измерялась в двух местах — в центре и на поверхности образцов (кроме медных цилиндров, так как медь имеет высокую теплопроводность). Образцы охлаждались в жидкостях с различными теплофизическими свойствами при разных температурах и давлениях. По результатам проведённых экспериментов были получены зависимости температуры цилиндра от времени – экспериментальные термограммы охлаждения. При решении обратной задачи теплопроводности на основе первичных термограмм охлаждения произведен расчет коэффициентов теплоотдачи и плотностей теплового потока.

Авторами было экспериментально подтверждено существование особого режима теплообмена с высокой интенсивностью, который возникает при охлаждении в воде с большими недогревами. Обнаружено, что с увеличением недогрева жидкости и давления происходит рост минимальной температуры плёночного кипения (так называемой температуры Лейденфроста). Также экспериментально был замечен рост температуры Лейденфроста с уменьшением тепловой активности покрытий и увеличением их толщины.

Исследования были проведены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект РФФИ № 19-38-60057.

Измерение скорости звука в жидком свинце в широком диапазоне плотности

Кондратьев А. М., Рахель А. Д.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва
cp1593h@mail.ru

Ключевые слова: свинец, металлы, скорость звука, фазовый переход, кипение, критическая точка.

Мы развиваем динамическую методику измерений, которая позволяет изучать теплофизические свойства электропроводящих материалов при высоких температурах и давлениях, недостижимых для статических методов. Суть этой методики излагается в другом докладе, который представляется на этой конференции Рахелем А. Д. и называется «Исследование теплофизических свойств жидкометаллических теплоносителей при высоких давлениях и температурах в экспериментах по электрическому взрыву фольг».

В настоящее время мы расширяем диагностику наших экспериментов и разрабатываем методику по прямому измерению скорости звука для расширенных жидких металлов (плотность которых в несколько раз ниже нормальной), в том числе и тугоплавких. Прямые измерения скорости звука важны для нас по двум причинам. Во-первых, они позволяют для исследуемого металла установить положение кривой кипения на его фазовой диаграмме при высоких значениях давления. Такая возможность связана с известным эффектом скачкообразного уменьшения скорости звука при переходе образца из однофазного (жидкого) состояния в двухфазное состояние жидкость — газ. Таким образом, измерения скорости звука позволяют определить положение кривых кипения для различных металлов и, следовательно, оценить положение их критических точек. Вторая причина, по которой мы развиваем эту методику — методическая. Дело в том, что уже имеющаяся у нас диагностика дает набор физических величин, характеризующих термодинамическое состояние образца, из которого, используя известные термодинамические соотношения, можно определить скорость звука. Сравнение полученных этим косвенным способом значений с результатами прямых измерений позволит точнее оценить погрешности наших измерений. Следует также отметить, что определить скорость звука косвенным способом для двухфазной области жидкость — газ затруднительно. Причиной этого является то, что при переходе образца в двухфазное состояние в нем развиваются неоднородности плотности и температуры, и интерпретация данных измерений наших динамических экспериментов для этой области становится проблематичной.

Для измерения скорости звука мы используем времяпролетный метод. Он заключается в следующем. В заданный момент времени t_1 на фронтальной поверхности образца возбуждается акустическое возмущение (с помощью лазерного импульса). Момент прихода возмущения на тыльную поверхность образца t_2 фиксируется лазерным интерферометром. Скорость звука определяется как отношение $d(t_2)/(t_2 - t_1)$, где $d(t_2)$ — толщина образца в момент прихода акустического возмущения на его тыльную поверхность. В настоящей работе приводятся данные по измерению скорости звука для жидкого свинца. Мы показываем, что развиваемая методика позволяет добиться хорошей воспроизводимости результатов измерений скорости звука, провести обоснованное сравнение полученных нами результатов с литературными данными и результатами, выполненных нами ранее косвенных измерений и, тем самым, оценить погрешность наших измерений. Работа выполнена при поддержке президиума РАН, программы «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии».

Поверхностное натяжение эвтектического расплава свинец-висмут в вакууме и атмосфере воздуха

Алчагиров Б. Б., Канаметова О. Х., Хибиев А. Х., Дышекова Ф. Ф.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» (КБГУ), Нальчик
azamat0603@mail.ru

Ключевые слова: свинец, висмут, эвтектика, жидкометаллические теплоносители, поверхностное натяжение, вакуум, атмосферный воздух, межфазные границы, окисление, растворимость газов, адсорбционные процессы.

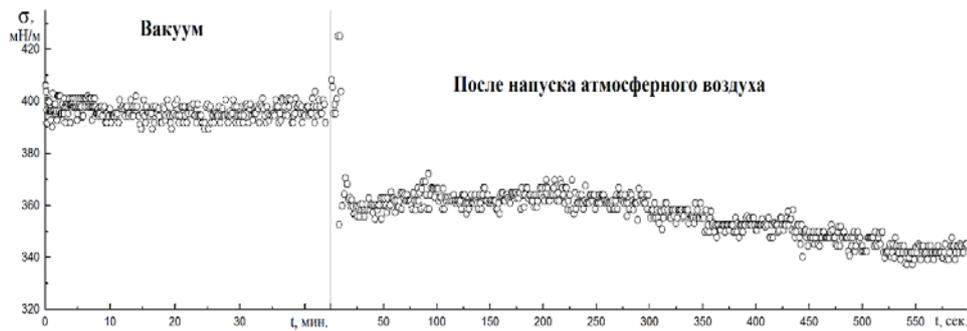
Свинцово-висмутовый эвтектический сплав (44,5 масс.% Pb + 55,5 масс.% Bi) применяется в качестве теплоносителя в ядерных реакторах на быстрых нейтронах и, более того, он рассматривается в качестве возможного теплоносителя для перспективных реакторных установок нового поколения GEN-IV и т. д. [1].

Одним из важных характеристик теплофизических свойств теплоносителей является поверхностное натяжение (ПН), определяющее в значительной степени процессы смачивания стенок теплообменников и, следовательно, эффективность теплосъема с тепловыделяющих элементов и т. д. ПН эвтектического расплава PbBi в условиях вакуума изучалось неоднократно [2], но литературные данные ПН различаются на $\pm 15\%$, что в несколько раз превышает погрешности измерений, заявляемые их авторами. В то же время проблема изучения влияния различных газов на ПН теплоносителей остается пока на начальной стадии. В связи с этим целью настоящей работы является изучение ПН расплава PbBi как в условиях высокого статического вакуума, так и в зависимости от времени экспозиции поверхности расплава в атмосферном воздухе.

Для этого нами использована автоматизированная экспериментальная установка для изучения методом большой лежащей капли быстрых изменений ПН [2]. Свинцово-висмутовая эвтектика готовилась из свинца С00 и висмута Ви00. Давление осушенного по стандартной методике атмосферного воздуха при измерениях ПН составляло около одной атмосферы, а суммарная погрешность измерений ПН расплава PbBi — 2%.

Главная отличительная особенность использованной в работе методики определения ПН заключается в том, что благодаря использованию специально разработанной конструкции измерительной ячейки [3] впервые измерения ПН проведены нами в одном и том же эксперименте, на одной и той же поверхности образца эвтектического расплава PbBi в безостановочном режиме «нон-стоп» в условиях статического вакуума (10^{-4} Па) и атмосфере газовой среды (атмосферного воздуха).

Поверхностное натяжение эвтектического расплава PbBi в статическом вакууме. Измерения ПН эвтектического расплава PbBi при 533 К в статическом вакууме длились около одного часа, в течение которого были получены около трех сотен экспериментальных точек. Согласно нашим данным, ПН (σ) эвтектического расплава PbBi оказалось равным 400 ± 4 мН/м. Отметим, что ранее (2003 г.) в условиях сверхвысокого вакуума нами было получено значение $\sigma_{\text{вак}} = 403$ мН/м. Для сравнения своих результатов с литературными данными перечислим лишь (в хронологическом порядке), рекомендуемые значения поверхностного натяжения ($\sigma_{\text{вак}}$) эвтектического расплава PbBi (в пересчете для $T = 533$ К) и их авторов: И.А. Чусов, В.Г. Проняев, Г.Е. Новиков и Н.А. Обысов (Изв. вузов, 2020 г.), $\sigma_{\text{вак}} = 404$ мН/м; Vitaly Sobolev, (Belgium, 2011 г.), $\sigma_{\text{вак}} = 405$ мН/м; Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, S. Eckert, and G. Gerbeth, (2008 г.), $\sigma_{\text{вак}} = 406,2$ мН/м; П.Л. Кириллов, Н.Б. Денискина, (2000 г., 2008 г.), $\sigma_{\text{вак}} = 406,5$ мН/м.



Поверхностное натяжение эвтектического расплава PbBi при температуре 533 К в вакууме и атмосферном воздухе

ПН эвтектического расплава PbBi в атмосферном воздухе. На рисунке графически представлены результаты обработки полученных нами данных о ПН эвтектического расплава PbBi в статическом вакууме и атмосферном воздухе (для удобства сравнения).

Скачки величины ПН расплава PbBi в начале опытов (время $t = 0$), когда только что сформирована капля, а также в момент напуска в прибор воздуха, обусловлены небольшими механическими быстро затухающими колебаниями капли. Как видно на рисунке, в сравнении с данными, полученными в условиях вакуума, за первые 10 секунд экспозиции поверхности расплава в атмосферном воздухе ПН расплава PbBi понижается на 20 мН/м, а еще через 10 мин — до 340 мН/м, то есть на 10% и 15% соответственно. Степень и скорость понижения ПН зависят от длительности экспозиции поверхности расплава в атмосферном воздухе. Полученным результатам даются объяснения и соответствующие интерпретации, используя при этом сведения о растворимости и активности кислорода (основного компонента атмосферного воздуха) в эвтектическом расплаве PbBi.

Заключение

1. Впервые измерения ПН расплава PbBi осуществлены последовательно и в безостановочном режиме на одной и той же поверхности эвтектического расплава PbBi в условиях высокого вакуума и атмосферном воздухе.

2. Показано, что в условиях статического вакуума (10^{-4} Па) при температуре 533 К поверхностное натяжение расплава PbBi составляет 400 ± 4 мН/м, что находится в удовлетворительном согласии с рекомендуемыми литературными данными.

3. В сравнении с вакуумом, за первые 10 секунд экспозиции в атмосфере воздуха поверхностное натяжение эвтектического расплава PbBi понижается на 20 мН/м, а еще через 10 мин — до 340 мН/м, то есть на 15% и более, что значительно превышает погрешность экспериментов. Показано, что степень и скорость понижения ПН зависят от времени экспозиции поверхности расплава в воздухе.

Список литературы

1. Heavy Liquid-Metal Coolants in Nuclear Technologies (HLMC-2018): Book of Abstracts of the Fifth Conference. – Obninsk, SSC RF – IPPE, October 8–10, 2018. – Obninsk, SSC RF – IPPE, 2018. – 155 p.
2. Database of thermophysical properties of liquid metal coolants for GEN-IV Sodium, lead, lead-bismuth eutectic (and bismuth) // Scientific Report of the Belgian Nuclear Research Centre. – 2011. – 175 p.
3. Алчагиров Б.Б., Кясова О.Х., Коков З.А. Экспериментальная установка для определения быстрых изменений поверхностного натяжения жидкометаллических теплоносителей в условиях адсорбции из газовой среды // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 5. – С. 25–34.

От анализа свойств пульсаций к количественным характеристикам переноса. Эффект структурирования дисперсии пульсаций

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, корреляция, перенос, кластеризация, температура, жидкий металл, скедастичность.

Температура и термодинамическая активность (ТДА) кислорода являются одними из основных параметров, определяющих процессы тепломассопереноса в жидких металлах. Однако знание только этих параметров недостаточно для описания процессов массопереноса в реальной системе.

В данной работе показано, что анализ естественных пульсаций температуры и ТДА кислорода позволяет получить новую информацию о состоянии системы, необходимую для более полного описания процессов тепломассопереноса. А именно, анализ взаимных корреляций температуры в различных точках позволяет определить локальное значение скорости жидкого металла, а анализ пульсаций ТДА кислорода позволяет получить более детальную информацию как о физико-химическом состоянии теплоносителя, так и состоянии самого датчика ТДА. Это определяет практическую значимость исследований пульсаций как со стороны процессов тепломассопереноса, так и стороны создания и совершенствования методов контроля параметров жидкометаллического теплоносителя.

В научном плане интересным является, обнаруженное в эксперименте, свойство кластеризации дисперсии пульсаций. Показано, что кластеризация дисперсии пульсаций температуры (в определенном диапазоне временного масштаба) носит структурированный характер, и аналогично свойствам абсолютных приращений пульсаций финансовых индексов (гетероскедастичность). В работе обсуждается новая феноменологическая модель пульсаций, описывающей в том числе и эффект кластеризации.

Применение нестехиометрической модели к оценке поверхностных эффектов в системе оксид железа — расплав свинца

Осипов А. А., Иванов К. Д., Асхадуллин Р. Ш.

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, свинец, свинец-висмут, нестехиометрия, оксиды железа смачивание, активность кислорода.

Результаты исследования поверхностных свойств металлов и сплавов находят широкое применение при решении ряда крупных научно-технических проблем. Хотя проблемам смачивания металлическими расплавами твердых поверхностей посвящено много работ, тем не менее, пока недостаточно изучено влияние процессов взаимодействия подложки и жидкого металла, а также наличие оксидных пленок как на подложках, так и на капле расплава. Особенно актуальна эта проблема при смачивании расплавами на основе свинца различных сталей, так как данные расплавы в настоящее время рассматриваются как перспективные жидкометаллические теплоносители ядерных энергетических установок.

Смачивание в системе теплоноситель — сталь определяет ряд возможных существенных эффектов, среди которых можно выделить влияние смачивания на теплогидравлические параметры и эффект Ребиндера. В данной работе предложены количественные методы оценки поверхностных эффектов в системах с химическим взаимодействием компонентов на примере системы «оксид железа — расплав свинца» в рамках нестехиометрической модели. В соответствии с нестехиометрической моделью энергия Гиббса образования соединения является известной функцией температуры и его состава, что позволяет с учетом уравнений химических реакций, уравнений массового баланса и уравнения Гиббса — Дюгема описать термодинамические свойства рассматриваемой системы. Показано, что применение нестехиометрической модели к межфазным эффектам позволяет определить и рассчитать порог смачивания свинцом оксидов железа.

Исследование теплофизических свойств жидкометаллических теплоносителей при высоких давлениях в экспериментах по электрическому взрыву фольг

Кондратьев А. М., Коробенко В. Н., Рахель А. Д.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
(ОИВТ РАН), Москва
rakhel@oivtran.ru

Ключевые слова: свинец, графит, жидкий углерод, свинцово-висмутовый сплав, тепловое расширение, коэффициент Грюнайзена, уравнение состояния, удельное сопротивление, температура плавления, критическая точка.

Для исследования теплофизических свойств металлов в широкой области состояний (на фазовой диаграмме), которая включает в себя не только твердое, но жидкое и газообразное состояния (плотную плазму), нами была разработана экспериментальная методика, позволяющая проводить измерения термодинамических функций и электропроводности при температурах до 30 000 К и давлениях до 10 ГПа. Суть этой методики заключается в следующем. Образец исследуемого материала в виде отрезка фольги толщиной 15—30 мкм, вырезанного в форме квадрата со стороной 10 мм, помещается между двумя пластинами оконного материала. В качестве последнего мы используем монокристаллы сапфира или кварцевое стекло. Пластины оконного материала имеют толщину 2—5 мм, а их ширина и длина равны 10 мм. Основные плоскости этих пластин полированы до оптического качества, а их параллельность выдерживается с точностью не хуже 1 мкм на базе 10 мм. Слойка из образца и двух пластин оконного материала тщательно склеивается: контролируется отсутствие полостей, а также толщина слоев клея между образцом и пластинами оконного материала; эта толщина не должна превышать 1 мкм. Ранее нами было показано, что такой образец, помещенный в слойку, можно достаточно однородно нагреть импульсом электрического тока и образец будет испытывать практически одномерное тепловое расширение вплоть до 5–10-кратного увеличения его толщины.

В наших экспериментах импульс тока генерируется путем разряда высоковольтной батареи конденсаторов, имеет характерное время нарастания около 1 мкс и амплитуду 10—100 кА. Длительность эксперимента составляет около 1 мкс. Имеющаяся диагностика позволяет измерять ток через образец (с помощью пояса Роговского), падение напряжения на его длине (с помощью резистивного делителя напряжения), смещение поверхности образца, вызванное тепловым расширением (с помощью лазерного интерферометра), давление в образце (оригинальная методика, см. пояснение ниже), а также температуру его поверхности (с помощью пирометра). Следует подчеркнуть, что тонкие слои клея между образцом и пластинами оконного материала позволяют ограничить тепловые потери с поверхности образца до приемлемого уровня. Поясним также, что методика измерения давления в образце основана на измерении закона движения его поверхности и знании адиабаты Пуассона оконного материала. Задача сводится в этом случае к определению давления на поршне, который движется по известному закону в среде с известным уравнением состояния.

По измеренным в эксперименте временным зависимостям указанных выше величин можно определить зависимости удельной внутренней энергии, энтальпии, температуры и удельного сопротивления от давления и удельного объема вдоль некоторой линии на плоскости PV (давление — удельный объем). Эта линия представляет собой

квазистатический процесс, реализованный в данном эксперименте. Выполнив такие измерения для некоторой серии экспериментов с различными пластинами оконного материала и различной мощностью нагрева образца (мощность регулируется напряжением, до которого заряжается батарея конденсаторов), мы получаем некоторое семейство линий на плоскости PV . Получив семейство зависимостей, которое с достаточной плотностью покрывает интересующую нас область состояний, мы можем построить изохоры, изобары, изэнтропы и определить нужные нам производные термодинамических величин для этой области. Отметим, что такие измерения могут быть проведены с погрешностью не хуже 3 %.

Ранее, используя эту экспериментальную методику, нами были измерены термодинамические функции и удельное сопротивление свинца. Для жидкого свинца, плотность которого в 2,7 раза ниже нормальной, мы впервые наблюдали переход из металлического состояния в неметаллическое. Полученные нами данные по термодинамическим функциям свинца позволили оценить его критическую точку. Эта же экспериментальная методика использовалась нами для измерения температуры плавления графита. Наши измерения позволили впервые определить для достаточно широкой окрестности линии плавления зависимость термодинамического потенциала Гиббса от температуры и давления как для твердой фазы (графит), так и для жидкого углерода. При этом были измерены скачки плотности, энтальпии и удельного сопротивления при плавлении, а также значения теплоемкости, скорости звука и коэффициента Грюнайзена для обеих фаз.

В настоящее время нами проводятся аналогичные измерения для изучения теплофизических свойств свинцово-висмутового сплава. Некоторые результаты этих измерений будут представлены в этом докладе.

Исследование диффузионного выхода железа из стали ЭП-823 в расплав свинца

Иванов К. Д., Асхадуллин Р. Ш., Осипов А. А., Ниязов С-А. С.

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

Ключевые слова: массоперенос, диффузия, железо, свинец, термодинамическая активность кислорода, оксид железа.

Проблема учета выхода металлических примесей из сталей в тяжелые теплоносители является важной с двух точек зрения. Во-первых, интенсивность поступления этих примесей в теплоноситель непосредственно влияет на его качество, на формирование в первом контуре отложений на основе оксидов металлических компонентов конструкционных сталей, а также на загрязнение газовой системы и радиационную обстановку. Кроме того, процесс поступления металлических примесей в теплоноситель в ходе развития окислительного характера его взаимодействия со сталями определяет кинетику этого взаимодействия и должен учитываться в моделях окисления, особенно при увеличении продолжительности контакта стали и теплоносителя.

В настоящее время в мировой практике, несмотря на понимание важности учета потерь металлических компонентов сталей в теплоноситель, отсутствует адекватная физическая модель учета этих потерь. В основном предлагаются те или иные эмпирические или полумпирические подходы. Так, один из эмпирических подходов к оценке интенсивности выхода металлических компонентов сталей (Π_{Fe}), основан на экспериментальном определении доли металлических компонентов, которые, выйдя из матрицы стали, не встроились в оксидную пленку, а вышли непосредственно в теплоноситель. Суть данного подхода заключается в том, что масштаб рассматриваемого процесса определяется общими потерями компонентов сталей на их окисление, а выход компонентов непосредственно в теплоноситель составляет определенную часть этой величины. Для обоснования и верификации данной эмпирической модели требуется не только адекватное описание кинетики окисления стали в виде зависимости скорости потребления кислорода от времени, но и численные значения эмпирического коэффициента пропорциональности α в формуле, описывающей эти потери

$$\Pi_{\text{Fe}} = \alpha q_{\text{O}}(\tau).$$

Это требует проведения большого количества экспериментов с многочисленными вариациями условий окисления различных сталей. Поэтому впоследствии был предложен принципиально другой, физически более обоснованный вариант описания потерь, основанный на диффузионном переносе примеси железа в прилегающем к оксидной пленке слое теплоносителя. При этом выражение для потока железа в теплоноситель было записано в виде:

$$\Pi_{\text{Fe}} = q_{\text{Fe}}^{\max} (a_{\text{Fe}}^{\text{ox}} - a_{\text{Fe}}), \quad q_{\text{Fe}}^{\max} = D_{\text{Fe}} C_{\text{Fe}}^{\text{S}} / \delta,$$

где: D_{Fe} — коэффициент диффузии железа в свинце; C_{Fe}^{S} — концентрация насыщения свинца железом; $a_{\text{Fe}}^{\text{ox}}$, a_{Fe} — ТДА железа в теплоносителе на границе с оксидным слоем и в его объёме соответственно, δ — толщина диффузионного слоя на границе со сталью.

Универсальность такого описания процесса выхода железа заключается в том, что оно зависит только от свойств теплоносителя и поэтому применимо к любым конст-

рукционным сталям. Однако использование этой модели для расчетов и её экспериментальная проверка упираются в невозможность существующими в настоящее время методами измерить ТДА железа в тяжелых теплоносителях. Да и толщина диффузионного слоя является неопределенным параметром. Для верификации диффузионной модели выхода железа в свинцовый теплоноситель разработана методика обработки экспериментальных данных, заключающаяся в анализе раскислительной стадии процесса регулирования ТДА кислорода в объеме теплоносителя, и проведена серия экспериментов с вариацией температурных условий в пределах от 500 до 635 °С. На основе анализа этих экспериментов получены численные значения параметров, характеризующих интенсивность выхода железа в свинцовый теплоноситель. При этом показано, что интенсивность выхода железа в свинцовый теплоноситель при реализованных в данных экспериментах условиях хорошо описывается диффузионной моделью в виде конкретных функциональных зависимостей, описывающих изменение всех входящих в расчетное уравнение параметров во времени. В частности, получена оценка максимального потока железа в расплав свинца.

СЕКЦИЯ 2. Гидродинамика и теплообмен в реакторных установках с жидкометаллическими теплоносителями

Экспериментальные и расчетные исследования процесса кипения жидкого металла при развитии аварии в быстром реакторе: теплообмен и устойчивость циркуляции

Сорокин А. П.¹, Иванов Е. Ф.¹, Кузина Ю. А.¹, Сорокин Г. А.², Денисова Н. А.¹,
Низовцев А. А.¹, Привезенцев В. В.¹

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

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет)» (МФТИ), Москва

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, аварийная ситуация, сборка твэлов, щелочные металлы, кипение, двухфазный поток, теплоотдача, устойчивость циркуляции, кризис теплоотдачи, режимы течения, картограмма режимов, шероховатость, натриевая полость.

Кипению щелочных металлов в аварийных ситуациях в реакторах на быстрых нейтронах на протяжении последних трех десятилетий уделялось большое внимание. Исследовались теплоотдача, режимы течения теплоносителя, гидравлическое сопротивление, кризис теплоотдачи, начальный перегрев, механизмы процесса кипения, его устойчивость. Результаты исследований показывают, что по сравнению с кипением воды процесс кипения жидких металлов имеет существенные особенности:

- взаимодействие отдельных факторов оказывается настолько сложным, что начальный перегрев для вскипания жидких металлов трудно прогнозировать;
- рост парового пузыря щелочного металла носит взрывообразный характер, скорость роста ~ 10 м/с;
- у щелочных металлов образуются пузыри достаточно большого размера на ограниченном числе центров парообразования, основная часть времени цикла образования пузыря приходится на период ожидания;
- основные режимы течения двухфазных потоков щелочных металлов те же, что и у обычных теплоносителей: при давлении, близком к атмосферному, преобладает дисперсно-кольцевой режим течения;
- фазовый переход при дисперсно-кольцевом течении щелочных металлов в каналах, как правило, осуществляется испарением с поверхности пристенной пленки жидкого металла без образования пузырьков (кипения) на стенке, эффективный коэффициент теплоотдачи при этом достигает сотен кВт/м².

Решение задачи охлаждения твэлов в ТВС активной зоны в аварийных режимах, связанных с отключением циркуляционных насосов при срабатывании аварийной защиты (ULOF), приводит к изучению проблемы охлаждения твэлов при пониженных расходах теплоносителя или даже опрокидывании циркуляции в ТВС.

Для режимов с малыми скоростями течения или естественной конвекции в сборках твэлов, характерных для аварийных ситуаций, по кипению жидких металлов получены лишь ограниченные данные [1, 2].

В период 1995—2007 гг. в ГНЦ РФ – ФЭИ проведена серия экспериментов по кипению эвтектического натрий-калиевого сплава на моделях одиночных ТВС и в системе параллельных ТВС в контуре с естественной циркуляцией теплоносителя с целью изучения охлаждения ТВС активной зоны в аварийных режимах и в режиме аварийного расхолаживания с учетом влияния различных факторов на процесс кипения [3—5]. Представленные в докладе данные этих экспериментов по теплообмену и устойчивости циркуляции при кипении натрий-калиевого сплава показывают, что:

- 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;

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

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

- 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 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) и 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.

Впервые демонстрируется выявленный эффект влияния шероховатости поверхности твэлов на теплообмен и формирование режимов течения при кипении жидкого металла в пучках.

Демонстрируются результаты сравнения данных расчетных и экспериментальных исследований при кипении эвтектического натрий-калиевого сплава в моделях ТВС [5—6]. Показано, что модифицированный расчетный код SABENA-3D позволяет моделировать процесс теплообмена и устойчивость циркуляции теплоносителя при кипении жидкого металла как в одиночных ТВС, так и в системе параллельных ТВС в контурах с естественной циркуляцией теплоносителя.

Успешно проведены пилотные экспериментальные исследования нового технического решения («натриевая полость» между активной зоной и верхним торцевым экраном), предназначенного для компенсации положительного натриевого пустотного эффекта реактивности в аварийных ситуациях с кипением натрия в активной зоне быстрого реактора: существует возможность обеспечения продолжительного охлаждения натрием имитаторов ТВЭЛов в ТВС [7].

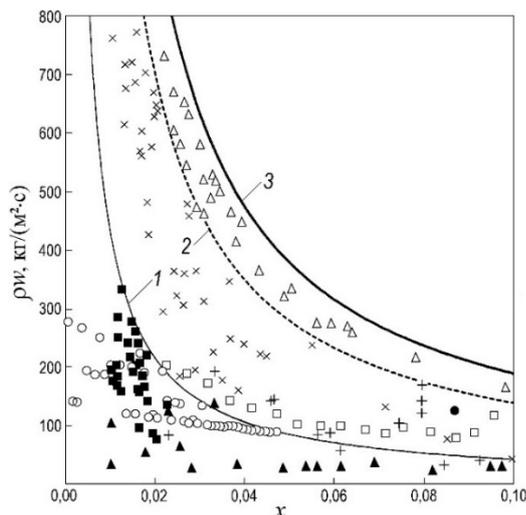
Представлены результаты обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче и картограмме режимов двухфазного потока при кипении жидких металлов в пучках. Обсуждаются задачи дальнейших исследований [7].

Картограмма режимов течения двухфазного потока жидкометаллических теплоносителей:

1 — граница пузырькового и снарядного режимов кипения; 2 — граница снарядного и дисперсно-кольцевого режима кипения; 3 — граница перехода к закризисному теплообмену;

○, □ — пузырьковый и снарядный режимы, данные по кипению натрия АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»;

▲, +, ● — первый стабильный режим, пульсационный и второй стабильный режим, соответственно, по данным Ямагучи [2]; ■, ×, △ — данные АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» по кипению натрий-калиевого сплава: пузырьковый, снарядный и дисперсно-кольцевой режимы, соответственно



Список литературы

1. Kaizer A., Huber F. Sodium Boiling Experimental a Low Power under Natural Convection // Nuclear Engineering and Design. – 1987. – Vol. 100. – No 3. – P. 367–376.
2. Yamaguchi K. Flow Pattern and Dryout under Sodium Boiling Conditions // Nuclear Engineering and Design. – 1987. – Vol. 9. – P. 247–263.
3. Efanov A.D., Sorokin A.P., Ivanov Eu.F., et al. An Investigation of the Heat Transfer and Stability of Liquid-Metal Coolant Boiling in a Natural Circulation Circuit // Thermal Engineering. – 2003. – Vol. 50. – No 3. – P. 194–201.
4. Efanov A.D., Sorokin A.P., Ivanov E.F., et al. Heat Transfer under Natural Convection of Liquid Metal during Its Boiling in a System of Channels // Thermal Engineering. – 2007. – Vol. 54. – No 3. – P. 214–222.
5. Сорокин Г.А., Ниноката Х, Эндо Х., Ефанов А.Д., и др. Экспериментальное и расчетное моделирование теплообмена при кипении жидкого металла в системе параллельных тепловыделяющих сборок в режиме естественной конвекции // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – № 4. – С. 92–106.
6. Sorokin G.A., Ninokata H., Sorokin A.P., Endo H., Ivanov Eu.F. Numerical Study of Liquid Metal Boiling in the System of Parallel Bundles under Natural Circulation // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2006. – Vol. 43. – No 6. – P. 623–634.
7. Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Иванов Е.Ф. Теплообмен при кипении жидкометаллических теплоносителей в ТВС быстрых реакторов в аварийных режимах // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – № 3. – С. 176–194.

**Результаты экспериментальных исследований характеристик
проточных частей осевых насосов, перекачивающих
тяжелый жидкометаллический теплоноситель,
в обоснование главных циркуляционных насосов контуров
со свинцовым теплоносителем**

Бокова Т. А., Боков П. А., Львов А. В., Волков Н. С., Маров А. Р.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева» (ФГБОУВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), Нижний Новгород,
M16-TS@yandex.ru

Ключевые слова: главный циркуляционный насос, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, свинец, рабочее колесо, лопатка, реактор, выправляющий аппарат, кавитация, втулочное отношение, выправляющий аппарат.

Для обоснования проектных решений главных циркуляционных насосов контуров реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями проводились экспериментальные исследования. Показано существенное отличие характеристик насосов, перекачивающих свинцовый теплоноситель, от предполагаемых расчетных характеристик. Подтверждено качественное различие кавитационных характеристик теплоносителей, состояние газов и паров в них, влияние устройств подвода и отвода, влияние характеристик профилей и геометрии лопаток рабочих колес и втулочного отношения на характеристики насосов. Исследования проводились на стендах исследовательской лаборатории «Реакторная гидродинамика» НГТУ со свинцовым теплоносителем при его температуре 440–550 °С, расходе до 2000 т/ч. Внешний диаметр рабочих колес и выправляющих аппаратов составлял около 200 мм, толщина плоских лопаток из стали типа 08X18H10T — 4,0 мм, профилированных до 6,0 мм. Скорость вращения вала насоса ступенчато изменялась через 100 об/мин от 600 до 1100 об/мин.

Исследования проводились с целью обоснования конструкторских, проектных решений насосов применительно к условиям установок малой и средней мощностей с реакторами на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, прорабатываемых в НГТУ (БРС-ГПГ). Результаты экспериментов могут быть рекомендованы при проектировании других насосов, перекачивающих ТЖМТ.

Расчётный анализ теплогидравлической устойчивости обратного парогенератора ИЯУ МБИР

Семченков А. А.¹, Кустова И. Н.¹, Никель О. А.¹, Кабанов Ю. А.²

¹ Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалея» (АО «НИКИЭТ»), Москва
a.sem@nikiet.ru

² Акционерное общество «Государственный научный центр — Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»), Димитровград

Ключевые слова: ОПГ, теплогидравлическая устойчивость, модель, расчет, анализ, ИЯУ, МБИР, HYDRA, БОР-60, эксперимент, верификация.

Устойчивость циркуляции в пароводяном контуре, то есть сохранение теплогидравлических параметров в допустимых пределах при характерных для эксплуатации возмущениях, в значительной мере определяет надёжность самого парогенератора. При определённых условиях в кипящих аппаратах возможно появление пульсаций давления, расхода и температуры.

В данной работе необходимо было определить теплогидравлические характеристики обратного парогенератора (ОПГ) исследовательской ядерной установки (ИЯУ) МБИР в различных режимах работы и оценить устойчивость работы ОПГ при различном дросселировании на входе в модули. ОПГ ИЯУ МБИР состоит из трёх однотипных модулей, которые спроектированы по аналогии с ОПГ реакторной установки БОР-60, надёжность которого подтверждена многолетней эксплуатацией. Основным отличием геометрии парогенераторов является изменение пропорций между длиной участков, при практически неизменной длине теплообменных труб, а также изменении шага закрутки интенсификаторов и диаметра отверстий для теплообменных труб.

Для расчётного моделирования ОПГ ИЯУ МБИР использовался теплогидравлический код HYDRA-IBRAE/LM/V1 (аттестационный паспорт программного средства, № 426 от 27.02.2018.). При этом теплогидравлический расчёт участков с продольно-поперечным обтеканием пучка труб потребовал применения специальной расчётной методики. Что, в свою очередь, потребовало верификации разработанной численной модели. Для верификации и отладки расчётной модели ОПГ ИЯУ МБИР, использовались экспериментальные данные, полученные на ОПГ БОР-60. Сравнение расчётных и экспериментальных данных показало, что численная модель хорошо справляется со своей задачей.

Для анализа теплогидравлической устойчивости было выбрано несколько режимов работы ОПГ ИЯУ МБИР, при различном дросселировании на входе в модули ОПГ. Также рассмотрено два возможных сценария изменения расхода. Во-первых, за счёт уменьшения давления в водяном коллекторе ОПГ, при постоянном проходном сечении трубопровода питательной воды, соединяющего коллектор с модулем. Во-вторых, за счёт уменьшения проходного сечения запорно-регулирующего клапана (ЗРК), установленного на трубопроводе питательной воды перед входом в каждый модуль, при постоянном давлении в водяном коллекторе ОПГ.

Расчёт показал, что гидравлические потери на испарительном и пароперегревательном участке в номинальном режиме работы ОПГ составили приблизительно 700 кПа, это значит, что для устойчивой работы ОПГ суммарные гидравлические потери на дросселе и экономайзерном участке должны быть не меньше этого значения (критерий Петрова). Давление пара на выходе ОПГ составляет 8,8 МПа, поэтому дав-

ление в водяном коллекторе ОПГ в номинальном режиме должно быть больше 10,2 МПа, а с учётом возможных отклонений в переходных процессах более 10,5 МПа.

Кроме того, расчётом показано, что в неустойчивых режимах работы ОПГ амплитуда колебаний меньше в случае регулирования расхода с помощью индивидуальных для каждого модуля ЗРК при постоянном давлении в водяном коллекторе ОПГ. В результате уменьшение расхода воды связано с увеличением гидравлических потерь на участке с жидкостью и уменьшением их на участке с паром, тем самым улучшается теплогидравлическая устойчивость ОПГ.

Экспериментальное исследование подшипников скольжения насосов применительно к исследовательским и реакторным контурам с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем

Безносов А. В., Бокова Т. А., Боков П. А., Маров А. Р.,
Волков Н. С., Львов А. В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева» (ФГБОУВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), Нижний Новгород,
marov_2011@mail.ru

Ключевые слова: реакторная установка, ТЖМТ, свинец, эвтектика свинец-висмут, насос, технология теплоносителя, гидродинамический подшипник, гидростатический подшипник, подшипник «сухого» трения, бесконтактное трение.

В европейских странах и Китае разрабатываются ускорительно-управляемые системы и исследовательские реакторы с температурой тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ) порядка 200—350 °С, такие как GUINEVERE, MYRRHA, CLEAR. Также в России существует перспективный проект энергетического реактора СВБР-100 с температурой свинцово-висмутового теплоносителя на входе в активную зону 320 °С.

Важным фактором работоспособности таких установок является технология поддержания определенного кислородного потенциала в ТЖМТ. Такая технология, разработанная, в том числе, с участием НГТУ, обеспечивает работоспособность энергетических контуров критических реакторов деления тяжелых ядер при рабочих температурах теплоносителей 400—550 °С. Однако такая технология теплоносителя не подходит для условий ускорительно-управляемых систем и исследовательских реакторов, работающих при температурах 200—350 °С. Таким образом, появляется необходимость разработки новой технологии ТЖМТ, а также доработки различных узлов и механизмов контуров под новые условия, в том числе подшипников скольжения насосов.

Существует большой опыт работы с гидростатическими подшипниками в ГЦН реакторных установок БОР-60, БН-600, БН-800, где они хорошо себя зарекомендовали. В открытых публикациях информация о гидростатических подшипниках, работающих в жидкометаллических теплоносителях, незначительна и относится либо к щелочным металлам (натрий и др.), либо к свинцовому теплоносителю.

В НГТУ имеется большой опыт работы, как с подшипниками контактного («сухого») трения, так и с гидростатическими подшипниками на стендах в условиях свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей. Имеются результаты износа гидростатического подшипника с двойным взаимобратным щелевым дросселированием в зависимости от времени работы и числа пуск-останов в составе насоса стенда ФТ-4 со свинцовым теплоносителем при температурах 400—550 °С. По этим данным предварительно можно сделать вывод о том, что ключевым фактором износа подшипника являются многочисленные циклы пуска-останова насоса. Такие данные помогут в дальнейшей выработке рекомендаций по проектированию и условиям эксплуатации таких подшипников, в том числе для ТЖМТ с низкими температурами (200—350 °С).

Подтверждено как расчетно-теоретическим, так и опытным путем, что невозможно создание работоспособных гидродинамических подшипников, работающих в среде жидкометаллических теплоносителей реакторных контуров (натрия, свинца, эвтектики свинец-висмут).

Применение подшипников контактного трения в реакторных контурах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями представляется маловероятным из-за низкой надежности. Работа гидростатических подшипников ГЦН реакторных контуров в режимах контактного трения является обязательной, естественной необходимостью, в периоды пуска, останова и аварийного забивания каналов этих подшипников твердодисперсными частицами примесей.

Работоспособность гидростатических подшипников должна обеспечиваться при температуре свинцово-висмутового теплоносителя 200—350 °С. В этом диапазоне температур химическая реакция восстановления оксидов ТЖМТ практически отсутствует. В процессе эксплуатации РУ возможно необратимое образование отложений в каналах частиц оксидов теплоносителя при вероятном постепенном или аварийном «залповом» поступлении кислорода в контур. Очистка каналов от возможных отложений оксидов традиционной обработкой восстановительными газовыми смесями в данных условиях маловероятна и практически невозможна.

В настоящее время в НГТУ планируются исследования, направленные на создание работоспособных подшипников для условий реакторов с ускорительно-управляемыми системами и исследовательских реакторов, работающих при температурах ТЖМТ 200—350 °С.

Испытания гидростатического подшипника в составе экспериментального участка на исследовательском экспериментальном стенде со свинцово-висмутовым теплоносителем ФТ-1 НГТУ при различных режимах работы в среде свинцово-висмутового теплоносителя при температуре 200—350 °С позволят обосновать работоспособность подшипника в указанных условиях.

Особенности теплогидравлики активных зон быстрых натриевых реакторов-наработчиков малой и большой мощности для системы замкнутого топливного цикла

Лубина А. С.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт»), Москва
lubina_as@nrcki.ru

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, теплообмен, натриевый теплоноситель, твэл, вторичное ядерное топливо.

Целью исследования являлось изучение особенностей теплообмена и оптимизации конструкции ТВС двух перспективных быстрых натриевых реакторов большой и малой мощности, которые разрабатываются в целях использования в системе замкнутого топливного цикла для наработки вторичного ядерного топлива.

Исследовались ТВС двух реакторов в ЯЭУ электрической мощностью 1000 МВт и 190 МВт.

Особенностью ТВС реактора большей мощности является довольно широкий относительный шаг топливной решетки (1,39), маленький диаметр твэлов (6,1 мм) и достаточно тонкий чехол ТВС (2 мм). С точки зрения особенностей режимных параметров теплоносителя нужно отметить, что в данном реакторе скорость теплоносителя в активной зоне ниже, а средний подогрев примерно в 1,5 раза выше (~ 220 К), чем в типичном БН (160 К). Рассматривались два вида дистанционирования твэлов: дистанционирующими решетками и комбинированное проволочно-решеточное дистанционирование.

Характерными особенностями конструкции реактора малой мощности является плотная решетка твэлов (относительный шаг $s/d = 1,16$) при увеличенной по сравнению с БН величине диаметра твэлов (в данной конструкции ТВС диаметр твэлов составлял 8,1 мм); толщина чехла ТВС составляла 2 мм. Дистанционирование твэлов осуществляется с помощью 12 решеток, размещённых по высоте ТВС с шагом 200 мм.

Для ТВС реактора большой мощности проводилась оптимизация по выравниванию температурных неравномерностей оболочки периферийных и угловых ТВС по азимуту. Для оптимизации было предложено дросселирование межкассетного зазора и увеличение проходного сечения угловой ячейки за счет проточки канавки в углу чехла. Было получено, что наименьшие азимутальные разверки температур оболочек периферийных и угловых твэлов в ТВС достигались при сопротивлении на входе межкассетного зазора, превышающем 10000, и проходном сечении угловой ячейки, равном 0,0712 м². Такое увеличение проходного сечения угловой ячейки позволило уменьшить неравномерность температур оболочек угловых твэлов с 70 до 5 °С.

Входное сопротивление межкассетного зазора, существенно влияет на расход теплоносителя в межкассетном пространстве, и, следовательно, на утечку тепла из ТВС в межкассетный зазор. Расчеты показали, что при сопротивлении равном 10, азимутальная неравномерность температур периферийных твэлов достигает 20 °С. При повышении этого сопротивления до 10000, неравномерность температур снижается до 6 °С.

Для реактора меньшей мощности расчеты проводились для трех типов ТВС: без чехла, с чехлом, отстоящим на 1 мм от периферийного ряда твэлов и с чехлом, отстоящим на 0,5 мм от периферийного ряда твэлов. Были получены распределения температур теплоносителя и оболочек твэлов в центральной ТВС с достаточно равномерным

распределением энерговыделения по твэлам в кассете и для периферийной ТВС на краю активной зоны, где энерговыделение по кассете распределено неравномерно, а также азимутальные разверки температуры оболочек углового, периферийного и центральных твэлов.

Расчеты показали, что в случае бесчехловой ТВС перепад температур по азимуту для периферийных твэлов достигает 200 °С. При наличии чехла и расстоянии между чехлом и периферийными твэлами 1 мм перепад температур по азимуту для периферийных твэлов снижается до 121 °С. При уменьшении расстояния между чехлом и твэлами до 0,5 мм максимальный перепад температур по азимуту составил 100 °С.

Для данного типа ТВС требуется дальнейшая оптимизация за счет замены решеточного дистанционирования на проволочные навивки и выравнивания поля температур за счет перемешивания теплоносителя. Наряду с этим, возможно, потребуется произвести незначительное увеличение шага твэльной решетки (от 1,16 до 1,19).

Моделирование теплогидравлических процессов в сложных каналах судовых ЯЭУ

Митрофанова О. В., Байрамуков А. Ш., Старовойтов Н. А., Федоринов А. В.

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

Ключевые слова: судовая ядерная энергетическая установка, система компенсации давления, парогенератор, кризис течения закрученного потока, вибропрочность, динамическая устойчивость, термоциклирование.

Модернизация и обновление российского атомного ледокольного флота имеет важное значение как для обеспечения внутрirosсийских грузоперевозок в районах Крайнего Севера, так и для развития экспорта отечественной продукции из северных регионов страны. Новые атомные ледоколы планируется оборудовать судовыми ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) четвертого поколения. Конструкция транспортных ЯЭУ существенно претерпевала изменения два раза: первый — при переходе от петлевой компоновки к блочной, второй — при нынешнем переходе от блочной компоновки к интегральной. В судовых ЯЭУ четвертого поколения удалось уменьшить массогабаритные характеристики и увеличить мощность. Повышение энергонапряженности основного оборудования не создало препятствий для увеличения планируемого ресурса работы оборудования до срока службы судна. Каждое новое поколение судовых ЯЭУ учитывает опыт эксплуатации предыдущих.

Судовые ядерные энергетические установки представляют собой сложную систему с многочисленными взаимосвязями между нейтронно-физическими и теплофизическими параметрами работы ядерного реактора, а также ресурсом и надежностью работы парогенераторов и другого теплоэнергетического оборудования. В настоящей работе были проведены исследования по выявлению особенностей гидродинамики и теплообмена в трубных системах судовой ЯЭУ с целью выработки рекомендаций по увеличению эффективности и повышению надежности основного и вспомогательного оборудования.

Известно, что наибольшее число циклических нагрузений в составе первого контура испытывают трубопроводы газовой системы компенсации давления, соединяющие баки компенсатора давления с ядерным реактором. Более того, эти трубопроводы являются самыми тонкостенными элементами в составе первого контура судовой ЯЭУ. Их отказ с разгерметизацией считается тяжелой аварией, так как приводит к нарушению герметичности первого контура.

С целью выявления особенностей гидродинамики в трубопроводной системе компенсатора давления были выбраны наиболее опасные и нагруженные участки тракта движения теплоносителя и проведены численные теплогидравлические расчеты. На основе анализа различных участков типовой геометрии элементов были определены поля скорости, давления, завихренности и спиральности, которые стали основой для определения надежности трубопроводов по условиям вибропрочности.

В результате проведения численных расчетов гидродинамики теплоносителя первого контура в элементах системы компенсации давления с переменным проходным сечением и трехмерной криволинейной геометрией был обнаружен эффект генерации закрутки потока в масштабе всего поперечного сечения каналов. Вариантные расчеты показали, что данное явление может приводить к ограничению расхода теплоносителя,

то есть «запиранию» потока. В частности, при расчетном моделировании закрученного течения в сложном криволинейном канале после прохождения сужающей вставки, а затем диффузорного расширения, была получена картина трехмерной вихревой структуры, возникающей в области рециркуляционного (возвратного) течения. Такая структура представляет собой препятствующую движению жидкости вихревую «пробку».

Проведенный теоретический анализ, основанный на открытии «закономерности расхода жидкости в закрученном потоке» (Новиков И.И., Скобелкин В.И., Абрамович Г.Н., Клячко Л.А. Открытие № 389. Гос. реестр открытий 18.10.1990 г.) и постановке задачи математического моделирования для замкнутых циркуляционных трактов, описанной в монографии Митрофановой О.В. («Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерных энергетических установок» М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.), позволил идентифицировать обнаруженное явление как кризис течения закрученного потока.

Во второй части работы рассматривались процессы, происходящие в парогенераторах судовых ЯЭУ с поверхностью теплообмена, представляющей собой змеевиковые каналы. Численно были смоделированы задачи течения рабочего тела в одиночных змеевиковых трубах на экономайзерном и пароперегревательном участках. Было выявлено, что на входном участке после прохождения криволинейного сегмента и последующего расширения в потоке возникает продольно-поперечная циркуляция, которая тоже объясняется наступлением кризиса течения закрученного потока.

В настоящей работе показано, что возникновение кризиса закрученного потока, который сопровождается процессами «запирания» потока, приводит к появлению динамической колебательной неустойчивости. Последняя в свою очередь инициирует изменение средней температуры теплоносителя первого контура, на что активно начинает реагировать система компенсации давления. Таким образом, было выявлено, что циклические нагрузки трубопроводов системы компенсации давления обуславливаются не только изменениями мощности судовой ЯЭУ, но и динамической неустойчивостью каналов парогенераторов.

Для оценки вибропрочности были проведены расчеты собственных частот колебаний давления теплоносителя в трубопроводах и частоты акустических стоячих волн в трубопроводах, заполненных жидкостью. Сопоставление рассчитанных собственных частот с частотами колебаний, которые возникают при генерации макровихревых структур и закрутке потока, показало, что условие отстройки частот выполняется не всегда. Учитывая, что характерной чертой транспортных ЯЭУ четвертого поколения является интегрированная компоновка оборудования, (где, в частности, система компенсации давления объединена с блоком гидроаккумуляторов), задача выполнения условий вибростойкости выдвигается на первый план.

Приведенные в данной работе примеры сложной взаимосвязи между устойчивостью и эффективностью работы одних элементов и надежностью других показывают, что любое изменение конструкции элементов судовых ЯЭУ должно сопровождаться комплексным анализом влияния внесенных изменений на работу установки в целом.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – грант РФФИ 19-08-00223-а и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.a03.21.0005).

Исследование влияния формоизменения элементов активной зоны на установление температурного режима в реакторе на быстрых нейтронах в процессе кампании

Гордеев С. С.¹, Сорокин А. П.²

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва
Gordeev@bk.ru

² Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск

Ключевые слова: быстрый реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, твэл, формоизменение, радиационное распухание, деформация изгиба, поле скорости, температурный режим, межканальный обмен, неравномерности, стохастические отклонения, расчетный код.

Программа МИФ предназначена для расчета установившихся полей скорости (расхода) и температуры в формоизмененных ТВС, охлаждаемых жидкометаллическим теплоносителем. Учитываются деформации твэльной решетки, возникшая в результате изгиба чехла ТВС, изгиба пучка твэлов, распухания и овализации твэлов, стохастических отклонений положения твэлов от номинального значения и другие факторы.

В процессе кампании ТВС подвергается комплексному воздействию различных факторов, среди которых одним из важнейших является неравномерность температурного поля в ТВС. Возникающее вследствие этого формоизменение твэлов и чехла ТВС носит сложный характер. Изменение геометрических параметров может происходить в большом диапазоне, что в свою очередь является одним из наиболее значительных факторов формирования температурного поля в ТВС. Изменение уровня температуры и неравномерности температуры пучка твэлов и чехла ТВС в значительной степени определяется характером их формоизменения.

В рамках данного исследования рассмотрены такие модели геометрии ТВС реактора БН-600, как раздвинутый пучок (касание периферийных твэлов провололочной лентой с чехлом ТВС), плотно сжатый или компактный пучок (касание внутренних твэлов с провололочной навивкой между собой) и статистическая модель (осредненная по 50 вариантам реализации геометрии), так и различные деформации, которые возникают в процессе кампании (деформация вытеснителей у какой-либо грани ТВС, увеличение размеров оболочек твэлов и шестигранного чехла, изгиб с касанием отдельных твэлов между собой и с чехлом ТВС).

Отмечено, что ранее полученные результаты формирования температурного поля, без учета межканального обмена, существенно отличаются от результатов, полученных в данном исследовании. Что свидетельствует о том, что существенным фактором формирования температурных полей в ТВС является межканальный обмен, эффективно выравнивающий локальные неравномерности температуры оболочки твэлов и азимутальные неравномерности температуры твэлов.

О влиянии содержания кислорода на теплообмен при поперечном обтекании парогенерирующих труб в режимах нормального теплообмена и с замораживанием свинца

Грабежная В. А., Михеев А. С., Крюков А. Е.

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, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, пучок теплообменных труб, поперечное обтекание, свинец, вода, эксперимент, теплопередача, коэффициент теплообмена, базовый кислородный режим, свинец на линии насыщения по кислороду, замораживание свинца.

Разрабатываемый в АО «НИКИЭТ» проект реактора со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300 предполагает использование парогенератора, представленного в виде спирально навитых труб, обогреваемых свинцовым теплоносителем. Данная конструкция обладает рядом преимуществ, к которым относится: развитая поверхность теплообмена со стороны второго контура, а также низкое влияние термических расширений на работу конструкции. В обоснование проектных характеристик парогенератора в 2011—2017 гг. в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» были проведены теплогидравлические испытания различных моделей парогенератора со свинцовым обогревом. Программа испытаний модели парогенератора была направлена на изучение теплообмена и теплогидравлической устойчивости парогенерирующих труб. Во всем диапазоне изменения режимных параметров не было выявлено пульсационных режимов с опрокидыванием циркуляции во втором контуре. Результаты экспериментов дали обширную информацию о теплообмене со стороны воды в различных зонах парогенерирующего канала.

Однако для верификации расчетных кодов необходимы экспериментальные данные по теплообмену свинцового теплоносителя в пучках труб. Ввиду небольшого угла закрутки парогенерирующих труб в натурном парогенераторе можно говорить, что имеет место теплообмен, близкий к теплообмену при поперечном течении теплоносителя. В АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» была создана модель с поперечным обтеканием парогенерирующих трубок теплоносителем, которая представляет собой пучок, состоящий из шести рядов трубок, пять из которых были теплопередающими. Длина теплопередающих трубок 250 мм. В качестве греющего теплоносителя первоначально был выбран эвтектический сплав свинца с висмутом (44,5 Pb – 55,5 Bi масс. %), что позволило проводить эксперименты при однофазном течении воды давлением 1,4 МПа. Поскольку полученные экспериментальные данные охватывали область переходного (Re от $6 \cdot 10^3$ до $18 \cdot 10^3$), а не развитого турбулентного течения и в качестве теплоносителя использовался не свинец, а сплав свинца с висмутом, было принято решение о проведении экспериментов на модели со свинцовым теплоносителем.

С целью увеличения массовой скорости по воде в трех рядах были заглушены теплообменные трубки, для изучения теплообмена остались третий и четвертый ряды трубок. В потоке свинца под первым, вторым, третьим и четвертым рядами теплопередающих трубок, перпендикулярно этим трубкам, установлены термодатчики (капилляры) диаметром $4,2 \times 1$ мм, в которых располагаются кабельные термодатчики диаметром 1 мм. Перемещение этих термодатчиков по капиллярной трубке позволяет измерить температуру свинца, как в затесненном, так и в не затесненном сечениях. В лобо-

вой и кормовой зоне, а также на боковых поверхностях центральных труб пучка были установлены (зачеканены в стенку трубы) кабельные термодпары для определения раз-верки температуры.

Опыты с теплообменом проводились при разных скоростях свинца в диапазоне изменения чисел Рейнольдса от $5 \cdot 10^3$ до $6 \cdot 10^4$. Число Рейнольдса рассчитывалось по скорости набегающего потока, а в качестве гидравлического диаметра брался наружный диаметр трубки. Начальная температура свинца изменялась от 470 до 380 °С для свинца в базовом кислородном режиме (концентрация кислорода в свинце менее $2 \cdot 10^{-6}$ масс. %), и от 535 до 390 °С для свинца на линии насыщения по кислороду (при 535 °С концентрация кислорода не менее $9 \cdot 10^{-4}$ масс. %, а при 390 °С — не менее $3,5 \cdot 10^{-5}$ масс. %).

Во всех режимах с базовой концентрацией кислорода в свинце на поверхности теплообменных трубок имели место низкочастотные колебания температуры с частотой менее 0,25 Гц. Были определены усредненные по объему коэффициенты теплоотдачи для свинца в базовом кислородном режиме, которые с точностью $\pm 15\%$ совпадали с расчетами по формуле:

$$Nu = 5,5 + 0,025 \cdot Pe^{0,8}.$$

Для свинца на линии насыщения по кислороду особенностей в распределении температуры трубок по сравнению с базовым кислородным режимом обнаружено не было. С увеличением продолжительности работы стенда увеличивалась концентрация примесей кислорода, как в потоке свинца, так и на теплообменной поверхности. При термодинамической активности кислорода в свинце ≈ 1 , коэффициент теплопередачи практически не зависел от скорости теплоносителя. Коэффициент теплообмена со стороны свинца был в 1,5–4 раза меньше, чем для свинца базового кислородного режима. Установлено снижение коэффициента теплообмена при испытаниях со свинцом на линии насыщения до $Nu = 2$ в диапазоне чисел Рейнольдса от $5,5 \cdot 10^3$ до $3,3 \cdot 10^4$. Независимость числа Нуссельта от числа Пекле была получена также в работах, проводимых в Нижегородском государственном техническом университете.

Вторая часть исследований касалась замораживания свинца. Опыты с замораживанием свинца базового кислородного режима проводились в условиях постепенного снижения температуры питательной воды с 318 до 183 °С. По мере понижения температуры питательной воды на поверхности теплообменных труб наблюдалось увеличение слоя отвердевшего свинца (гарнисажа), что выражалось в существенном уменьшении амплитуды и частоты пульсаций температуры стенки. При расходе свинца 32 кг/с с минимальной температурой питательной воды толщина затвердевшего слоя свинца стала столь значительной, что термодпары практически перестали регистрировать пульсации температуры в движущемся свинце. Несмотря на то, что температура питательной воды составляла всего 180 °С, а температура свинца на входе не превышала 340 °С, полного перекрытия межтрубного пространства отвердевшим свинцом, который образовывался на стенках трубок, не было зафиксировано. Понижение температуры питательной воды до 150 °С при расходе свинца около 55 кг/с также не привело к полному замораживанию свинца в модели.

В опытах со свинцом на линии насыщения по кислороду температура свинца на входе поддерживалась на уровне 420 °С, неизменным оставался и расход питательной воды — 0,1 кг/с. Эксперименты проводились с постепенным снижением температуры питательной воды в диапазоне от 327 до 260 °С. При температуре воды на входе в модель равной 260 °С циркуляция свинцового теплоносителя не прекращалась.

Конструктивная схема и контур циркуляции реакторного блока на быстрых нейтронах с горизонтальным парогенератором БРС

Безносов А. В., Боков П. А., Бокова Т. А.

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

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, тяжёлый жидкометаллический теплоноситель, БРС-ГПГ, парогенератор, большая течь ПГ, естественная циркуляция, активная зона, естественная безопасность, технология теплоносителя, плавучая атомная станция, реактор малой и средней мощности.

В докладе представлены результаты анализа, а также научно-технические решения, соответствующие перспективному направлению развития новых реакторных установок малой и средней мощности с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ).

Проведен анализ научно-технической информации по опыту создания и эксплуатации реакторных установок и контуров с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями. На основании обширного опыта эксплуатации теплофизических стендов и установок с ТЖМТ и большого массива экспериментальных данных, полученных на этих установках, выполненных в Нижегородском государственном техническом университете (НГТУ) в обоснование прорабатываемой в НГТУ РУ малой и средней мощности Быстрый реактор свинцовый с горизонтальными парогенераторами (БРС-ГПГ), предлагается обоснование данной реакторной установки.

В докладе представлены научно-технические обоснования основных элементов первого контура предлагаемой РУ, выбор и обоснование теплоносителя, а также компоновочные решения схемы циркуляции теплоносителя. При предложенной компоновке реакторного контура достигается максимально возможная естественная циркуляция, что существенно повышает безопасность РУ. Результаты исследований (моделирования) одной из наиболее потенциально опасных аварий в РУ с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) — «большая течь парогенератора» — позволяет качественно уменьшить последствия аварии при применении конструкции горизонтального парогенератора, в котором трубную систему располагают с минимальным заглублением труб под уровень ТЖМТ, что позволяет исключить поступление воды в активную зону реактора, переопрессовку реакторного контура и др. Представлены системы, обеспечивающие технологию теплоносителя, система расхолаживания реактора и обеспечения стояночных режимов РУ. Данные системы имеют концептуальный характер и на данный момент исследуются их характеристики и отрабатываются на стендах НГТУ.

СЕКЦИЯ 3.

Гидродинамика и теплообмен в водоохлаждаемых реакторах

Экспериментальное моделирование процессов перемешивания петлевых потоков теплоносителя в опускной камере ядерного реактора

Дмитриев С. М., Хробостов А. Е., Добров А. А., Доронков Д. В., Пронин А. Н.,
Рязанов А. В., Солнцев Д. Н.

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

Ключевые слова: ядерный реактор, теплообменное оборудование, парциальные режимы работы, активная зона, тепломассообмен, гидродинамика, численное моделирование.

Проектирование перспективных атомных станций малой мощности с высокими характеристиками манёвренности, надёжности и живучести диктует необходимость разработки перспективных высокоэнергонапряжённых ядерных установок. Это влечёт за собой потребность в проведении работ по обоснованию безопасности как новых конструктивных элементов ядерного реактора, так и режимов работы самой энергетической установки. Неотъемлемой частью данного процесса являются работы по обоснованию теплотехнической надёжности активной зоны. Обоснование теплотехнической надёжности невозможно без точных входных данных полей скорости и температуры. Всё это определяет высокую степень актуальности исследований процессов перемешивания петлевых потоков теплоносителя в опускной камере ядерного реактора.

Одним из последствий работы энергоблока с частично отключённым теплообменным оборудованием является возникновение неизотермических потоков теплоносителя с различными физическими свойствами и их перемешивание в напорной камере реактора. Работ по изучению перемешивания турбулентных потоков теплоносителя в геометрии, характерной для современных ядерных энергетических установок, не много. Проведённые работы не дают ответа на вопросы масштабируемости результатов перемешивания потоков теплоносителя в модели, принципиально повторяющей конструкцию напорной камеры перспективной реакторной установки АСММ, с учётом масштабируемости процесса по критерию Рейнольдса.

Для анализа полей температуры теплоносителя и концентрации жидкого поглотителя в камерах реакторных установок в отдельных режимах работы необходимо изучить процессы, протекающие в них. Единственный способ точно воспроизвести эти процессы — использовать коды вычислительной гидродинамики (CFD). Однако, несмотря на то, что в России активно разрабатываются программные продукты вычислительной гидродинамики, на сегодняшний день в отечественной практике отсутствуют CFD-коды, которые прошли процедуры верификации и валидации для решения такого

класса задач, как турбулентное перемешивание потоков в сложной геометрии, характерной для водяных ядерных реакторов.

Данная работа посвящена экспериментальным исследованиям гидродинамики потока теплоносителя во внутрикорпусном напорном тракте водяного ядерного реактора.

В проведённом комплексном экспериментальном исследовании изучению было подвержено явление перемешивания петлевых потоков теплоносителя внутри модели опускной камеры ядерного реактора. Экспериментальные работы проводились на двух экспериментальных стендах НГТУ им. Р.Е. Алексеева (высоконапорный аэродинамический стенд ФТ-50 и гидродинамический стенд исследования смешения потоков ФТ-40), исследуемая масштабная модель ядерного реактора обладала конструктивными элементами, характерными для петлевых ядерных установок (опускной кольцевой тракт, нижняя напорная камера). Экспериментальные исследования были проведены в диапазоне чисел Рейнольдса (Re) от 20 000 до 50 000. При помощи пневмометрического зонда в экспериментах исследовано поле осевых скоростей на входе в имитатор активной зоны модели реактора. Для экспериментального изучения температурного поля в эксперименте использовался метод диффузии примесей. Моделирование потока с отклоняющимися характеристиками осуществляется введением в одну из петель контрастного трассера. Концентрация на входе в имитатор активной зоны даёт возможность оценивать степень перемешивания потоков. В качестве контрастной примеси применялся пропан (C_3H_8) в экспериментах с воздушным потоком, а также сульфат натрия (Na_2SO_4) в экспериментах в водяной среде.

Проведено исследование процесса межпетлевого перемешивания потоков теплоносителя в напорной камере модели реактора в двух областях: опускной кольцевой канал и нижняя напорная камера. Впервые проведены исследования процессов турбулентного перемешивания потоков теплоносителя в модели, принципиально повторяющей конструкцию напорной камеры перспективной реакторной установки АСММ, с учётом масштабируемости процесса по критерию Рейнольдса. Также проведён комплекс исследований процессов турбулентного перемешивания потоков теплоносителя в напорной камере реактора с использованием различных рабочих сред (воздух, вода), что предоставило возможность изменить на порядок физические величины, входящие в критерий Рейнольдса (скорость, кинематическая вязкость) при фиксированном числовом значении этого критерия. Анализ экспериментальных данных показал хорошее согласование результатов экспериментальных исследований воздушного потока с исследованием процессов перемешивания при использовании водяного теплоносителя. Показано, что:

– увеличение числа Re от 20 000 до 50 000 не вносит существенного влияния на характер процесса турбулентного перемешивания потоков;

– влияние осецентриального вихря преобладает над тороидальным и поперечным вихрём, в результате чего в нижней напорной камере нет ярко выраженного процесса перемешивания потоков, поэтому и не происходит сильного размытия пятна контрастного трассера относительно последнего сечения опускной камеры;

– в основном перемешивание межпетлевых потоков было обусловлено конвективным переносом в опускной камере модели реактора, в результате чего обнаружена малая величина турбулентного переноса в напорной камере. Максимальные относительные концентрации трассера в напорной камере составили величину $\sim 0,45$ от концентрации в подающей ветке. Минимальные относительные концентрации вводимой примеси в напорной камере модели реактора находились в диапазоне 0,05—0,09.

Исследование влияния перемешивающих решеток на расхолаживание ТВС-2М в условиях повторного залива

Сергеев В. В., Лощинин В. М., Гальченко Э. Ф.

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

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, твэлы, перемешивающие решетки, повторный залив, расхолаживание.

Для верификации и уточнения теплогидравлических кодов, используемых при обосновании безопасности ВВЭР, выполнено экспериментальное исследование расхолаживания в условиях нижнего и верхнего повторного залива полномасштабной по высоте 37-стержневой электрообогреваемой модели ТВС-2М при отсутствии и наличии перемешивающих решеток-интенсификаторов типа «Прогонка» и «Вихрь».

Опыты проведены в следующем диапазоне параметров:

- давление 0,15–0,40 МПа;
- скорость залива 0,04–0,10 м/с;
- температура имитаторов перед заливом 500–700 °С;
- максимальный линейный тепловой поток 0,29–2,0 кВт/м;
- температура воды на входе сборки 25–110 °С;
- максимальная температура поверхности имитаторов 900 °С.

Показано, что при нижнем заливе максимальные значения температуры стержней и время расхолаживания сборки, оснащенной только дистанционирующими решетками, растут с ростом стартовой температуры имитаторов перед заливом. При этом увеличение мощности, подводимой к пучку стержней, приводит к росту и максимальной температуры стержней и времени расхолаживания сборки, в то время как увеличение скорости залива дает обратный эффект.

Наличие в модели ТВС-2М перемешивающих решеток при нижнем заливе приводит к незначительному снижению максимальной температуры стержней и к возрастанию времени расхолаживания сборки.

При верхнем заливе получено что, для обеспечения расхолаживания модели стартовые значения температура имитаторов и подводимой мощности должны быть значительно ниже, чем при нижнем заливе. Влияние скорости залива аналогично тому, что наблюдается при нижнем заливе: с ростом скорости залива максимальная температура стержней и время расхолаживания сборки уменьшаются.

Выполненные эксперименты показали отсутствие существенного влияния перемешивающих решеток на эффективность расхолаживания ТВС-2М в условиях повторного залива.

Экспериментальные исследования критических тепловых потоков в активной зоне реакторной установки РИТМ-200 АСММ

Куприянов А. В., Самойлов О. Б., Шипов Д. Л., Осин А. Б., Сорокин В. Д.

Акционерное общество «Опытно-конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова (АО «ОКБМ Африкантов»), Нижний Новгород,
physnet@okbm.nnov.ru

Ключевые слова: кассетная активная зона, электрообогреваемые модели ТВС, кризис теплоотдачи, критические тепловые потоки, закризисный теплообмен, закризисный резерв по мощности.

РИТМ-200 — реакторная установка (РУ), сочетающая в себе успешные конструкторские решения и высокие технико-экономические показатели. В настоящее РУ рассматривается для проектов атомных станций малой мощности (АСММ) наземного исполнения. Главным конструктором РУ РИТМ-200 является АО «ОКБМ Африкантов».

Цель работы заключалась в отработке методических вопросов теплофизических исследований кассетной активной зоны РИТМ-200 высотой 1650 мм для атомных станций малой мощности, основываясь на результатах по критическим тепловым потокам, полученными на экспериментальных моделях при высоте зон энерговыделения ТВС 1200 и 1500 мм.

Для обоснования теплотехнических характеристик модификаций ТВС кассетных активных зон в АО «ОКБМ Африкантов» была выполнена серия экспериментальных исследований. Эксперименты проводились на электрообогреваемых моделях ТВС в условиях равномерной радиальной и аксиальной эпюр энерговыделения.

Основные характеристики стенда:

- электрическая мощность моделей – до 3000 кВт;
- расход теплоносителя через модель – до 30 м³/ч;
- давление теплоносителя – до 18 МПа;
- температура на входе в модель – до 310 °С.

Модели ТВС представляли собой пучки, состоящие из 61 электрообогреваемого имитатора твэла, а также из 55 электрообогреваемых имитаторов твэлов с 6 необогреваемыми имитаторами стержней выгорающего поглотителя на периферии сборки. Вследствие особенностей геометрии штатного пучка, модели имели существенную неравноценность ячеек, которые влияли на кризис теплоотдачи.

Представительность экспериментальных исследований обеспечивалась:

- использованием модельных сборок с натурными геометрическими характеристиками элементов;
- использованием фрагментов натуральных дистанционирующих решеток;
- проведением исследований при натуральных параметрах теплоносителя;
- использованием аттестованной системы измерения;
- применением апробированной методики измерений.

Сравнения критических мощностей однородных моделей с длинами тепловыделений 1200 и 1500 мм показали, что увеличение длины тепловыделения приводит к увеличению критической мощности на ~(6–8) %. По результатам исследования закризисного температурного состояния имитаторов твэлов было выявлено, что при режимных параметрах, близких к номинальным, величина закризисного резерва по мощности составляет ~(2–5) %.

По результатам исследований получено 182 экспериментальной точки момента наступления кризиса теплоотдачи, которые будут использованы при обосновании теплотехнической надежности активной зоны проекта РУ РИТМ-200 для АСММ.

Экспериментальное исследование особенностей растворимости борной кислоты в паре при кипении теплоносителя реактора ВВЭР в случае аварии

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

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

Ключевые слова: борная кислота, растворимость, пар, накопление, ВВЭР, аварийный режим.

В случае возможной аварии на атомной электростанции с ВВЭР, связанной с разрывом главного циркуляционного трубопровода, неизбежно произойдет утечка теплоносителя из активной зоны, которая вызовет снижение давления в первом контуре. Такие обстоятельства представляют опасность для целостности оболочек топливных стержней, так как теплоотвод уменьшится и, следовательно, имеется опасность их расплавления и выхода радиоактивных продуктов деления в окружающую среду.

Для компенсации потери теплоносителя из первого контура в современных проектах АЭС с реакторной установкой ВВЭР предусмотрена система пассивного залива активной зоны из гидроемкостей первой, второй и третьей ступеней. Она состоит из сосудов разного объема, заполненных раствором борной кислоты с концентрацией 16 г/кгН₂О. Такая система срабатывает в случае снижения давления в активной зоне ниже определенного уровня. Совместного объема теплоносителя системы пассивного залива активной зоны достаточно для аварийного расхолаживания на протяжении трех суток после начала аварии.

Однако, принимая во внимание парообразование за счет кипения теплоносителя в реакторе, следует ожидать увеличения концентрации борной кислоты в нижней части активной зоны. При этом из-за поступления дополнительного объема борной кислоты в активную зону возможно превышение ее предела растворимости (~400 г/кгН₂О) после 24 ч аварии, что может привести к ухудшению теплоотвода.

Вынос борной кислоты из реактора с паром или вследствие капельного уноса может существенно снизить риск ее кристаллизации. Следовательно, исследование процессов уноса борной кислоты из активной зоны имеет важное прикладное значение для расчетов аварийных режимов на АЭС с ВВЭР нового поколения, оснащенными пассивными системами безопасности.

В литературе имеется ряд работ по исследованию растворимости борной кислоты в насыщенном водяном паре, однако, проведенный анализ показал, что существующие данные охватывают ограниченный диапазон параметров (температура и концентрация кислоты), не характерный для аварийной ситуации на российских АЭС с ВВЭР. В преобладающем большинстве публикаций, результаты опытов справедливы для низких концентраций борной кислоты в водных растворах. В связи с этим возникла необходимость проведения дополнительных опытов в расширенном диапазоне концентраций, для использования полученных данных в расчетных оценках.

Для исследования процессов растворимости борной кислоты в паре в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» создана экспериментальная установка. В её состав входят: бак подготовки раствора объемом 14 л; рабочий участок, представляющий собой двухсоставную цилиндрическую трубу из нержавеющей стали с внутренним диаметром 0,027 м и высотой 2,8 м; устройство сепарации пара; конденсатор и вспомогательные системы: под-

держания давления и температуры, подачи раствора, управления мощностью конденсатора. Высотная отметка отбора пара в рабочем участке равна расстоянию от зеркала испарения в корпусе реактора до нижней образующей холодной ветки главного циркуляционного трубопровода. Основные элементы установки связаны между собой обогреваемыми технологическими линиями, оснащенными запорно-отсечной арматурой. Были проведены эксперименты при давлении 0,1—0,3 МПа и начальной концентрации борной кислоты 16 г/кгН₂O.

Результаты экспериментов при давлении 0,1 МПа подтверждают имеющиеся в литературе данные о том, что темп роста концентрации борной кислоты в водяном паре описывается линейным законом. Диапазон применения известной зависимости, позволяющей рассчитывать растворимость Н₃ВО₃ в паре, расширен до концентрации 440 г/кг, близкой к пределу растворимости борной кислоты в воде при давлении 0,3 МПа.

В докладе представлены данные, полученные в результате проведенных экспериментов. Они могут быть использованы для расчетного моделирования аварийных процессов в реакторной установке ВВЭР во время работы комплекса пассивных систем безопасности.

Обзор современных концепт-проектов энергетических реакторов с водяным теплоносителем сверхкритических параметров

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

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

Ключевые слова: реактор, теплоноситель, вода, сверхкритическое давление, активная зона, теплообменник, парогенератор, одно-, двух-, трехходовая схема активной зоны.

Одним из перспективных направлений развития атомной энергетики, представленных в рамках Международного форума «Поколение-4» (МФП-4) — Generation IV International Forum (GIF), является освоение сверхкритических параметров водяного теплоносителя. Переход к АЭС с реакторами с теплоносителем сверхкритического давления (Super Critical Watercooled Reactors (SCWR)) может привести к следующим значительным технико-экономическим преимуществам по сравнению с существующими атомными станциями:

- увеличение КПД одноконтурной установки до ~45%;
- сокращение количества теплоносителя в активной зоне примерно в 7-8 раз по сравнению с существующими реакторами с водой под давлением такой же мощности, и, соответственно, количества жидких радиоактивных отходов;
- уменьшение габаритов агрегатов (насосов, турбин, трубопроводов), размеров защитной оболочки;
- простая тепловая схема (пар из реактора направляется непосредственно на турбину), исключение большого количества дорогостоящего оборудования (парогенераторы, насосы, трубопроводы, арматура второго контура) приводит к снижению металлоемкости на ~60%;
- высокие параметры пара (давление ~25 МПа и температура до 550 °С);
- отсутствие кризиса теплообмена (нет второй фазы теплоносителя в реакторе), то есть при нормальных условиях можно осуществить непрерывные режимы теплообмена;
- создание водоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов с коэффициентом воспроизводства топлива около 1.

Проведенный анализ разрабатываемых проектов реакторов с сверхкритическими параметрами теплоносителя показал, что в большинстве зарубежных стран проектируются реакторы с тепловым спектром нейтронов для решения ближайшей задачи — замены легководных реакторов.

Преобладающее число концептуальных проектов SCWR имеют один циркуляционный контур. Это связано с тем, что при одноконтурной схеме АЭС становится возможным применение освоенного серийного оборудования машинного зала, широко используемого в настоящее время в тепловой энергетике — турбины и подогреватели. Значительно уменьшается объем защитной оболочки и в целом сокращаются капитальные затраты на создание энергоблока на ~20—30%, по сравнению с действующими АЭС.

В докладе представлены современные концептуальные проекты энергетических реакторов с водяным теплоносителем сверхкритических параметров, разрабатываемые как в Российской Федерации, так и за рубежом.

Постановка задачи в обоснование возбуждения колебаний твэлов при наличии винтообразного вихря

Шипилов В. В., Авдеев Е. Ф.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Обнинский институт атомной энергетики (ИАТЭ НИЯУ МИФИ), Обнинск
VVShipilov@bk.ru

Ключевые слова: винтообразный вихревой шнур, износ стержня, вектор угловой скорости, вектор инерционных волн, период и частота колебаний, амплитуда колебаний давления, поперечная мощность.

В монографии М.С. Фомичёва приведены результаты уникального эксперимента, моделирующего колебания твэла, при наличии в потоке винтообразного вихревого шнура, охватывающего стержень диаметром 3 мм. Стержень жестко закреплен в торцах прозрачной трубки диаметром 18 мм и длиной 2 м, по которой прокачивалась вода с высокими числами Рейнольдса (от $3,5 \cdot 10^4$ до 10^5 и более). Вход в трубку организован таким образом, чтобы возник винтообразный вихревой шнур. Приведены его фотографии, измерены пульсации давления и частота вибраций. Через 18 часов работы происходило разрушение дистанционирующих устройств (если таковые прикреплялись к стержню), истирание и разрыв стержня на периодических расстояниях или отрыв стержня в местах заделки.

Так как в монографии не дано теоретическое обоснование, в представленной работе мы делаем попытку, с одной стороны, найти поперечную мощность (произведение максимальной пульсации давления на поперечную скорость) по данным эксперимента, с другой — вычислить эту мощность по теоретической формуле, полученной при рассмотрении взаимодействия инерционных волн и вихревого шнура.

Приводится уравнение колебаний стержня, заимствованное из диссертации И.А. Микляева, учитывающее присоединённую массу (так как колебания в жидкости) и коэффициент демпфирования. В диссертации теоретически задаётся сила, изменяющаяся по гармоническому закону, и рассматриваются частные случаи закрепления стержня (жесткая и шарнирная заделки концов или консоль). Из решения уравнения находится поперечное отклонение стержня. В отличие от виртуальной силы в данной диссертации, мы делаем попытку теоретического установления этой силы, возникающей при взаимодействии вихревого шнура со стержнем. После установления поперечной мощности, обусловленной вихревым шнуром, это делается просто делением мощности на скорость и умножением полученной пульсации давления на площадь Миделя. Это невозможно сделать без представленной в работе теоретической формулы для поперечной мощности

$$P v = \rho \Omega A^2 \alpha^{-1} \sin \theta. \quad (1)$$

Здесь P — максимальная пульсация давления; v — поперечная скорость; Ω — суммарная угловая скорость (от вихревого шнура и общего вращательного движения); α — абсолютное значение вектора инерционных волн (направлен всегда по направлению основного течения); ρ — плотность жидкости; θ — угол между угловой скоростью и вектором $\vec{\alpha}$.

Первоначально по данным эксперимента, определённым приближенно, так как точные значения даны только для частоты колебаний и пульсации давления, были найдены по частоте волны $n = 30$ кол/с период колебаний $T = 0,033$ с, приближенно, попе-

речная скорость $v = 0,9$ м/с и угловая скорость $\Omega = 187$ об/с. По экспериментальным данным максимальной пульсации давления $P = 5395$ Па и поперечной скорости получена поперечная мощность $Pv = 4855$ Вт/м². Площадь Миделя принята по длине волны 0,8 м и диаметру стержня $\sigma = 2,4 \cdot 10^{-3}$ м² и поперечная сила, возбуждающая колебания.

Расчёт по теоретической формуле даёт значение поперечной мощности $Pv = 5049$ Вт/м², пульсации давления $P = 5610$ Па, поперечную силу $F = 13,4$ н = 1,37 кгс, то есть практически равную силе, найденной по экспериментальной пульсации давления.

Возможно, полученное совпадение случайное, однако в заключение следует заметить, что причины разбивания твэлами дистанционирующих решеток и разрушение твэлов, обнаруженные на реакторах ВВЭР-440 Кольской АЭС, искривления и гильотинный отрыв технологических каналов РБМК одной и той же природы, обусловлены возникновением вихревых структур. В связи с изложенным, опасение вызывает внедрение дистанционирующих решеток с дефлекторами, которые закручивают поток. Ресурсные их испытания проводились на воздухе, а как видно из приведенной формулы для поперечной мощности, в неё входит плотность.

Продолжение работы предполагает и решение уравнения колебаний при силе найденной природы, определение амплитуды колебаний стержня, возникающего максимального напряжения и сравнение его с допустимым напряжением на излом.

Разработка и автоматизация измерения и регулирования расхода в ячейках ТВЭЛ модельных ТВС

Авдеев Е. Ф., Смирнова В. О.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Обнинский институт атомной энергетики (ИАТЭ НИЯУ МИФИ), Обнинск
konstansta@yandex.ru

Ключевые слова: ячейка твэл, гидравлический диаметр, относительный шаг решетки твэл, стабилизированный участок канала, критерий подобия, коэффициент сопротивления трения, объемный расход, программируемый логический контроллер, автоматизированная система, управление расходами.

Содержание доклада носит практическую направленность обеспечения автоматизированного поддержания необходимых расходов на экспериментальных стендах с проливками (или продувками) модельных ТВС или ограниченного количества имитаторов твэл.

Как правило, такие эксперименты выполняются на увеличенных моделях, позволяющих с одной стороны проводить детальные замеры интересующих параметров, с применением первичных датчиков, с другой — увеличенные поперечные сечения ячеек твэл приближают числа Рейнольдса к значениям наружных ТВС. Условие одинаковости критериев подобия на модели и на натуре обосновывает право переноса результатов эксперимента на натуральные ТВС. Этим и объясняется необходимость установления таких расходов (порой даже с заменой среды) на модели, которые диктуются выполнением критериев подобия. В частности, расходы определяют такие критерии подобия, как числа Рейнольдса, Пекле и Фруда.

В докладе представлены структурные и функциональные схемы автоматизированного контроля и поддержания необходимого расхода, в котором в качестве регулирующего расход органа авторами принята управляемая программируемым логическим контроллером (ПЛК) электрозадвижка, и первичного датчика-преобразователя максимальной скорости в ячейке. Центральное место сохраняется за расчетным алгоритмом, который заложен в ПЛК. Для его получения авторами доклада в Ресурсном центре ИАТЭ НИЯУ МИФИ выполнена серия экспериментов на увеличенной модели ячейки твэл с плотной упаковкой.

Последняя характерна для разрабатываемых реакторов нового поколения ВВЭР со сверхкритическими параметрами.

У авторов не было иного пути получения выражения для расхода в ячейке твэл, как принять вид выражения для расхода, аналогичного выражению в круглой трубе (1) при турбулентном течении, обоснованному на кафедре теплофизики ИАТЭ и защищенному патентом РФ.

$$Q = \pi a^2 \left(U_{\max} - 2,885 \sqrt{\frac{\Delta p a}{\rho l}} \right), \quad (1)$$

где a — радиус трубы, U_{\max} — максимальная скорость в центре трубы, Δp — потери давления за счет трения на стабилизированном участке течения длиной l .

Из формулы (1) следует связь между средней и максимальной скоростями.

$$V_{\text{cp}} = \frac{U_{\max}}{1 + 1,443\sqrt{\lambda}}. \quad (2)$$

После обработки экспериментов на увеличенной модели ячейки твэл с плотной упаковкой (относительный шаг решетки твэл $x/d_r = 1,014$), авторами получена зависимость для расхода:

$$Q = \sigma_{\text{яч}} \left(U_{\text{max}} - 2,091 \sqrt{\frac{\Delta p a}{\rho l}} \right). \quad (3)$$

Из (3) получена связь средней и максимальной скорости в ячейке (4).

$$V_{\text{cp}} = \frac{U_{\text{max}}}{1 + 1,046\sqrt{\lambda}}. \quad (4)$$

Коэффициент сопротивления трения был найден в экспериментах и при помощи уравнения, полученном в ГНЦ РФ – ФЭИ академиком Субботиным В.И.:

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_{i \text{ бл}}} = \left[0,58 + 0,42 \exp(1 - 0,021K_i^3) \right] \left[1 + 0,1(\beta_i + 1)^{4/3} \right], \quad (5)$$

где β_i — параметр кривизны поверхности; K_i — параметр неравномерности ячейки; $\lambda_{i \text{ бл}} = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}$ — коэффициент сопротивления трения для круглой трубы.

Формулы (4), (5) закладываются в ПЛК, и методом последовательных приближений (итерациями) находится текущий расход (скорость).

В функциональной схеме описываются взаимодействия между элементами системы управления расходами (первичный датчик, ПЛК, человеко-машинный интерфейс и исполнительный механизм). В тексте доклада также описывается работа алгоритма, которая сводится к следующему: при подаче расхода первичный датчик (термоанемометр) считывает попеременно показания скорости и температуры потока, далее по вышеизложенным формулам происходит расчет расхода и сравнивается с расходом (уставкой), задаваемом при помощи человеко-машинного интерфейса. Затем по значению сигнала происходит движение исполнительного механизма, увеличивающее или уменьшающее значение расхода в установке.

Теплогидравлический расчет экономайзера для парогенератора перспективной РУ с ВВЭР

Лякишев С. Л., Короткова О. В., Блохина А. Н., Шарый Н. В.

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

Ключевые слова: экономайзер, испаритель, парогенератор, ВВЭР, теплогидравлический расчет, циркуляция, котловая вода, мощность парогенератора.

Водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР) является основным типом энергетических реакторов в России, а строительство АЭС с реакторными установками (РУ) типа ВВЭР является приоритетной задачей Госкорпорации «РОСАТОМ». К перспективным РУ с ВВЭР предъявляют следующие требования:

- снижение удельных капитальных вложений;
- снижение продолжительности сооружения;
- увеличение срока службы;
- повышение безопасности.

Для обеспечения требования по снижению удельных капитальных вложений требуется снизить стоимость и металлоемкость РУ. Одним из перспективных направлений по снижению металлоемкости РУ является переход с четырехпетлевой схемы циркуляции теплоносителя в РУ на двухпетлевую с повышением единичной мощности парогенератора (ПГ). В перспективных горизонтальных ПГ предлагается использовать новую схему подвода теплоносителя первого контура к ПГ, при которой горячий пучок теплообменных труб по всей длине ПГ будет расположен над холодным пучком. Такая схема позволяет снизить неравномерность тепловых потоков от теплообменных труб к котловой воде и выровнять паропроизводительность по длине ПГ. При равномерной по длине ПГ паропроизводительности можно отказаться от погруженного дырчатого листа и заполнить освободившееся пространство теплообменными трубами (ТОТ), тем самым увеличив мощность ПГ. Дополнительного увеличения мощности ПГ можно добиться изменением тепловой схемы ПГ путем внедрения в нее экономайзерного участка. Вертикальные ПГ западного дизайна для PWR часто содержат экономайзерный участок (экономайзер). Наиболее целесообразно размещать экономайзерный участок в зоне теплообменных труб у «холодного» коллектора. ТОТ в этой зоне работают при минимальных тепловых потоках, вызванных малым температурным напором между котловой водой и циркулирующей в первом контуре водой. Для повышения теплового потока с теплообменных труб у «холодного» коллектора организуется экономайзерный участок, в котором на теплообменные трубы подается питательная вода с температурой меньше котловой воды, температурный напор возрастает, а с ним возрастают тепловые потоки и мощность ПГ.

Выполнены два теплогидравлических расчета перспективного ПГ, состоящего только из испарительного участка и ПГ с экономайзерным участком. Оба варианта ПГ имеют выгороженный пучок ТОТ с организованным контуром циркуляции котловой воды. В результате проведенных расчетов было показано, что использование экономайзера в перспективном ПГ позволяет увеличить его тепловую мощность на 6,3% за счет более эффективного использования ТОТ с низкими тепловыми потоками у «холодного» коллектора. Кроме повышения мощности, экономайзерный участок позволяет освободить пространство над пучком ТОТ и перенести систему подачи питательной воды за крайину ПГ, тем самым улучшить сепарацию пара и удобство обслуживания ПГ.

Определение комплекса теплофизических свойств водных растворов борной кислоты при параметрах, характерных для аварийного режима ВВЭР

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

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Обнинск, ashlepin@ippe.ru

Ключевые слова: ВВЭР, пассивные системы безопасности, активная зона, борная кислота, кристаллизация, вязкость, плотность, степень кислотности.

На текущий момент наиболее современным российским проектом реакторной установки (РУ) с водо-водяным реактором является ВВЭР-ТОИ. Пассивные системы безопасности этой РУ обеспечивают длительное (до 72 часов) охлаждение активной зоны (а.з.) реактора даже в случае аварийной ситуации с разрывом главного циркуляционного трубопровода. Это обеспечивается за счет подачи в а.з. раствора борной кислоты с концентрацией 16 г/кг из гидроёмкостей первой, второй (ГЕ-2) и третьей (ГЕ-3) ступеней, а также поступления конденсата из парогенераторов, работающих в конденсационном режиме. Учитывая длительность процесса, кипение теплоносителя и малое содержание борной кислоты в паровой фазе, возможна её кристаллизация в реакторе. При параметрах, соответствующих аварийному процессу с разрывом главного циркуляционного трубопровода, предельная концентрация H_3BO_3 в активной зоне составляет ~450 г/кг H_2O . Проведенный расчетный анализ показал, что предел кристаллизации может быть преодолен через 50 часов аварийного процесса. Для повышения точности расчетов массообменных процессов в активной зоне необходимо знание таких фундаментальных свойств борной кислоты, как плотность и вязкость. Кроме того, в рамках проведения расчетов делалось допущение, что единственной формой существования борной кислоты является ортоборная кислота. Однако в неорганической химии известной считается тенденция образования полиборных кислот при увеличении концентрации ортоборной кислоты (H_3BO_3). Влияние полиборатных комплексов на процесс кристаллизации пока не изучено.

В результате проведенного анализа литературных источников выяснено, что на сегодняшний день отсутствуют актуальные данные по теплофизическим и физико-химическим свойствам борной кислоты, применительно к диапазону давления и температуры, характерному для аварийной ситуации ВВЭР-ТОИ. В связи с этим возникла необходимость проведения дополнительных опытов. Для решения этой задачи в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» были проведены экспериментальные исследования свойств растворов борной кислоты при необходимых параметрах. В результате выполненной работы были получены опытные данные по теплофизическим (плотность) и физико-химическим (рН) свойствам высококонцентрированных растворов ортоборной кислоты при параметрах, характерных для аварийных режимов АЭС с ВВЭР. Полученные результаты позволяют существенно расширить диапазон известных параметров растворов H_3BO_3 .

Экспериментальные данные по теплофизическим и физико-химическим свойствам водных растворов борной кислоты могут быть использованы:

- при оценке влияния борной кислоты на параметры водно-химического режима первого контура АЭС с реакторами ВВЭР как в штатном режиме эксплуатации, так и в случае аварии;
- для уточнения результатов расчетов аварийных процессов теплоотвода в реакторной установке, проводимых как с использованием одномерных расчетных программ, так и трёхмерных CFD-кодов.

Применение аэрозольного мелкодисперсного спрея для повышения эффективности охлаждения оребренных труб

Шлепкин А. С., Морозов А. В.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Обнинск, ashlepin@ippe.ru

Ключевые слова: мелкодисперсный аэрозоль, водовоздушная смесь, комбинированное охлаждение, теплообменники, теплообмен, оребренные трубы.

Воздухоохлаждаемые теплообменники широко распространены в различных областях промышленности, в том числе и в сфере производства электроэнергии. Например, на шестом энергоблоке Нововоронежской АЭС с реактором ВВЭР-1200 данные теплообменники применяются в системе пассивного отвода тепла. Однако у охлаждаемых воздухом теплообменных аппаратов существует существенный недостаток — низкий коэффициент теплопередачи, обусловленный физическими свойствами охлаждающей среды. Это приводит к необходимости интенсифицировать процесс теплообмена. На сегодняшний день наиболее распространено использование оребрения теплообменных поверхностей.

Недостатком данного метода является значительное увеличение стоимости теплообменного аппарата. Одним из перспективных способов улучшения экономических характеристик воздухоохлаждаемых оребренных теплообменников является замена воздушного охлаждения на водовоздушное.

Преимуществом применения газокапельного потока в качестве охладителя является то, что данный вид охлаждения обладает более высокой интенсивностью процессов теплопереноса. Дополнительным преимуществом водовоздушного потока является то, что его легко доставить на участки сложной поверхности, обеспечивая равномерное охлаждение всего объекта. Управляя режимом и направляя струю на заданные участки, можно задавать режим охлаждения или устранять локальный перегрев на поверхности.

Однако в результате проведения анализа литературных данных выяснено, что степень увеличения коэффициента теплопередачи может отличаться в разы в зависимости от различных факторов, к которым относятся: форма струи водяного спрея, расстояние от точки выхода водовоздушного потока до теплообменной поверхности, характеристики теплообменной поверхности, способ формирования струи, размер капель и расположение точек выхода газокапельного потока. Кроме того, оребренные трубы теплообменников системы пассивного отвода тепла ВВЭР-1200 имеют дополнительно ряд важных особенностей, влияющих на эффективность их охлаждения с помощью водовоздушной смеси. Во-первых, охлаждаемая поверхность имеет большую протяженность в горизонтальной плоскости. Во-вторых, трубы СПОТ имеют относительно малый диаметр (25 мм) и на охлаждаемой поверхности образуется устойчивая пленка жидкости. В-третьих, высота ребер этих труб соизмерима с их диаметром (20 мм). В-четвертых, для рабочих режимов системы пассивного отвода тепла характерны относительно низкие температуры охлаждаемых поверхностей (до 130–135 °С).

Таким образом, сложность процессов передачи тепла и наличие большого числа влияющих факторов приводят к необходимости проведения экспериментальных исследований в целях установления наиболее оптимальных режимов охлаждения для каждой отдельной теплообменной поверхности. Для изучения процессов охлаждения оребренных труб теплообменников системы пассивного отвода тепла ВВЭР-1200 с помощью мелкодисперсного водо-водяного потока в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» разработана концепция экспериментальной установки и методика выполнения экспериментов.

СЕКЦИЯ 4.

Тепломассообмен, магнитная гидродинамика, вибрации и акустика в энергетических установках

Многофункциональное магнитогидродинамическое устройство

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: магнитогидродинамическое устройство, насос-расходомер, дроссель-расходомер, жидкие металлы, постоянные магниты, напорная характеристика, градуировка.

Известны три типа магнитогидродинамических устройств, используемых в циркуляционных контурах с жидкими металлами. Это электромагнитные насосы, расходомеры и дроссели. Электромагнитные насосы и дроссели, как правило, — индукционные, использующие переменный ток и переменное магнитное поле. Электромагнитные расходомеры для жидких металлов, как правило, — кондукционные, использующие постоянный ток и постоянное магнитное поле. Каждое названное устройство выполняет одну функцию, соответствующую его названию. В данной работе описан принцип действия и несколько конструкций универсального кондукционного магнитогидродинамического устройства, способного выполнять одновременно две из трёх функций: насоса и расходомера (насос-расходомер), или дросселя и расходомера (дроссель-расходомер). Область применения рассматриваемых устройств – малые экспериментальные установки с расходом жидкого металла 1...500 л/ч и вспомогательные циркуляционные петли крупных установок.

Теоретической основой кондукционного насоса является закон Ампера, определяющий силу F , действующую на проводник длиной L с током I в магнитном поле с индукцией B :

$$F = B I L. \quad (1)$$

В канале прямоугольного сечения высотой L и шириной δ эта сила создаст напор:

$$P = B I \delta. \quad (2)$$

Под действием этого напора жидкий металл будет двигаться вдоль канала со скоростью W и с расходом:

$$V = W L \delta. \quad (3)$$

При движении в магнитном поле жидкого металла в нём будет индуцироваться, как в обычном магнитном расходомере, эдс:

$$E = B W L. \quad (4)$$

На внешней поверхности стенки рабочего канала насоса появится напряжение U , как результат совместного действия тока I и эдс E . Таким образом, в одном устройстве содержится и насос, и расходомер.

Воспользовавшись методом эквивалентной электрической схемы и законами Кирхгофа для электрической цепи, с учётом формул (3) и (4), показано, что напряжение U связано с расходом V следующей зависимостью:

$$V = C (U - I R_0), \quad (5)$$

где C — постоянная величина для конкретного магнитогидродинамического устройства, определяемая путём градуировки, как в обычных магнитных расходомерах; R_0 — электрическое сопротивление рабочего канала, заполненного неподвижным жидким металлом.

R_0 должно быть измерено при работе насоса на закрытую задвижку при номинальной температуре жидкого металла.

В докладе приводятся три варианта исполнения насоса-расходомера, которые были испытаны, и результаты их испытаний.

Если насос-расходомер установить в контур, через который прокачивается жидкий металл другим насосом, и включить его навстречу основному насосу, то будет выполняться функция дросселя-расходомера. В этом случае связь между расходом в контуре и напряжением на стенке дросселя-расходомера определяется формулой, аналогичной (5) и отличающейся только знаком между слагаемыми:

$$V = C (U + I R_0). \quad (6)$$

Таким образом, в результате данной работы создано новое магнитогидродинамическое устройство — насос-расходомер.

Особенности формирования гидродинамических нагрузок на твэлы в зависимости от структуры течения теплоносителя на входе в ТВС ВВЭР

Перевезенцев В. В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет МГТУ им. Н.Э. Баумана), Москва,
perevezentsev@bmstu.ru

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка (ТВС) ВВЭР, гидродинамическое возбуждение вибраций, пульсации давления, структура потока на входе в ТВС.

Вибрации твэлов в ТВС ВВЭР под воздействием турбулентного потока теплоносителя являются основной (до 80...90%) причиной повреждений оболочек твэлов вплоть до образования сквозных дефектов с выходом радиоактивных продуктов деления в теплоноситель. Стендовые вибрационные испытания полномасштабных макетов ТВС ВВЭР-440 проводились на гидродинамическом стенде с вынужденной циркуляцией воды с температурой 10...50 °С и давлением до 0,3 МПа при объемных расходах до 223 м³/ч (скорости течения в пучке твэлов до 7 м/с, числа Рейнольдса до 7,1·10⁴). Макеты ТВС размещались в колонке стенда с имитацией реакторных условий закрепления нижней и верхней частей ТВС в активной зоне. Вибропремещения измерялись пьезорезистивными виброакселерометрами, установленными внутри твэльных трубок, в составе измерительных каналов с интегрирующими усилителями. Пульсации давления измерялись пьезорезистивными датчиками давления. С целью существенного изменения структуры течения на входе в макет ТВС перед хвостовиком размещались дроссельные шайбы 45; 48,5 и 52 мм.

Подвод энергии от потока теплоносителя к пучку твэлов обусловлен переносом пульсационной энергии вдоль их боковой поверхности. Пульсации давления p' : $\rho \cdot u'/2$ характеризуют объемную удельную пульсационную энергию потока теплоносителя. При объемном расходе теплоносителя Q в единицу времени к пучку твэлов подводится пульсационная энергия:

$$N_{\text{гидр}} : Q \langle p'^2(z=0, f) \rangle^{1/2}, \quad (1)$$

где $\langle p'^2(z=0, f) \rangle^{1/2}$ — среднеквадратичные значения пульсаций давления в частотном диапазоне от 0 до f на входе в пучок.

Плотность потока пульсационной энергии в пучке твэлов с учетом (1) запишется следующим образом:

$$q = N_{\text{гидр}}/F_{\text{пр}} = V \langle p'^2(z=0, f) \rangle^{1/2}, \quad (2)$$

где $F_{\text{пр}}$, V — площадь проходного сечения пучка и скорость теплоносителя в пучке соответственно.

Подводимая к пучку твэлов за счет гидродинамических сил мощность может быть представлена в виде:

$$\langle N_{\text{возб}} \rangle = q S_{\text{бок}} = V P L \langle p'^2(z=0, f) \rangle^{1/2}, \quad (3)$$

где $S_{\text{бок}}$, P , l — площадь боковой поверхности твэлов внешнего ряда, его периметр и длина соответственно.

В условиях стационарного процесса вибраций должен сохраняться баланс подводимой и расходуемой энергии:

$$\langle N_{\text{дисс}} \rangle = C \langle N_{\text{возб}} \rangle. \quad (4)$$

Константа C в выражении (4) характеризует часть пульсационной энергии турбулентного потока теплоносителя, которая затрачивается на возбуждение и поддержание вибраций пучка твэлов. Независимо от природы процессов рассеяния энергии при вибрациях сила сопротивления колебаниям может быть представлена в виде:

$$f_{\text{дисс}}(z, \tau) = 2f_0 \Delta(V) M \partial\delta(z, \tau)/\partial\delta, \quad (5)$$

где $\Delta(V)$, M — логарифмический декремент колебаний и полная (с учетом присоединенной массы жидкости) масса на единицу длины пучка твэлов.

В предположении, что диссипация энергии связана с колебаниями пучка твэлов по первой форме, для которой поперечные виброперемещения при условиях шарнирного закрепления концов описываются выражением:

$$\partial\delta(z, \tau) = \delta(z, 0) \sin(\pi z/l) \sin(2\pi f_0 \tau), \quad (6)$$

где $\delta(z, 0)$ — амплитуда виброперемещений; f_0 — собственная частота колебаний пучка твэлов по первой форме.

За период времени $T = 1/f_0$ средняя мощность диссипативных сил при вибрациях пучка твэлов длиной l с учетом (5), (6) составит:

$$\langle N_{\text{дисс}} \rangle = \frac{\int_0^l \int_0^T dE_{\text{дисс}}}{T} = f_0 \int_0^l \int_0^T dE_{\text{дисс}} = 2\pi^2 \Delta(V) M \langle \delta^2(z=l/2) \rangle f_0^3 l, \quad (7)$$

где $\langle \delta^2(z=l/2) \rangle$ — средний квадрат виброперемещений по первой форме колебаний в середине пучка твэлов.

Из условия (4) с учетом (7) следует соотношение для оценки (с точностью до постоянной $C = 1,5 \cdot 10^{-2}$) среднеквадратичных значений виброперемещений по первой форме колебаний в середине пучка твэлов:

$$\langle \delta^2(z=l/2) \rangle^{1/2} = \sqrt{\frac{C V P \langle p'^2(z=0, f) \rangle}{2\pi^2 \Delta(V) M f_0^3}}. \quad (8)$$

Экспериментальные значения виброперемещений пучка твэлов по первой форме колебаний определялись путем цифровой фильтрации сигналов виброакселерометров (в составе измерительных каналов с аналоговыми интегрирующими усилителями), размещенных в середине пучка твэлов, в окрестности собственной частоты f_0 колебаний пучка. Соотношение (8) удовлетворительно обобщает экспериментальные данные по виброперемещениям в условиях различной структуры течения теплоносителя на входе в ТВС. Таким образом, пульсации давления являются важнейшей характеристикой турбулентного течения и могут служить мерой гидродинамического нагружения, определяющей вибрационные процессы обтекаемых поверхностей. Для снижения интенсивности вибраций твэлов в ТВС ВВЭР необходимо совершенствовать тракты подвода теплоносителя к ТВС с целью снижения уровней пульсаций давления на входе в пучок и формирования их спектров без резонансов в диапазоне собственных частот отдельных твэлов и пучка в целом.

Теплообмен при смешанной конвекции жидких металлов в вертикальных каналах

Беляев И. А., Сардов П. А., Лучинкин Н. А., Разуванов Н. Г.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва,
Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ МЭИ), Москва,
bia@ihed.ras.ru

Ключевые слова: теплообмен, экспериментальные исследования, гидродинамика, зондовые измерения, смешанная конвекция.

Применение жидких металлов в современной технике, непосредственно, связано с большими тепловыми нагрузками. В этих условиях термогравитационная конвекция может оказывать существенное влияние на структуру потока. Эти особенности, долгое время, оставались без внимания исследователей, так как жидкие металлы обладают относительно высокими коэффициентами теплоотдачи и вопросы дополнительной интенсификации теплообмена, как следствие, оставались неактуальными. На данный момент появляются новые сферы применения жидких металлов, такие как химическая промышленность, возобновляемая энергетика, также существенно возросли требования к безопасности реакторных установок. Вследствие этого появляется необходимость расширить понимание о структуре потока посредством возросших в последние десятилетия вычислительных и экспериментальных возможностей. Необходимо создать методы расчёта теплогидравлических локальных турбулентных характеристик потока в каналах с учётом крупномасштабных вихревых течений и влияния свободной конвекции. В связи с этим существующие расчётные коды требуют обновления и адаптации под современные требования. Многие годы объединённой командой НИУ МЭИ — ОИВТ РАН проводятся экспериментальные и численные исследования теплообмена при течении жидких металлов в каналах и трубах. Однако большая часть работ направлена на изучение проблем, связанных с течением жидкого металла под воздействием магнитного поля.

Работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей теплообмена при смешанной конвекции жидких металлов в вертикальных каналах и трубах. Рассматривалось опускное и подъёмное течение жидкого металла, в качестве модельного теплоносителя использовалась ртуть. Эксперименты проводились с использованием микротермопарных погружных зондов различной конфигурации, что позволило детально восстановить профили интенсивности пульсаций и осреднённой температуры в исследуемом сечении на участке стабилизированного теплообмена. С помощью корреляционного датчика скорости, в отдельных режимах также были проведены измерения продольной скорости.

Проведена серия экспериментов в трубе с внутренним диаметром 19 мм и прямоугольном канале 56×17 мм. Полученные данные представлены в виде осреднённых профилей и полей температуры и интенсивности температурных пульсаций. Также представлены зависимости относительных чисел Нуссельта (Nu/Nu_t) от чисел Ричардсона (Gr_q/Re^2), где Gr_q — число Грасгофа, рассчитанное по тепловому потоку. Было обнаружено, что коэффициенты теплоотдачи могут значительно уменьшаться (при $Ri < 1$) и увеличиваться (при $Ri \sim 1$) под влиянием свободной конвекции. Подобный эффект наблюдается в неметаллических средах и хорошо изучен. Также были структурированы данные для труб различных диаметров и различных тепловых потоков.

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

Исследование специфики МГД-течения жидкого металла в условиях неоднородного обогрева

Беляев И. А., Сардов П. А., Листратов Я. И.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва,
Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ МЭИ), Москва,
sardov.pa@yandex.ru

Ключевые слова: теплообмен, экспериментальные исследования, гидродинамика, МГД, зондовые измерения, смешанная конвекция.

Работа посвящена исследованию особенностей смешанной конвекции жидкого металла в вертикальной трубе. В неизотермическом потоке жидкого металла под влиянием магнитного поля значителен вклад термогравитационной конвекции. При определенных условиях и конфигурациях МГД-теплообмена, термогравитационная конвекция может вызвать низкочастотные температурные пульсации аномальной амплитуды.

Предполагаемые МГД-конфигурации, близкие к условиям гибридных и термоядерных реакторов типа ТОКАМАК, изучались с использованием ртути в качестве модельного теплоносителя. Ртуть обладает специфическими теплофизическими свойствами и является низкотемпературной модельной жидкостью, чем и обусловлено её использование. Исследования особенностей гидродинамики и теплообмена в ранее неизученных соотношениях параметров потока, таких как числа Рейнольдса, Гартмана и Грасгофа, проводятся с использованием жидкометаллического контура РК-3 (HELMET). Получаемые данные включают в себя усредненные по времени температурные поля, распределения локальных температур стенки и статистических характеристик пульсаций температуры в потоке. Проведение детальных измерений, непосредственно внутри потока, стало возможным благодаря технологии микротермопарных погружных зондов. Из предыдущих исследований известно, что совместное влияние сильного поперечного магнитного поля и сил плавучести проявляется в виде крупномасштабных вторичных течений, сопровождающихся пульсациями температуры аномально большой амплитуды. Однако существующие экспериментальные возможности не позволяли ответить на вопрос, будет ли это явление существовать в более сильных магнитных полях, так как подавление пульсаций температуры на предшествующей установке (РК-2) в максимально возможном магнитном поле (1 Тесла, число Гартмана до 500) обнаружено не было.

Исследование проводилось в конфигурации «опускное течение жидкого металла под действием поперечного магнитного поля и неоднородного обогрева». Односторонний обогрев является предельным случаем неоднородного и первым приближением к наиболее близким условиям контуров охлаждения первой стенки ТЯР. Измерение температуры проводилось по точкам в поперечном сечении трубы, а для разных режимов были построены поля абсолютных значений и интенсивности пульсаций температуры как под влиянием магнитного поля различной величины, так и без него. Изученное поперечное сечение расположено в точке $z/d = 37,4$ от начала зоны обогрева экспериментальной секции. Расход и плотность теплового потока фиксировались при значениях, обеспечивающих $Re = 10000$, $Gr = (2-8) \cdot 10^7$ для изучения влияния магнитного поля, реализующего $Ha = 0-1350$.

На основании результатов экспериментов также было проведено численное моделирование методом DNS (Direct Numerical Simulation) при данной конфигурации течения. Рассматривалось опускное течение вязкой несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами в трубе (53 калибра). Жидкость движется под действием при-

ложенного градиента давления. Магнитное поле и обогрев моделировались максимально приближенно к конфигурации эксперимента. Число Прандтля принималось равным 0,025, число Рейнольдса — 10^4 , числа Грасгофа — $(4-8) \cdot 10^7$, числа Гартмана — 300–900.

В работе приводятся обнаруженные границы полного подавления (при числах Гартмана более 800) низкочастотных пульсаций температуры в условиях неоднородного обогрева и сильного магнитного поля. Обсуждаются возможные зависимости безразмерных комплексов и области существования нестационарных эффектов теплообмена. Режимы с низкочастотными пульсациями температуры были сопоставлены с предыдущими результатами и качественно совпадают с данными, полученными с помощью численного моделирования.

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

Термоакустический эффект и его применение

Верещагина Т. Н., Михеев А. С., Кудряева Ю. В.

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

Ключевые слова: термоакустика, термоакустический эффект, история исследований, термоакустический двигатель, термоакустический охладитель, охлаждение газа, публикационная активность.

Термоакустика — раздел физики, изучающий взаимное преобразование тепловой и акустической энергии. Основы линейной теории термоакустики были заложены в работах Николаса Ротта, опубликованных в 80-х годах 20-го века. В это же время было создано первое термоакустическое устройство — акустический тепловой насос. Чуть позже американский теплофизик Грэг Свифт обобщил уравнения Ротта для различных термоакустических устройств. Он был первым, кто дал всесторонний анализ термоакустических устройств и разработал практические методики и рекомендации для их проектирования.

В настоящее время активно разрабатываются термоакустические преобразователи для различных устройств: холодильных машин, систем климат-контроля, криоохлаждающих для сжижения газа, микро-ТЭЦ и др. Поскольку термоакустические устройства не требуют смазки и позволяют обойтись без фреона, ущерб окружающей среде от их использования сводится к минимуму. Поэтому акустическая технология охлаждения всё чаще привлекает внимание производителей бытовых холодильников и морозильных камер. Кроме того, способность термоакустического преобразователя трансформировать тепловую энергию любого источника в электрическую обуславливает актуальность использования таких устройств в составе космических аппаратов.

В докладе кратко описана физическая сущность прямого и обратного термоакустического эффекта, приведен исторический обзор практических разработок различных термоакустических устройств, приведены примеры современных разработок холодильников, работающих на основе термоакустического эффекта. Показано, что разработка холодильных установок, основанных на термоакустическом эффекте, является в настоящее время актуальной и перспективной задачей.

Кроме того, в докладе представлен обзор истории научных исследований в области термоакустики, начиная с опытов Хиггинса с «поющим пламенем» в 1777 году до работ 21 века.

В настоящее время исследования и разработки термоакустических устройств различного вида и применения активно ведутся в странах Америки, Европы, Азии и Африки: США, Канада, Великобритания, Нидерланды, Италия, Франция, Германия, Япония, Китай, Тайвань, Индия, Пакистан, Арабские Эмираты, Иран, Таиланд, Египет, Мексика, Малайзия. Не остались в стороне от этой проблемы исследователи таких стран ближнего зарубежья, как Украина, Казахстан, Армения.

В России, по данным РИНЦ, за последние 20 лет ежегодно только на русском языке публикуется не менее 10 работ, имеющих отношение к термоакустике.

Сделан вывод о том, что отсутствие единой общепризнанной методики моделирования процессов в термоакустических устройствах, даже в установившемся режиме, делает актуальной задачу разработки адекватной физической модели и методики моделирования рабочих процессов, происходящих в термоакустических устройствах, позволяющих быстро получить результат с удовлетворительной точностью.

**Испытания привода СУЗ ШЭМ-3
на стойкость к сейсмическим воздействиям
для условий площадки блоков № 3, 4 АЭС «Куданкулам»**

**Селезнев А. В., Макаров В. В., Афанасьев А. В., Матвиенко И. В.,
Пучков М. В., Носенко А. П., Егоров Ю. В.**

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

Ключевые слова: реактор, активная зона, безопасность, сейсмостойкость, поглощающие стержни, привод системы управления и защиты.

Привод СУЗ ШЭМ-3, как оборудование первой категории сейсмостойкости при сейсмических воздействиях до проектного землетрясения (ПЗ) включительно, должен сохранять работоспособность, а до максимального расчетного землетрясения (МРЗ) включительно — выполнять функции, связанные с обеспечением безопасности. Функциями безопасности, выполняемыми приводом системы управления и защиты (СУЗ), являются расцепление со штангой по сигналу аварийной защиты и введение пучка поглощающих стержней (ПС) в активную зону за проектное время от 1,2 до 4,0 с. Последняя функция выполняется приводом СУЗ совместно с другими компонентами реактора: тепловыделяющими сборками (ТВС), блоком защитных труб. Соответствие привода СУЗ ШЭМ-3 указанным требованиям по сейсмостойкости проверялось путем контроля его работоспособности и выполнения функций безопасности в процессе сейсмических испытаний.

В процессе испытаний были смоделированы все факторы, влияющие на работоспособность привода СУЗ и выполнение им функций безопасности. При этом определение и последующее моделирование всех факторов, значимо влияющих на время введения ПС СУЗ в активную зону реактора, являлось наиболее сложной с методической точки зрения задачей. Для оценки степени влияния отдельных факторов и, соответственно, необходимости их моделирования в сейсмических испытаниях был выполнен ряд предварительных методических экспериментов.

В докладе приведены результаты испытаний привода СУЗ ШЭМ-3 с имитацией землетрясений, соответствующих ПЗ и МРЗ на площадке блоков 3, 4 АЭС «Куданкулам». Испытания продемонстрировали, что привод СУЗ ШЭМ-3 обеспечивает сброс штанги с ПС СУЗ во время ПЗ, МРЗ и после них. По окончании испытаний повреждения привода СУЗ ШЭМ-3 не обнаружены, работоспособность привода не нарушилась.

Времена введения поглощающих стержней в ТВС при ПЗ и МРЗ не превысили 2,8 с. Таким образом, привод СУЗ ШЭМ-3 совместно с другими компонентами реактора (ТВС, блоком защитных труб) при землетрясениях вплоть до МРЗ выполняет проектную функцию безопасности по введению ПС СУЗ в активную зону по сигналу АЗ за проектное время. Результаты получены при консервативном или реалистичном подходе к моделированию всех факторов, влияющих на время введения ПС СУЗ в активную зону.

Исследование теплогидравлики имитатора расплава соли при течении в канале в условиях неоднородного обогрева

Белавина Е. А., Беляев И. А., Пятницкая Н. Ю.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва
belavinaea@gmail.com

Ключевые слова: расплавы солей, теплообмен, экспериментальные исследования, гидродинамика, МГД, зондовые измерения, смешанная конвекция.

Одной из проблем на пути развития современной ядерной энергетики является ограниченность ресурсов уранового топлива. Возможным решением может стать реализация концепции замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) и расширенное воспроизводство топлива при использовании урана и тория. В долгосрочной перспективе технологии жидкосолевых ядерных реакторов (ЖСР) с циркулирующим топливом могут быть востребованы как для создания Th-U размножителя (ЖСР-Р), так и в качестве нового элемента в системе ядерной энергетики в симбиозе с твердоотопливными реакторами для дожигания минорных актинидов из ОЯТ твердоотопливных реакторов (ЖСР-С).

Возможность применения расплавленных солей на основе фторидов в качестве рабочего тела в перспективных разработках ядерно-энергетических систем для новой технологической базы России требует решения нескольких ключевых научно-технических проблем. Эти проблемы связаны с разработкой надежных конструкционных материалов и исследованием теплофизических особенностей теплоносителя. Решение последней проблемы в значительной степени сдерживалось отсутствием надежных систематизированных данных по физическим и химическим свойствам, специфики процессов теплообмена и технологии эксплуатации перспективных составов расплавов фторидных солей.

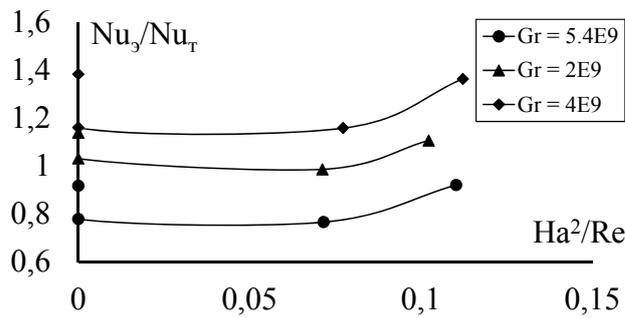
Работа в этой области ведётся коллективом авторов НИУ МЭИ — ОИВТ РАН. Исследования проводятся путем численного моделирования и экспериментов с использованием модельных теплоносителей на установке «Солевой контур РК-3». Получение данных непосредственно изнутри потока стало возможным благодаря уникальной технологии микротермопарных погружных зондов. С помощью шарнирного зонда выполнялось измерение температурного поля исследуемого сечения, и на основании данных о температуре и режимных параметрах рассчитывались безразмерные локальные и затем средние по периметру коэффициенты теплоотдачи (КТО) и числа Нуссельта.

В ходе работы было проведено экспериментальное исследование особенностей гидродинамики и теплообмена при смешанной конвекции имитаторов расплава солей в условиях одностороннего обогрева под воздействием сильного поперечного магнитного поля. В качестве модельного теплоносителя использовался 20-процентный водный раствор КОН. Выбор данного рабочего тела обусловлен, в первую очередь, похожестью теплофизических свойств, таких как плотность и электропроводимость, с реальными теплоносителями — флинками и флайбами, что дает возможность применить теорию подобия. Особый интерес представляет изучение специфики совместного влияния термогравитационной конвекции и магнитного поля.

Была проведена серия экспериментов в области развитой турбулентности в прямоугольном канале при числах Рейнольдса ($Re = 5000-8000$) под влиянием компланарного магнитного поля ($Ha = 23$) и неоднородного обогрева.

В результате проведенных исследований были получены данные об осредненных и пульсационных характеристиках потока. Значения безразмерной температуры, полу-

ченные экспериментально, находятся в диапазоне турбулентных, рассчитанных аналитически. Также заметно характерное расслоение профилей при наложении магнитного поля, однако данный перепад сопоставим с погрешностью эксперимента. Подобный эффект наблюдался в исследовании теплоотдачи при смешанной конвекции под воздействием сильного поперечного магнитного поля в горизонтальной трубе и был вполне ожидаем. Подобное расслоение было зафиксировано в режимах с малым числом Ричардсона ($Ri \sim 0,1$). В этом случае влияние свободной конвекции незначительно и превалируют вязкостно-гравитационные эффекты, следовательно, и в большей степени проявляется пондеромоторная сила, создаваемая магнитным полем. Значительного снижения коэффициентов теплоотдачи также не обнаружено, следовательно, в исследуемых режимах подавления турбулентности не происходит.



Зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Стюарта

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

СЕКЦИЯ 5. Расчетные модели, коды и результаты численного моделирования

Полное описание механики турбулентности в текущей жидкости

Щербаков С. И.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Обнинск,
scher@obninsk.com

Ключевые слова: механика жидкости, уравнения движения, турбулентность, неупорядоченные течения, растяжение вихревых трубок, локальные торможения, генерация вихрей.

Цель работы — описание механики процессов, приводящих к нестабильности течения жидкости, известной как турбулентность. Для понимания процесса используется параллельный анализ разных форм уравнений движения жидкости и уравнений переноса характеристик. Явление разделяется на составляющие, рассматривается последовательность их взаимодействия.

Используются результаты предыдущих работ. Формулировка механики нестационарных течений на основе закона сохранения циркуляции скорости, обратной связи между течением и граничными условиями, представления о конфигурациях полей изменений скорости O и Φ -типа для возмущений ротора скорости и самой скорости.

Рассматриваются процессы, происходящие при изменении внутренней структуры удельной циркуляции — соотношение вихря и длины жидкого элемента. Проводится анализ трансформации вихря при перемещении в неравномерном потоке. Используются уравнения функций маркеров и функция возраста частиц. Показан эффект удлинения вихревых линий и возникновение винтового течения для ориентированных поперек течения вихревых линий. Из анализа векторного уравнения переноса вихря получен вывод об усилении винтового течения только для поперечных компонент скорости, то есть для пространственно коротких вихревых образований.

При удлинении вихревых линий происходит обособление в потоке вихревой трубки, разделение течения на две части: основное течение — вне трубки, циркуляционное течение — внутри трубки. Получено уравнение, описывающее взаимодействие основного течения и циркуляционной зоны (обмен кинетической энергией между ними). Приводится вывод уравнения для удельной механической энергии (напора) и анализ движения потока параллельных струй, содержащего вихревую трубку.

Для расчета скоростного напора вращательного движения вихревой трубки предложены модельные представления. Построены модельные уравнения для изменений вихря и скоростного напора в вихревой трубке. Получено решение для интенсивности вихревой трубки во времени. При растяжении трубки скоростной напор вращательного движения быстро увеличивается, а затем уменьшается. Возникает кратковременное торможение перемещения вихревой трубки. Трубка становится препятствием течению, как неподвижная непроницаемая граница. Основное течение обтекает вихревую трубку.

При локальном торможении к полю скорости сдвигового течения добавляется и поддерживается некоторое время дополнительное поле торможения Φ -типа. Поле торможения содержит кольцевой вихрь, который выносится в поток окружающим течением.

Этот вихрь растягивается течением, что приводит к повторному торможению. Возникает каскадная, самоподдерживающаяся, перемещающаяся по течению неустойчивость.

Описанный каскадный процесс — основной механизм турбулентности, приводящий к перемещению неустойчивости по течению от места возникновения первичного вихревого возмущения. Он не требует большого усиления энергии при растяжении вихревой трубки и возникает в ламинарном течении при минимальной неравномерности скорости. Для трубы с параболическим профилем получены минимальные значения числа $Re = 1024-1723$, при котором появляется неустойчивость.

При локальных торможениях основного течения изменяются градиенты скорости, растягивающие вихревую трубку. Возникает неустойчивость формы трубки — второй механизм турбулентности. Скорость перемещения участков трубки становится неравномерной. Вблизи экстремумов скорости торможения не происходит. В промежутках между экстремумами — интенсивное торможение. Образуются узкие пики скорости и гребенчатая форма вихревой трубки. Получены расчетные скорости и формы трубки. Неустойчивость формы увеличивается с уменьшением вязкости.

Локальные снижения скорости кратковременны. На заторможенных участках вихри максимальны. Из-за трения они уменьшаются, скорость течения восстанавливается.

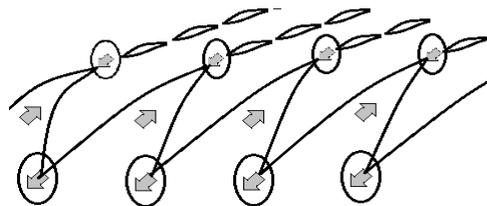
Вытянутые участки трубки с разных сторон локального максимума скорости сближаются, образуя сложенную вихревую нить. Эти нити продолжают растягиваться и обрываются из-за локальных торможений, становятся множеством замкнутых независимых кольцевых вихрей. Поток их уносит.

Приведены профили вихревых трубок по мере их продвижения в сдвиговом течении с учетом и без учета отрыва сложенных вихревых нитей. При меньшей вязкости средняя скорость трубки меньше из-за многочисленных локальных торможений.

Неустойчивость при растяжении вихревой трубки приводит к многочисленным локальным торможениям потока, которые сопровождаются генерацией тормозных течений Φ -типа, содержащих кольцевые вихри большого размера, направленные перпендикулярно основному течению и генерацией многочисленных кольцевых вихрей меньшего размера из сложенных кусочков вихревой трубки, ориентированных в плоскости сдвигового течения. Этот механизм обеспечивает большой коэффициент размножения вихревых структур в каждом поколении событий турбулентности.

Вихри течений Φ -типа приводят к продвижению турбулентности по потоку через механизм автогенерации торможений. Сложенные вихревые нити дрейфуют перпендикулярно скорости основного течения и распространяют турбулентность в поперечном сечении потока. Основной источник первоначальных вихрей — упорядоченные нестационарные течения, содержащие вихревые образования. Такие течения самопроизвольно возникают на ограниченных препятствиях, обтекаемых потоком с разных сторон. Автогенерация поддерживается за счет обратной связи через поля изменений скорости O -типа. При больших значениях Re к ним добавляются вихри, генерируемые на границах изменениями скорости при локальных кратковременных торможениях.

Краткий вывод. В текущей жидкости происходит передача кинетической энергии от основного, поступательного, движения к вращательному движению кольцевых вихрей. При этом генерируются кольцевые вихри следующего поколения, и процесс повторяется. Коэффициент размножения вихрей зависит от числа Re . Множество разнонаправленных вихрей и локальных торможений поступательного движения создают эффект неупорядоченного течения. На рисунке показана совокупность вихревых линий при неравномерном растяжении вихревой трубки.



Тестовые расчеты гидродинамики раздающих коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ

Лунина С. В., Дельнов В. Н.

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

Ключевые слова: гидродинамика, проточная часть, раздающая коллекторная система, тестовые расчеты, теплообменник, ядерный реактор, ядерная энергетическая установка, CFD код.

В работе представлены результаты тестовых расчетов гидродинамики раздающих коллекторных систем (РКС) теплообменников и реакторов ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Коллекторная система является типичным элементом проточной части указанного оборудования ЯЭУ, эффективная и безопасная эксплуатация которых является приоритетными направлениями Госкорпорации «Росатом». Расчеты выполнены с использованием программных комплексов вычислительной гидродинамики, известных как CFD коды [1, 2].

Приведены результаты расчетов турбулентного течения теплоносителя в проточных частях плоской и цилиндрической РКС с различными условиями подвода и отвода теплоносителя.

Выполнен сравнительный анализ результатов расчета и экспериментальных данных по гидродинамике типичных для ЯЭУ РКС, показано их удовлетворительное совпадение. Сравнительный анализ выполнен с использованием экспериментальных данных, приведенных в работе [3].

Сделано предположение о правомерности применения CFD кода для расчета гидродинамики различных типов РКС и их отдельных характерных элементов.

Список литературы

1. Jiuyan Tu, Guan HengYeoh, Chaoqun Liu. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. Butterworth – Heinemann, 2008.
2. J.D. Anderson, Jr. Computational Fluid Dynamics. The basics with applications. McGraw-Hill, 1995.
3. Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н. Особенности гидродинамики коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. – 215 с.

Применение приближения анизотропного пористого тела для исследования процессов тепломассопереноса в пучках стержней с различными способами дистанционирования, охлаждаемых жидкометаллическим теплоносителем

Баясхаланов М. В., Меринов И. Г., Харитонов В. С., Корсун А. С.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва
mvbayaskhalanov@mephi.ru*

Ключевые слова: быстрые реакторы, жидкометаллические теплоносители, дистанционирующая решетка, твс с винтовым дистанционированием, программный модуль на основе модели анизотропного пористого тела, численное моделирование, сравнение с экспериментальными данными.

При проектировании ядерных энергетических установок для обоснования безопасности проводится существенное количество расчетных исследований, цель которых — показать безопасность работы энергоблока в номинальных и ненормальных режимах работы. Численное моделирование позволяет детально рассмотреть возможные последствия аварийных режимов и выработать проекторочные решения для перспективных ядерных энергетических установок, не допускающие возникновения тяжелых аварий.

В ходе данной работы были выполнены численные исследования трехмерных процессов тепломассопереноса в сборках с дистанционирующими решетками и винтовым дистанционированием твэлов при течении жидкометаллического теплоносителя с помощью программного модуля анизотропного пористого тела APMod, разработанного в НИЯУ МИФИ [1].

Полученные расчетные данные сравнивались с экспериментальными данными. Для сборок с дистанционирующей решеткой проводилось сравнение с результатами, полученными на экспериментальной сборке в Karlsruhe Liquidmetal Laboratory (KALLA) [2, 3]. Для сборок с дистанционированием проволочной навивкой рассматривались результаты, полученные на стержневой сборке в Oak Ridge National Laboratory (ORNL) [4, 5].

Для первого эксперимента были рассчитаны значения перепада давления в экспериментальной сборке из 19 стержней с тремя дистанционирующими решетками при различных скоростях потока свинцово-висмутового теплоносителя. Рассчитанные значения перепадов давления и коэффициентов трения в сборке были сопоставлены с экспериментальными данными. Кроме этого было выполнено сопоставление результатов расчета подогрева теплоносителя в сборке с экспериментальными данными при наличии электрообогрева стержней.

Для экспериментов, выполненных в ORNL, были рассчитаны значения перепада давления в изотермической экспериментальной сборке, дистанционирование стержней в которой осуществлялось при помощи проволочной навивки, при различных расходах натриевого теплоносителя. Также были получены подогревы теплоносителя для нескольких экспериментов: при равномерном обогреве всех стержней; при нагреве только центрального стержня; при нагреве семи центральных стержней; при нагреве трех стержней, расположенных у одной из сторон сборки. Рассчитанные значения перепадов давления и подогревов теплоносителя также были сопоставлены с экспериментальными данными.

В результате выполнения расчетов было получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных. Также были проанализированы возможные причины отклонений расчетных данных от экспериментальных.

Полученные результаты показали работоспособность программного модуля ARMod и возможность его применения для расчета параметров потока жидкометаллического теплоносителя в тепловыделяющих сборках с различными способами дистанционирования.

Список литературы

1. Расчетное моделирование теплогидравлических процессов в тепловыделяющих сборках с жидкометаллическим теплоносителем в приближении анизотропного пористого тела / А.С. Корсун, И.Г. Меринов, В.С. Харитонов, М.В. Баясхаланов, В.В. Чуданов, А.Е. Аксенова, В.А. Первичко // Теплоэнергетика. – 2019. – № 4. – С. 12–22.
2. Pacio J., Daubner M., Fellmoser F., Litfin K., Marocco L., Stieglitz R., Taufall S., Wetzel Th. Heavy-liquid metal heat transfer experiment in a 19-rod bundle with grid spacers // Nuclear Engineering and Design. – 2014. Vol. 73. – P. 33–46.
3. Litfin K., Batta A., Class A.G., Wetzel Th., Stieglitz R. Investigation on heavy metal cooling of ADS fuel pin assemblies // Journal of Nuclear Materials. – 2011. Vol. 415. – P. 425–432.
4. Temperature distribution in a 19-rod simulated LMFBR fuel assembly in a hexagonal duct (Fuel Failure Mockup Bundle 2A) — record of experimental data / M.H. Fontana, R.E. MacPherson, P.A. Gnadt et. al. – ORNL-TM-4113, Oak Ridge National Laboratory, 1973.
5. Temperature Distribution in the Duct Wall and at the Exit of a 19-Rod Simulated LMFBR Fuel Assembly (FFM Bundle 2A) / M.H. Fontana, R.E. MacPherson, P.A. Gnadt, et. al. – Nuclear Technology, 1974, 24:2, 176-200, DOI: 10.13182/NT74-A31474.

Диффузия нанопузырьков в металлическом топливе: результаты молекулярно-динамического моделирования

Антропов А. С., Стегайлов В. В.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва
stegailov@gmail.com

Ключевые слова: атомистическое моделирование, молекулярная динамика, коэффициент диффузии, пузыри в твердом теле, газонаполненные пузыри, уран, молибден, ксенон, ЕАМ потенциал, фасеточные пузыри, устойчивые грани, энергия активации, энергия образования террас.

Описание изменений свойств ядерного топлива в процессе его эксплуатации чрезвычайно важно для поиска путей повышения эффективности проектируемых реакторных установок и обоснования их безопасности. Важной частью такого описания является моделирование поведения продуктов деления, образующихся в топливе на этапе штатной работы реактора, с помощью топливных кодов. Коэффициент диффузии пузырей в кристаллической решетке топлива является одним из ключевых параметров этих кодов. Он влияет на скорость выхода продуктов деления, пористость и распухание топлива.

Классический подход к рассмотрению подвижности пузырей связывает коэффициент диффузии пузыря с коэффициентами объемной и поверхностной самодиффузии атомов матрицы. В дальнейшем были обнаружены различные механизмы подавления диффузии. Один из них связан с наличием выраженных граней у пузыря. Существует теоретическая модель, согласно которой скорость диффузии определяется частотой образования новых ступеней в гранях. Другой механизм подавления связан с замедлением кинетических процессов на поверхности вследствие повышенного давления газа, заполняющего пузырь. Методы суперкомпьютерного атомистического моделирования дают возможность детально изучить упомянутые выше механизмы диффузии пузырей.

ОЦК уран в качестве рассматриваемой системы был выбран как первое приближение перспективного ядерного топлива U-Mo, имеющего аналогичную решетку. Моделирование производилось с пустыми пузырями и пузырями, содержащими ксенон в широком диапазоне давлений. Это позволило отдельно изучить влияние фасеточной формы пузырей и влияние газа. Для моделирования использовался межатомный потенциал ЕАМ для урана, показавший хорошее описание динамики кристаллической решетки, а также потенциал ЕАМ для системы U-Mo-Xe. Для моделирования диффузии пузырей использовался предложенный метод движения в градиенте давления, апробированный на двумерных решетках.

Было показано, что пузыри в кристаллической решетке ОЦК урана с радиусом от 12 до 65 Å принимают фасеточную форму с выраженными плотноупакованными гранями. Абсолютная площадь граней увеличивается с увеличением размера пузырей. Были рассчитаны энергии образования и энтропии междоузельных атомов, вакансий и кластеров вакансий (террас) на поверхности.

Пересмотрена теория движения фасеточных пузырей и описаны две возможности образования критической террасы вакансий. Совместно с уравнением Эйнштейна — Смолуховского пересмотренная теория позволила разработать метод, основанный на неравновесной ускоренной молекулярной динамике (МД) в градиенте давления, для расчетов коэффициента диффузии пузырей.

С использованием этого метода были рассчитаны коэффициенты диффузии пустых пузырей радиусом 9 и 12 Å в температурном диапазоне от 1300 до 1400 К. Точ-

ность нового метода была проверена с помощью независимого моделирования свободной диффузии. Подтверждено, что диффузия происходит путем образования террас в устойчивых гранях. Установлено, что энергия активации диффузии пузырей этих радиусов в ОЦК уране составляет $E^{\text{act}}(\text{MD}) = 2,1 \pm 0,2$ эВ. Было показано, что результаты МД существенно отличаются континуальной теории. Данный результат подтверждает актуальность предложенного ускоренного метода МД для уточнения количественной теории диффузии нанопузырей.

Методом ускоренной неравновесной МД были рассчитаны коэффициенты диффузии газонаполненных пузырей в ОЦК уране при разных давлениях ксенона внутри пузыря. По полученным результатам построена зависимость коэффициента диффузии от давления газа, проведено сравнение с теоретическими предсказаниями.

Для рассматриваемого случая ускоренный метод МД дает примерно 20-кратное ускорение по сравнению со стандартным методом моделирования свободной диффузии. Это дает преимущества при дальнейших расчетах коэффициента диффузии газонаполненных пузырей в ядерных топливах.

Диффузия дефектов в металлических топливах: результаты первопринципных расчетов и атомистического моделирования

Смирнов Г. С., Стегайлов В. В.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва
grsmirnov@gmail.com

Ключевые слова: молекулярная динамика, теория функционала электронной плотности, уран, молибден, вакансии, межузельные атомы.

В металлических топливах на основе уран-молибденовых сплавов происходит стабилизация фазы γ -U во всем диапазоне рабочих температур за счет добавления молибдена в качестве легирующего элемента. Получение коэффициентов диффузии, а также энергий миграции и формирования точечных дефектов необходимы для построения многомасштабных моделей эволюции топлива.

Наиболее перспективным путем является получение этих величин из первопринципных расчетов с использованием методов теории функционала электронной плотности (DFT). Эти методы в первую очередь ориентированы на получение результатов при нулевой температуре, так как требуют большое количество вычислительных ресурсов. Расчет движения атомов при конечной температуре возможен только для небольших систем и на относительно коротких временах. Для моделирования большого числа частиц используется метод молекулярной динамики с классическими потенциалами взаимодействия, полученными на основе DFT расчетов.

Однако расчет и валидация свойств дефектов для чистого γ -U при помощи стандартных процедур на основе атомистических подходов сильно затруднены, так как его кристаллическая решетка неустойчива при нулевой температуре, а стабилизация происходит за счет температурных эффектов или добавления легирующих примесей.

В работе рассматривается применение первопринципных расчетов электронной структуры и атомистического моделирования с классическими межатомными потенциалами взаимодействия для расчетов свойств дефектов в металлических топливах. Обсуждается точность таких моделей, а также критически анализируются имеющиеся экспериментальные данные для верификации.

Предложены методы расчета свободной энергии образования точечных дефектов на основе термодинамического интегрирования и прямого молекулярно-динамического моделирования, которые позволяют получать значения свободной энергии при конечной температуре без гармонического или квазигармонического приближения. Полученные данные показывают, что энергия образования межузельных атомов в γ -U имеет значения порядка 0,7 эВ, что намного меньше характерных значений в других металлах, в частности, молибдена. В то же время энергии образования вакансий в γ -U и Mo имеют сравнимые значения. Анализируется вклад дефектов в коэффициент теплового расширения.

Совершенствование физико-математических моделей двухфазной теплогидравлики при модернизации системных кодов для обоснования безопасности ЯЭУ с ВВЭР

Корниенко Ю. Н., Чуркин А. Н., Быков М. А.

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск
kornienko_un@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: аналитические модели, двухфазные, неравновесные, турбулентные потоки, квазиодномерная форма, дефекты импульса, энтальпии и массы нодализационной схемы.

Введение. Расчетные исследования в обоснование безопасности современных высоконапряженных ЯЭУ с ВВЭР, допускающих кипение теплоносителя на выходе активных зон, нуждаются в совершенствовании физико-математических моделей двухфазных неравновесных турбулентных потоков (ДНТП) в широкой области режимных условий не только в аварийных, но и в номинальных режимах. Основным инструментом для таких расчетов являются известные одномерные (1D) контурные коды типа RELAP5, КОРСАР/ГП и им подобные, а также субканальные (ячейковые) коды типа КАНАЛ, SC-1, ТИГРСИ и другие. Используемые ими в так называемом гидравлическом приближении 1D эмпирические модели переноса импульса, тепла и массы, хотя и обеспечивают экономию памяти и времени счета, но оказываются ограниченными в полноте описания механизмов переноса и границах диапазонов применения. Они имеют значительную неопределенность в предсказании важнейших для обоснования безопасности характеристик, таких как температура твэла, критический тепловой поток, перепад давления в субканалах и ТВС в целом.

Погрешность расчетных результатов 1D кодов увеличивается с ростом неравновесности и негомогенности двухфазных потоков, в частности, дискретно-пузырьковых и капельных (в особенности при высокой термической и скоростной неравновесности фаз), характерных для ненормальных и аварийных режимов ЯЭУ. Физический смысл недостаточности моделей «гидравлического приближения» связан с неучетом влияния неоднородных 3D профилей скорости, температур/энтальпий, и паросодержаний, а также источников/стоков за счет генерации/конденсации, инерционных и массовых сил в поле потока теплоносителя.

Преимущество и преимущества предлагаемого подхода. В работе представлена квазиодномерная ($\kappa 1D$) методология, направленная на совершенствование физико-математических моделей ДНТП контурных и субканальных кодов, основанная на корректном пространственно-временном осреднении локальных параметров. В ее основе лежат свойства масштабной инвариантности статистических характеристик, связанных с универсальностью спектров турбулентных структур А.Н. Колмогорова и работах о консервативных свойствах пограничного слоя С.С. Кутателадзе. В настоящее время положения этих теорий можно рассматривать как следствия более общей теории масштабирования (scaling) и неполной автомодельности Г.И. Баренблатта — Я.Б. Зельдовича.

Исходным пунктом применения $\kappa 1D$ методологии является пространственно-временное осреднение в поперечном сечении канала локальных профилей переменных ДНТП в виде интегралов по поперечному сечению канала (субканала) с весом по массовой скорости 3D законов сохранения импульса, энергии и массы в форме модели потока дрейфа (или 2-жидкостного течения). Эта процедура обеспечивает корректный переход от исходного 3D описания к квази-1D представлению левой и правой частей законов сохранения импульса, энергии и массы в виде мультипликативных корректи-

рующих коэффициентов, названных параметрами распределений (ПР), которые впервые были получены в гомогенном приближении А.А. Армандом (СССР) и уточнены N. Zuber (США), и факторов формы (ФФ), впервые предложенных в работах школы Б.С. Петухова и В.П. Попова (СССР, МЭИ — ИВТАН) для неизотермических однофазных потоков.

С физической и математической точек зрения ПР и ФФ представляют собой интегральные (осредненные в поперечном сечении канала) критерии влияния распределенных переменных: скорости, энтальпии и паросодержания, а также источников/стоков за счет генерации/конденсации, инерционных и массовых сил в ДНТП. Именно эти поправки к одномерной форме текущих моделей названных выше кодов, отвечая за оценку пространственной распределенности основных переменных, и определяют предложенную модель как квази-1D с более широкой областью применения и глубиной физических интерпретаций. Кроме того, они дают оценку дефектов импульса, энтальпии и массы для контрольных объемов нодализационной схемы, обеспечивая улучшение сходимости итераций и оценки эффективности k1D кода.

Достоверность результатов, полученных с помощью квази-1D методов, подтверждается их проверкой и сопоставлением с существующими альтернативными методами, включая анализ и выполнение «принципа соответствия», а также выводом канонических моделей и образцовых (бэнчмарк) решений. В частности, редукция обобщённых k1D соотношений к частным, известным из работ N. Zuber, M. Ishii, Б.С. Петухова — В.Н. Попова и других исследователей, подтвердила выполнение предельных переходов при асимптотическом вырождении влияния ПР и ФФ.

Научная и практическая значимость заключается в разработке единого физико-математически обоснованного метода перехода к более корректному одномерному описанию двухфазных потоков на основе обобщённых квази-1D аналитических моделей и замыкающих соотношений для ПР и ФФ, входящих в коэффициенты трения, тепло- и массообмена, с более широкой областью применения и возможностями снижения степени консервативности используемых одномерных методик и кодов. С их помощью выявлены закономерности комбинированного влияния нелинейных немонотонных распределений потоков импульса, тепла и массы на аномальное поведение трения и теплообмена, наблюдаемое в экспериментах при значительной негомогенности двухфазных потоков. Эти замыкающие соотношения построены в обобщённых переменных и обладают повышенной эвристической ценностью, что позволяет использовать их для прогнозирования теплогидравлических характеристик оборудования в тех областях, экспериментальное исследование которых в настоящее время невозможно или затруднено, например, при анализах теплогидравлики на различных стадиях аварий с потерей теплоносителя в ЯЭУ.

Заключение. Предложенный квази-1D метод содержит разрешение основного противоречия между необходимостью применения весьма трудоёмких и находящихся лишь на подступах к реализации для промышленных и проектных расчетов ДНТП 3D CFD кодов и, используемых в настоящее время, контурных и субканальных 1D кодов. При этом, квази-1D метод обеспечивает решение задачи модернизации исходных физико-математических моделей процессов переноса импульса, тепла и массы ДНТП, включая улучшение итерационных схем алгоритма решения, в том числе за счет повышения точности и диапазонов применимости коэффициентов трения, тепло- и массопереноса, что в итоге снижает излишнюю консервативность рекомендаций по результатам анализов теплогидравлической безопасности ЯЭУ.

Доклад подготовлен в рамках первого этапа инвестиционного проекта «Разработка квазиодномерной модели, расчетного кода и матрицы верификации для анализа теплогидравлических характеристик двухфазных неравновесных потоков в ТВС ВВЭР».

Разработка и верификация трёхмерной модели разрушения активной зоны — интегрального кода Евклид/V2

Бутов А. А., Климонов И. А., Кудашов И. Г., Сычева Т. В., Усов Э. В., Чухно В. И.

Новосибирский филиал Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
(НФ ИБРАЭ РАН), Новосибирск
ilya.klimonov@gmail.com

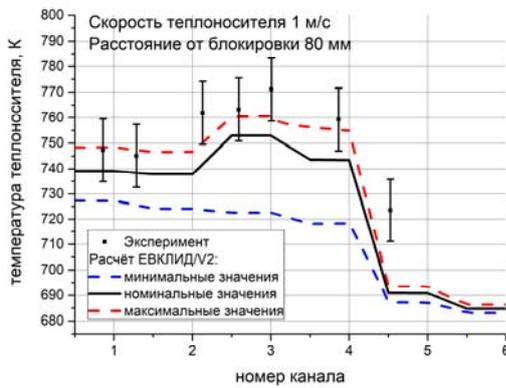
Ключевые слова: ЕВКЛИД/V2, KNS-loop, SCARABEE BE+3, 3D модель канала.

В рамках частного проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» в ИБРАЭ РАН в рамках кода HYDRA-IBRAE/LM, который входит в состав универсального интегрального кода ЕВКЛИД/V2, разрабатывается трехмерная модель гидравлического канала. Для верификации разработанной модели были проведены расчеты экспериментов NSK на 169-стержневой сборке, который был проведён на экспериментальной установке «Compact Sodium Boiling Loop» (KNS) в Kernforschungszentrum Karlsruhe, и эксперимента BE+3 на установке SCARABEE во Франции.

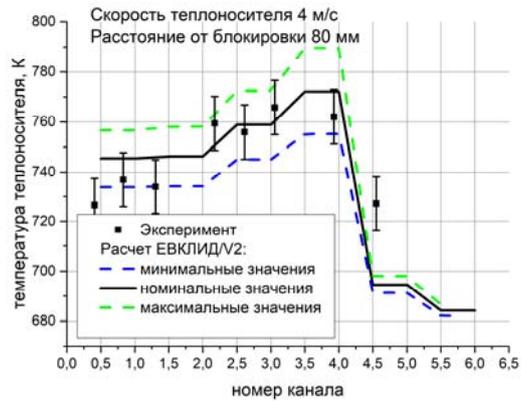
Течение натрия в 169-стержневой сборке с частичной блокировкой сечения (NSK). Способность кода ЕВКЛИД/V2 к расчету течения теплоносителя в сборках с блокировкой проверялась на тестах Huber и Pepler [0]. Эксперименты проводились в 169 стержневой сборке с дистанционирующими решетками. Параметры пучка нагревательных элементов соответствуют параметрам сборки реактора SNR-300 Mk1A. Блокировка составляла 49% от полного проходного сечения и находилась на расстоянии 40 мм от начала обогреваемой части канала. Из 169 стержней 91 соприкасались с блокировкой и только 88 являлись обогреваемыми. Энерговыделение в стержнях было равномерным. Тесты проводились при скоростях теплоносителя 1 и 4 м/с и тепловыми потоками 17,9 и 67,7 Вт/см² соответственно. Температура теплоносителя на входе в сборку — 677 К. Для моделирования эксперимента с помощью кода ЕВКЛИД/V2 была создана нодализационная схема, которая включала в себя двухмерную теплопроводящую структуру заданной длины и диаметра для моделирования твэлов и трехмерную модель канала. В базовой нодализации было заблокировано 4 радиальных зоны гидравлического канала, что соответствует 52 % от полной проходной площади. Был проведен анализ влияния неопределенности исходных данных на результаты моделирования. Результаты расчётов по распределению температуры теплоносителя по радиусу канала в сравнении с экспериментальными данными приведены на рисунке ниже. Видно, что расчетные результаты соответствуют экспериментальным данным с учетом погрешности эксперимента. Наибольшее влияние на результаты расчёта оказало варьирование коэффициентов трения и теплоотдачи в сборке, для варианта со скоростью теплоносителя 1 м/с также существенно влияет изменение температуры на входе в сборку.

Расчет эксперимента SCARABEE BE+3. Эксперимент SCARABEE BE+3 был проведён с использованием 37-стержневой сборки во Франции на экспериментальной установке SCARABEE в 1986 г. [0]. Эксперимент заключался в моделировании разрушения топливной сборки. Топливная часть твэла находилась между двумя бланкетами. Сборка из 37 твэлов окружена несколькими слоями, состоящими из стальных труб, газового и натриевого зазора. После достижения стационарных термогидравлических параметров эксперимент начинался с закрытия клапана на входе в тестовую сборку и удержании мощности реактора на постоянном значении. Закрытие клапана моделировало потерю расхода теплоносителя в тестовой сборке и увеличение скорости теплоносителя в натриевом зазоре. Эксперимент заканчивался отключением реактора после

разрушения второй и третьей трубы. Для указанного эксперимента была собрана нодализация схема, с помощью которой был проведен расчет эксперимента. Нодализация схема состоит из трехмерного канала, моделирующего экспериментальную сборку, цилиндрического канала для моделирования натриевого зазора и тепловых структур для моделирования чехла с защитными трубами и твэлов сборки. На входе каналов задается граничное условие по скорости в виде функции от времени, а на выходе — граничное условие по давлению с постоянным значением. Получено распределение температуры теплоносителя и оболочки твэлов по высоте. Видно хорошее согласие результатов расчета с экспериментальными данными. Среднеарифметическая погрешность определения температуры теплоносителя составила 9 К, а температуры оболочки 7,5 К.



а)



б)

Максимальные, минимальные и номинальные значения температуры на расстоянии 80 мм от блокады при скорости теплоносителя 1 м/с (а) и 4 м/с (б)

Список литературы

1. Huber F. and Pepler W. Summary and Implications of Out-of-pile Investigations of Local Cooling Distributions in LMFBR Subassembly Geometry under Single-phase and Boiling Conditions. – KfK 3927, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1985.
2. Kayser G., Charpenel J. and Jamond C. Summary of the SCARABEE-N subassembly melting and propagation tests with an application to a hypothetical total instantaneous blockage in a reactor // Nuclear Science and Engineering. — 1998. — Vol. 128. — P. 144–185.

Расчетный анализ одновременно возникающих запроектных аварий на энергоблоках № 3 и 4 БАЭС

**Анфимов А. М., Кирилов И. Н., Кузнецов Д. В.,
Никаноров О. Л., Саляев А. В.**

Акционерное общество «Опытно-конструкторское бюро машиностроения
им. И.И. Африкантова (АО «ОКБМ Африкантов»), Нижний Новгород
anfimov@okbm.nnov.ru

Ключевые слова: анализ безопасности, натрий, расчетные исследования, Белоярская атомная электростанция (БАЭС), многоблочная запроектная авария (ЗПА), энергоблок, быстрый натриевый (БН), сейсмическое воздействие, реакторная установка (РУ), бассейн охлаждения сборок (БОС), бассейн выдержки (БВ), радиационные последствия.

В настоящее время действующая эксплуатационная документация, регламентирующая действия персонала при запроектных авариях на АЭС, разработана в подходе, при котором аварии на энергоблоках рассматриваются независимо друг от друга. В свою очередь, в НП-001-15 говорится о том, что «планы мероприятий должны предусматривать меры на случай одновременного возникновения запроектных аварий на нескольких блоках АС и иных ОИАЭ, расположенных на площадке АС...». Данное требование определяет необходимость выполнения работ по обоснованию безопасности БАЭС при одновременно возникающих запроектных авариях на энергоблоках № 3 (БН-600) и № 4 (БН-800).

В докладе представлены результаты расчетного анализа одновременно возникающей запроектной аварии на энергоблоках № 3 и 4 БАЭС. Расчетные исследования выполнены с использованием кодов СОКРАТ-БН, ANSYS, ORIGEN2 и VIBROS 2.2.

Рассмотрена запроектная авария, вызванная сейсмическим воздействием интенсивностью 7 баллов по шкале MSK-64 (превышающее максимально разрешенное землетрясение (МРЗ) для площадки расположения энергоблока № 3 и соответствующее МРЗ для площадки расположения энергоблока № 4). В результате сейсмического воздействия на всех энергоблоках БАЭС происходят потери системного электроснабжения и дополнительные отказы основного оборудования, приводящие к возникновению ЗПА.

В докладе представлены результаты расчетных исследований многоблочной ЗПА в части РУ, БОС и БВ и оценка радиационных последствий.

Расчетно-аналитические исследования образования и накопления отложений в контуре с ТЖМТ в рамках согласованной модели протекания физико-химических процессов

Авдеенков А. В., Ачаковский О. И.

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

Ключевые слова: массоперенос, примеси, оксидная пленка, быстрый реактор, свинцовый теплоноситель, код MASKA-LM, выход железа, кислородный режим, насыщение.

Проанализирована инженерная модель для самосогласованного расчета роста оксидной пленки в циркуляционных контурах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем и концентраций примесей (кислород, железо, магнетит) с точки зрения возможной неопределенности в определении активности кислорода. Моделирование теплогидравлических и физико-химических процессов основано на решении связанных трехмерных уравнений гидродинамики, теплообмена, конвективно-диффузионного переноса и образования химически взаимодействующих компонентов примесей в объеме теплоносителя и на поверхности сталей.

Выход железа и образования магнетита обусловлен именно спецификой самосогласованных физико-химических процессов в оксидной пленке и на границе раздела сред.

Проведены модельные расчеты влияния неопределенности активности кислорода на скорость и интегральный выход железа, которое при заданных условиях кислородного режима после взаимодействия с кислородом обуславливает появления магнетита.

Разброс расчетных значений выхода железа существенным образом определяется точностью измерений активности кислорода и варьируется от нескольких десятков процентов до значений близких к ста процентам при неудовлетворительной калибровке датчика кислорода. Расчетные значения выхода железа из теплоносителя имеют такие же погрешности, как и толщина оксидной пленки, при заданных кислородном режиме и температуре.

Численно продемонстрировано, что температура существенным образом влияет на выход железа и может вызвать весьма неблагоприятные изменения в структуре стали из-за высокой интенсивности процесса.

Численно продемонстрировано, что в режиме насыщения существует модельно-независимая характеристика, которая определяется характерными для стали параболической константой и толщиной оксидной пленки.

Предложено простое модельное соотношение для оценки мощности массообменного аппарата. Так как на данный момент не существует достаточного количества данных о поведении магнетита в контуре (степень отложения, коагуляции, растворимости), моделирование позволяет сделать только расчетные оценки о скорости его появления и его интегральном количестве в контуре по выходу в контур железа.

Моделирование уноса капель в струйно-вихревом конденсаторе системы локализации аварий ВВЭР-440

Казанцев А. А., Супотницкая О. В., Сергеев Вл. В.

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

Ключевые слова: струйно-вихревой конденсатор, ВВЭР-440, АЭС, система локализации аварий, унос капель паром, гравитационное осаждение, код КУПОЛ-М, авария с течью теплоносителя, паро-воздушная смесь с каплями, гидрозатвор.

В работе представлены результаты расчетного моделирования работы струйно-вихревого конденсатора (СВК) системы локализации аварии. СВК предназначен для снижения давления в герметичных помещениях при разрыве первого контура на АЭС с ВВЭР-440. Важным вопросом при моделировании работы СВК является сохранение достаточного количества воды в гидрозатворе СВК после прохождения пика давления. Потеря воды и унос капель паровоздушным потоком в атмосферу прекращается, когда скорость уноса капель потоком становится ниже скорости гравитационного осаждения капель. Верификация модели работы струйно-вихревого конденсатора в составе кода КУПОЛ-М проведена на экспериментальных данных, полученных на стенде ВНИИАЭС. Получено хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных при сравнении уровней воды на стенде для начального и конечного состояний. Результаты расчетов подтвердили адекватность модели уноса капель потоком паровоздушной смеси при работе струйно-вихревого конденсатора, а также сохранность гидрозатвора при развитии аварии.

Особенности расчетного моделирования тепловых режимов бассейнов выдержки БиАЭС

Сергеев Вл. В.

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

Ключевые слова: бассейн выдержки (БВ), отработанное ядерное топливо (ОЯТ), отработанная тепловыделяющая сборка (ОТВС), реакторная установка (РУ), Билибинская атомная электростанция (БиАЭС), теплогидравлические отраслевые коды, изотопная кинетика, тепловые и влажностные режимы, теплообменник (ТО).

В связи с планируемым поэтапным выводом из эксплуатации трех действующих энергоблоков БиАЭС обоснование допустимых режимов хранения ОЯТ, технологических операций в бассейне выдержки (БВ) и прогнозирование динамики тепловых режимов приобретает большее значение. В настоящее время на БиАЭС эксплуатируются 4 бассейна. В частности, БВ № 2 с полной загрузкой 2200 ОТВС эксплуатируется 42 года и был переведен на сухое хранение через 11 лет от начала выгрузки ОЯТ.

Для решения данных задач необходимы соответствующие численные расчетные модели. С одной стороны, необходим ускоренный прогноз тепловых и влажностных режимов в БВ «мокрого» и сухого хранения с учетом возможных сценариев выгрузки ОТВС и работы принудительных (и пассивных) систем теплоотвода. Для условий «мокрого» хранения постоянная времени бассейна с массой воды 500 тонн составляет 5–10 суток (то есть БВ обладает высокой тепловой инерцией), что требует применения специального алгоритма численного решения для пространственно распределенной гидродинамической расчетной схемы бассейна.

В тоже время необходимы методики, позволяющие моделировать теплогидравлические процессы в БВ с учетом трехмерных эффектов. К ним относится захлаживание теплоносителя в придонной необогреваемой части бассейна, возможная конденсация атмосферной влаги в режиме сухого хранения на дне БВ с дополнительным тепловыделением от фазового перехода. При сухом хранении существенное влияние на тепловой режим оказывает пространственная схема организации вентиляции БВ.

Отдельное явление — возврат части водяного пара в результате испарения с зеркала БВ, уносимого воздухом в вытяжную вентиляцию обратно самотеком в бассейн в виде капель за счет конденсации в «холодных» коробах вентиляционной системы. В этом случае компенсирующая подпитка бассейна водой не зависит от температуры воды в БВ и не характеризует мощность, отводимую от бассейна на испарение.

Суммарная мощность остаточного тепловыделения ОТВС в заполненном БВ (проектной выгрузки в течение 10 лет) мала и составляет десятки киловатт. Соответственно, измеренная температура воздуха в бассейнах сухого хранения повторяет сезонные колебания температуры внешней атмосферы. Кроме того, бассейны БиАЭС расположены в одном реакторном цехе между рабочими (в настоящее время) энергоблоками. Таким образом, имеет место дополнительный подогрев бассейнов через его стены от соседних реакторов. После прекращения эксплуатации станции данная ситуация существенно изменится. Это касается и снижения влажности в реакторном зале и температуры воздуха, поступающего в БВ за счет работы вытяжной вентиляции.

Таким образом, прогнозирование тепловых и влажностных режимов в БВ БиАЭС представляется многопараметрической задачей, с зависимостью в равной степени как от текущей суммарной мощности ОТВС, так и от внешних условий.

В основе расчетных моделей теплового режима БВ лежит методика расчета мощности остаточного тепловыделения отдельной ОТВС.

В докладе показано, что на современном уровне для расчетного определения мощности остаточного тепловыделения отдельной ОТВС с известным выгоранием, степенью обогащения, видом топлива и времени выдержки в бассейне необходимо использовать численные коды изотопной кинетики. К ним относятся WIMS/D5B и ORIGEN-S. Последняя программа используется для расчета нуклидного состава и активности топлива в процессе выгорания и после окончания выгорания. Ее достоинством является большой список нуклидов (125 актиноидов и 879 нуклидов — продуктов деления), пополненный 110 изотопами элементов конструкционных материалов и продуктами их активации, для которых решаются уравнения выгорания.

В материале показано, что интегрирование по времени расчетной кривой остаточного тепловыделения отдельной ОТВС, полученной на основе отмеченного кода, с учетом эпизодической плановой догрузки бассейна «новыми» ОТВС в течение 10-летнего срока до полного заполнения приводит к характерной «пилообразной с затуханием» кривой динамики суммарной мощности тепловыделения БВ.

В докладе изложены особенности разработки быстродействующих численных расчетных моделей динамики тепловых режимов пассивного и принудительного теплоотвода от ОТВС в заполненном водой бассейне выдержки с учетом динамики заполнения бассейна ОТВС и варьируемом регламентом управления (алгоритмом) принудительными системами теплоотвода — жидкостным теплообменником и вытяжной вентиляцией. Модели предназначены для расчетов в составе отраслевых кодов международного уровня: RELAP-5-3D, TRAC, TRACE с 3D моделью пористого тела, а также отечественного КОРСАР.

Рассмотрена вспомогательная двухфазная трехмерная модель теплосъема с зеркала испарения БВ с учетом вентиляции на основе отраслевого кода в целях получения замыкающих соотношений — отводимой мощности с зеркала испарения, необходимой для применения разработанных моделей динамики БВ «мокрого» хранения. Основу модели испарения составляет закон подобия теплообменных и массообменных процессов (закон Льюиса) для генерации пара в сочетании с фактором конвективного уноса пара, циркулирующим над зеркалом воздуха.

На основе результатов измерений и расчетов показано, что в условиях «мокрого» хранения и работоспособности теплообменника (ТО) температура воды в БВ поддерживается в диапазоне заданных температурных уставок на запуск (до 60 °С) — останов ТО даже при непрерывной выгрузке всех 273 ОТВС одного реактора в течение 40 суток.

В докладе рассмотрены также особенности моделирования тепловых и влажностных режимов сухого бассейна хранения ОЯТ.

Представленный материал носит методический характер в области теплогидравлики.

Список литературы

1. Brian J. Decay Heat Calculations for PWR and BWR Assemblies Fueled with Uranium and Plutonium Mixed Oxide Fuel Using Scale. – Oak Ridge National Laboratory. 2011.
2. Spore J.W. TRAC-M/FORTRAN 90 (VERSION 3.0). THEORY MANUAL. – Los Alamos National Laboratory. 2000.

Расчет мощности прямотрубного парогенератора с жидкометаллическим теплоносителем

Блохина А. Н., Лякишев С. Л., Короткова О. В.

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

Ключевые слова: парогенератор, натриевый теплоноситель, неравномерность, расчет, расход теплоносителя, мощность.

При проектировании парогенераторов (ПГ) очень важной задачей является корректный расчет выходных параметров ПГ, в особенности мощности. При проектировании ПГ с жидкометаллическим теплоносителем, имеющих референтные решения, есть возможность использования в расчетных кодах фактических данных, полученных в ходе эксплуатации и с их помощью минимизировать расчетную погрешность. Иначе обстоят дела с расчетом новых ПГ, не имеющих референтных решений. Для таких установок необходимо проводить глубокий анализ факторов, влияющих на расчетные параметры, и учитывать такие параметры в расчетных кодах. Примером новой, не имеющей аналогов установки является корпусной парогенератор для перспективных реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим натриевым теплоносителем (БН).

Применение новых решений при проектировании парогенератора требует экспериментального и расчетного обоснования теплогидравлики как в стационарных, так и в переходных процессах с использованием современных расчетных кодов. Для расчета теплогидравлики корпусного ПГ с натриевым теплоносителем используется аттестованный расчетный код КОРСАР/ГП, дополненный подключенным программным модулем ПНГ-2К для расчета тракта натриевого теплоносителя.

Одним из допущений в модели расчета параметров по тракту теплоносителя парогенератора (межтрубное пространство) является равномерный профиль скорости теплоносителя по сечению трубного пучка. Также принимается, что через каждую теплообменную трубу проходит питательная вода с одинаковым расходом.

С другой стороны, расчетные исследования с помощью CFD кодов и эксперименты на аэродинамической модели крупномодульного ПГ показали наличие значительной неравномерности расхода теплоносителя по сечению межтрубного пространства, которая не учитывается при теплогидравлических расчетах.

В докладе приведена методика учета известного неравномерного профиля потока теплоносителя по сечению межтрубного пространства при расчете ПГ с жидкометаллическим теплоносителем с использованием кода КОРСАР/ГП с программным модулем ПНГ-2К, а также проведен анализ влияния неравномерности расхода теплоносителя по сечению трубного пучка на мощность парогенератора. На основании полученных результатов предложены меры по повышению мощности и надежности парогенератора.

Валидация кодов КОРСАР/ГП и СОКРАТ/В1 для условий потери охлаждения бассейна выдержки отработанного ядерного топлива

Бедретдинов М. М., Степанов О. Е.

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск
bedretdinov2013@yandex.ru

Ключевые слова: атомная электрическая станция (АЭС), бассейн выдержки (БВ), водородной энергетический реактор (ВВЭР), отработавшее ядерное топливо (ОЯТ), тепло-выделяющая сборка (ТВС).

ОЯТ продолжает выделять остаточное тепло еще на протяжении многих лет после извлечения из реактора, поэтому его располагают в БВ для длительного отвода остаточных тепловыделений.

В случае отказа системы охлаждения скорость разогрева объема воды в БВ до температуры насыщения зависит от мощности остаточного тепловыделения отработавшего топлива и объема воды.

Для обоснования безопасности хранения ОЯТ в БВ в режимах нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, проектных аварий, а также разработки противоаварийных инструкций по действию персонала в случае проектных аварий и по управлению запроектными авариями используются теплогидравлические компьютерные коды. Согласно действующим нормативным документам РФ коды, используемые при обосновании безопасности АЭС, должны быть установленным образом верифицированы (валидированы) и аттестованы Ростехнадзором.

Проводились эксперименты по выкипанию теплоносителя в сборке стержней ADELA-2 и ALADIN, выполненные в 2013 г. и 2018 г. соответственно, на кафедре водородной и ядерной энергии Энергетического института Дрезденского технического университета. Эксперименты проведены для ТВС типа ВWR при мощностях каждого из стержней 20, 50, 70 и 100 Вт, для того чтобы суммарная мощность стержней в эксперименте соответствовала разным мощностям остаточного энерговыделения отработавшего ядерного топлива моделируя различное время выдержки. Это приблизительно эквивалентно времени выдержки ОЯТ реактора типа ВВЭР-1000 от полутора лет до одного месяца соответственно.

В ходе работы были смоделированы экспериментальные установки ADELA-2 и ALADIN с помощью теплогидравлических кодов КОРСАР и СОКРАТ, проведена оценка влияния степени пространственной дискретизации на результаты расчетов, которая говорит о том, что результаты расчетных данных достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментальных данных.

Сравнительные данные показывают хорошее согласование расчетов с экспериментами по моменту начала оголения стержней и по максимальной температуре. При этом результаты, полученные с применением кодов, демонстрируют тенденцию к направлению отклонений в консервативную сторону, то есть в большинстве случаев дают занижение момента оголения по сравнению с экспериментами.

Также был выявлен эффект преждевременного оголения менее напряженных ТВС по сравнению с более напряженными при одном и том же массовом уровне в кассетах, что находит качественное подтверждение также и результатами расчетов. Этот эффект необходимо учитывать при анализе безопасности в аварийных режимах с отказом системы охлаждения БВ. На основе сравнения с экспериментальными данными определены параметры расчетных моделей для получения наиболее точных результатов.

Расчет параметров газовой среды в контейнменте АЭС с учетом полного адиабатического сгорания водорода кодом КУПОЛ-М

Кругликов Ю. С., Супотницкая О. В., Янцева Л. М.

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

Ключевые слова: водород, горение, АЭС, водородная безопасность, код КУПОЛ-М, контейнмент, полное адиабатическое сгорание, АИСС.

При проведении анализа водородной безопасности АЭС важным фактором является учет воздействия возможного сгорания водорода на параметры среды в атмосфере контейнмента. С целью оценки этого эффекта была разработана и внедрена в контейнментный код КУПОЛ-М модель полного адиабатического сгорания водорода. Данная модель проста, консервативна и основана на законах сохранения массы и энергии. В работе представлены результаты тестирования этой модели на экспериментальных данных. Наблюдается хорошее совпадение данных расчетов и экспериментов в большом диапазоне концентраций водорода в газовых смесях. По результатам проведенных тестов можно судить о том, что реализация модели полного адиабатического сгорания водорода в коде КУПОЛ-М позволяет консервативно оценить параметры атмосферы в контейнменте без значительного увеличения времени расчета.

Об анализе чувствительности результатов тепловых расчетов ТУК к неопределенностям в исходных данных при использовании ANSYS

Курындин А. В., Киркин А. М., Каримов А. З., Карякин М. Ю.

Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), Москва,
karimov@secnrs.ru

Ключевые слова: анализ чувствительности, погрешность, неопределенность, моделирование, ANSYS, тепловой расчет, ТУК, ОТВС.

В настоящее время в Российской Федерации на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР обновляется парк транспортных упаковочных комплектов (далее — ТУК), применяемых для осуществления межобъектовых перевозок отработавших тепловыделяющих сборок (далее — ОТВС). Новые ТУК обладают большей вместимостью и должны обеспечивать безопасную перевозку ОТВС с глубиной выгорания до 70 МВт·сут/кгU, что обуславливает высокое тепловыделение в ТУК. При сохранении габаритных и присоединительных размеров новых ТУК с целью обеспечения совместимости с существующей инфраструктурой и оборудованием на ОИАЭ температурные режимы конструктивных элементов ТУК вплотную приближаются к ограничениям, устанавливаемым нормативной и эксплуатационной документацией.

В этой связи при расчетном обосновании температурных режимов конструктивных элементов ТУК необходимо особое внимание уделять оценке погрешности получаемых результатов, обусловленной неопределенностью исходных данных. Проведение такой оценки особенно актуально и важно с учетом того, что при аттестации программных средств зачастую констатируется недостаточность представляемых в верификационных отчетах обоснований методик оценки погрешностей и неопределенностей расчетных результатов, получаемых с использованием данных программных средств.

В настоящем докладе показаны применяемые в ФБУ «НТЦ ЯРБ» методы и подходы к оценке влияния неопределенностей исходных данных на получаемые с использованием программного средства ANSYS результаты расчетов температурных режимов ТУК с ОТВС реакторов типа ВВЭР.

Расчетное исследование фильтрующих аппаратов на постоянных магнитах применительно к контурам водо-водяных реакторных установок

Мамаев А. В., Рязанов Р. Р., Соборнов А. Е., Котин А. В., Треушников М. В.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(ФГБОУВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), Нижний Новгород,
aleks_may@mail.ru

Ключевые слова: магнитная фильтрация, магнитная сила, магнитное поле, поле скорости, закрутка потока, реакторная установка, атомная энергетика, неодимовый магнит, ферритовый магнит, вычислительная гидродинамика, конечно-элементный анализ.

В тепловой и атомной энергетике требования к чистоте рабочих сред очень высоки. Особенности технологического процесса накладывают ограничения на предельно допустимые концентрации примесей в контурах энергетических установок. Для установок с водным теплоносителем, в силу замкнутости контуров, доминирующей фракцией по сравнению с естественными примесями являются продукты окисления конструкционных материалов, образующихся в результате протекающих в элементах оборудования коррозионных процессов. Непрерывное нарастание концентрации соединений железа приводит к их осаждению на теплопередающих поверхностях, что является причиной ухудшения теплопередачи, увеличения температуры теплообменных стенок сверх допустимой и в конечном итоге приводит к пережогам, разрывам труб, аварийным остановкам оборудования. Таким образом, проблема поддержания требуемой чистоты рабочих сред и теплообменных поверхностей в контурах и теплообменном оборудовании энергетических установок является актуальной.

Перспективным направлением очистки рабочих сред от железосодержащих примесей является применение магнитной фильтрации в очистных аппаратах. Фильтры, основанные на действии постоянных магнитов, имеют ряд преимуществ по сравнению с электромагнитными: лучшие массо- и габаритные характеристики, простота конструкции, отсутствие источника питания, элементов коммутации и защиты, электропроводки. Возможность использования постоянных магнитов в агрессивных средах и взрывопожароопасных помещениях особенно актуальна в отношении применения фильтров в контурах энергетических установок. Основным недостатком таких систем — сравнительно низкая напряженность магнитного поля в зоне захвата частиц, что в определенной мере сдерживает их широкое, а главное, эффективное применение. Устранение данного недостатка может быть достигнуто совместным применением магнитных и механических фильтрующих элементов, а также гидродинамических эффектов, за счет профилирования проточных частей фильтров, что требует конструктивной проработки рабочей зоны фильтра.

Для повышения эффективности магнитной фильтрации и расширения области применения фильтров, имеющих в своем составе постоянные магниты, научной группой лаборатории «Парогенерирующие системы» кафедры «Атомные и тепловые станции» НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработана уникальная конструкция магнитно-гидродинамического фильтра. Разработка конструкции фильтра проводилась на основании использования методов конечно-элементного анализа, реализованных в современных программных комплексах (ПК). Были решены следующие задачи:

– смоделировано магнитное поле неодимового и ферритового магнита в среде ПК ANSYS Maxwell для количественного анализа сил, действующих на ферромагнитные частицы в потоке жидкости;

– определены гидравлические характеристики фильтра и траектории движения частицы в расчетной области с использованием ПК Ansys Fluent.

Расчет магнитной силы произведен для частицы, расположенной на разных расстояниях от оси магнита. Выбор геометрических и физических характеристик расчетных моделей, а также размеры частиц продиктован предварительными экспериментальными исследованиями. В расчете использовалась тетраэдрическая сеточная модель, сгенерированная автоматическим методом. В области, где расположена частица, произведено сгущение сетки с целью повышения качества разрешения протекающих физических процессов. На основании полученного в результате расчета значения магнитной силы подтверждена возможность использования постоянных магнитов для фильтрации жидкости при достаточно больших скоростях потока.

Получение гидравлических характеристик и траекторий движения частиц в проточной части производилось на основании Computational Fluid Dynamics (CFD) анализа. Сложное течение в проточной части фильтра предполагает образование большого количества вихрей и, как результат, сильную кривизну линий тока. Поэтому для решения данной задачи была выбрана Reynolds Stress Model (RSM) — модель напряжений Рейнольдса. Данная модель позволяет учесть неізотропное распределение турбулентной вязкости течения. Расчет выполнялся на гексаэдрической сетке с призматическими слоями. В результате исследования получено поле скорости в проточной части и гидравлическое сопротивление фильтра. Анализ поля скорости позволил выделить застойную зону, характеризующуюся максимальным воздействием магнитного поля на частицы.

Получение траекторий осуществлялось на основании моделирования двухфазного потока в отсутствие магнитного поля с использованием DPM (Discrete Phase Model) модели, позволяющей рассчитать течение твердых частиц в потоке жидкости. Траектории большинства частиц сконцентрированы внутри расчетной области, что обусловлено закруткой потока в проточной части фильтра.

На основании предварительных экспериментальных исследований и результатов численного моделирования разработана конструкция магнито-гидродинамического фильтра. Она предусматривает наличие образованных за счет закрутки потока рабочей среды застойных областей, обеспечивающих эффективное удержание частиц в магнитном поле. Получен патент на полезную модель № 197879 «Магнито-гидродинамический фильтр».

СЕКЦИЯ 6.

Датчики, системы контроля и оборудование для реакторных установок

Технология ТПТС для построения систем любого класса безопасности

Артемьев К. П., Гриценко С. Ю.

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский
научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»), Москва*
k.p.artemev@vniia.ru

Ключевые слова: АСУ ТП, ТПТС, ВНИИА, ТПТС-СБ, ТПТС-НТ, СКУ, УСБ, КСА, ГЭЗ.

Уроки, извлеченные после аварии на АЭС Фукусима-Даичи, повлияли на взгляды мирового сообщества по обеспечению адекватного уровня ядерной безопасности, что нашло отражение в ужесточении международных нормативных документов. Это ужесточение коснулось как требований к подходам по проектированию систем контроля и управления (СКУ), так и непосредственно к оборудованию. Появились более строгие требования к глубокоэшелонированной защите в части независимости уровней и стратегии преодоления отказов по общей причине в оборудовании системы безопасности.

В докладе представлены особенности и основные характеристики комплекса средств автоматизации ТПТС производства Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»), применение которого обеспечивает построение современной надежной СКУ АЭС, отвечающей всем современным международным требованиям, включая защиту от отказа по общей причине, в том числе и в программном обеспечении. На данный момент КСА ТПТС применяется во всех проектах АЭС российского дизайна.

Современная АСУ ТП АЭС состоит из достаточно большого числа подсистем. ФГУП «ВНИИА» является разработчиком и изготовителем оборудования для наиболее крупных частей АСУ ТП:

- управляющих система безопасности (УСБ);
- систем нормальной эксплуатации, включая важные для безопасности;
- специфических систем управления турбогенератором;
- систем управления электротехническим оборудованием;
- прочих вспомогательных систем АЭС.

ФГУП «ВНИИА» занимается разработкой аппаратуры АСУ ТП более 25 лет, и за это время АСУ ТП, построенные на базе ТПТС, хорошо зарекомендовали себя в России и за рубежом более чем на 10 энергоблоках атомных электростанций, 30 энергоблоках тепловых электростанций, объектах нефтегазового сектора и предприятиях промышленности.

На сегодняшний день все АЭС, вновь строящиеся в России и по российским проектам за рубежом, оснащаются АСУ ТП на базе платформ ТПТС-НТ (для построения

СКУ нормальной эксплуатации) и ТПТС-СБ (для построения систем безопасности). Комбинация данных платформ создает органичную АСУ ТП с эффективной реализацией защиты в глубину.

Платформа ТПТС-НТ обладает характеристиками, позволяющими выполнить все задачи нормальной эксплуатации (включая режимы отклонения от нормальной эксплуатации) уровня низовой автоматики, пользовательские алгоритмы любой сложности. Гибкость конфигурации ТПТС-НТ обеспечивает построение интегрированной СКУ с территориальным распределением по объекту автоматизации.

Платформа ТПТС-СБ, разработанная специально для построения систем безопасности, обладает внутренним аппаратно-программным разнообразием, что позволяет обеспечить достаточную степень устойчивости к отказам по общей причине. Примененные технические решения в ТПТС-СБ обеспечивают реализацию всех основных подходов к проектированию УСБ АЭС (таких как независимость, разделение, резервирование и разнообразие). Особое внимание уделено разработке программного обеспечения: процесс верификации и валидации на каждом этапе разработки ПО, отсутствие операционных систем и прерываний, строгая цикличность и отсутствие условных переходов, определенные требования к коммуникациям и т. д. Это позволило обеспечить принцип детерминизма в УСБ, выполненной на ТПТС-СБ.

В аспекте стратегии разнообразия, оборудованием ТПТС-СБ реализуются разнообразие аппаратного и программного обеспечения, а также человеческое разнообразие (при разработке). Также пользователем (проектировщиком) возможна реализация проектного, функционального и сигнального разнообразия. Практическая реализация принципа разнообразия в оборудовании ТПТС-СБ заключается в использовании двух независимых аппаратно-различных комплектов оборудования для разных диверситетов и, как следствие, обеспечивается программное разнообразие.

Реализация обозначенных подходов и архитектура модулей ТПТС-СБ позволяет интегрировать функции нормальной эксплуатации важной для безопасности (НЭ ВБ) и системы безопасности (СБ). Интеграция заключается в реализации следующих подходов:

- исполнительные механизмы системы безопасности управляются системой нормальной эксплуатации, важной для безопасности, в случае отсутствия аварии и управляются от УСБ в случае обнаружения аварии;
- измерения технологических параметров процесса должны быть доступны для функций нормальной эксплуатации (например, для предупредительных защит или передачи в СВБУ).

Данный подход обеспечивает возможность обнаружения, локализации и устранения ООП на ранних стадиях его возникновения. Это достигается путем сравнения результатов работы обоих диверситетов в НЭ ВБ.

Для разработки прикладного программного обеспечения в ТПТС используется мощная САПР GET-R1c графическим языком программирования, которая обеспечивает: сквозное проектирование (от разработки технологического задания до загрузки прикладного ПО в оборудование), моделирование на различных этапах проектирования, верификацию и валидацию на каждом этапе.

Использование оборудования ТПТС-СБ совместно с оборудованием ТПТС-НТ обеспечивает унификацию оборудования и, в результате, простую и надежную эксплуатацию оборудования. Применение ТПТС-СБ в УСБ и ТПТС-НТ в СКУ нормальной эксплуатации позволяет создать гармонизированную АСУ ТП АЭС с оптимизированными связями между уровнями глубоководной защиты с выполнением требований по независимости и разделению.

Система охлаждения импульсного реактора периодического действия

Грибачёва В. А., Щербаков С. И.

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

Ключевые слова: импульсный реактор, система охлаждения, воздушный теплообменник, распределение температур.

В работе для имеющегося проектного варианта импульсного реактора периодического действия (ИРПД) со средней мощностью 15 МВт оценены параметры системы охлаждения. Основные требования, предъявляемые к системе охлаждения ИРПД: компактность; трубопроводы расположены с одной стороны; малые энергозатраты от посторонних источников; работа в условиях частого отключения; сокращение объёма оборудования, подвергающегося пульсации температур.

Предложена двухконтурная система с общим сливным баком, независимой циркуляцией по контурам и высокотемпературным воздушным теплообменником (рис. 1).

Предварительными расчётами определены оптимальные подогревы в реакторе, расходы теплоносителя, температурные уровни. Выбраны размеры трубопроводов контуров, оценён объём сливного бака, рассчитаны мощности литиевых насосов. Оценены параметры и режимы работы воздушного контура и выбраны размеры теплообменника. Выбранные параметры приведены в таблице.

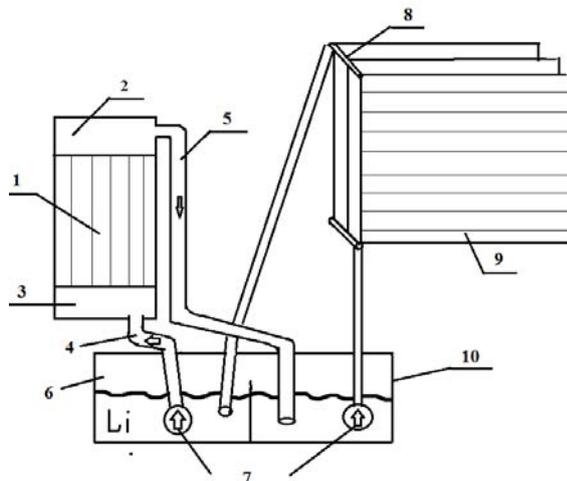


Рис. 1. Принципиальная схема системы охлаждения ИРПД:

- 1 – активная зона; 2, 3 – коллекторы первого контура; 4, 5 – трубопроводы;
- 6 – газовая полость; 7 – насосы;
- 8 – коллекторы второго контура;
- 9 – секции теплообменника;
- 10 – сливной бак

Параметр	Значение	Параметр	Значение
T_{min} лития, °С	250	Трубопроводы, Ду	120
Подогрев, °С	250	Скорость в трубопроводах, м/с	3,8
Расход 1 контура, л/с	30	Потери в трубопроводах, Па	36605
Скорость лития в а.з., м/с	4,48	Работа насоса 2 контура, кВт	1,1
Перепад давления в а.з., атм	2,561	Подогрев воздуха, °С	100
Работа насоса 1 контура, кВт	7,69	Расход воздуха, м ³ /с	150
Количество панелей ВТО	100	Скорость воздуха, м/с	10
Высота панели ВТО, м	1,08	Живое сечение ВТО, м ²	14,94
Длина панели l , м	5	Кoeff. теплоотдачи, Вт/м ² ·°С	34,21
Число труб в панели	10	Поверхность теплообмена, м ²	1470
Трубки ВТО, \varnothing , мм	8	Мощность насоса, кВт	9,2

Проведены численные расчётные исследования теплогидравлических характеристик в квазистационарных и импульсных режимах работы ИРПД. Для численных расчётов используется 2D код TURBOFLOW.

Расчётами определены температурный режим в контурах в зависимости от расхода воздуха, размеров теплообменника, способа циркуляции воздуха и мощности реактора.

При номинальной мощности реактора и расходах принудительной циркуляции воздуха 120–180 м³/с максимальная температура на выходе из реактора снижается с 590 до 450 °С. Номинальный расход воздуха принят 150 м³/с. При различных размерах ВТО (от 4 до 6 м) эффективность теплообменника не изменяется из-за увеличения коэффициента теплоотдачи при уменьшении скорости воздуха.

Определены условия не замерзания лития. Минимальная мощность перехода с принудительной на естественную циркуляцию (ЕЦ) — 1,25 МВт. Максимально допустимая мощность в режиме ЕЦ — 3,05 МВт (температура на выходе из реактора 500 °С). Минимальная мощность ЕЦ составляет 0,85 МВт.

В периодических импульсных режимах установки резко меняются температуры теплоносителя в контурах во времени. Тепловыделение имеет следующий характер. Постоянная, фоновая мощность 7,5 МВт, раз в десять секунд происходит импульс с энерговыделением 75 МДж.

Расчёты выполнены при различных расходах через а.з. и ВТО. Типичный результат показан на рис. 2. Длительность температурного импульса на выходе из реактора составляет 4 секунды, что существенно больше длительности импульса мощности. Максимальный импульсный подогрев теплоносителя на выходе из реактора 500 °С. Перемешивание в горячей части сливного бака стабилизирует температуру на входе в ВТО (пульсации температур не превышают 20 °С).

Существенный вклад в температурный режим вносит работа сливного бака.

При большем расходе в а.з. теплоноситель переливается в холодную часть бака и повышает температуру на входе в реактор на 25–30 °С. Температура на выходе из реактора и амплитуда импульса остаются постоянными (300 °С). Пульсации температуры на входе в ВТО составляют 16–25 °С.

При большем расходе через ВТО повышается уровень в холодной части бака, снижается температура на входе в ВТО. Амплитуда пульсации температуры на выходе из реактора не изменяется и составляет 300 °С. Общий уровень температур в контурах снижается при увеличении расхода лития через ВТО.

По результат расчёта преимущественно пользуются режимы с расходом лития в ВТО больше, чем в а.з. В этом случае меньше температуры пульсаций и меньше температура в горячем баке.

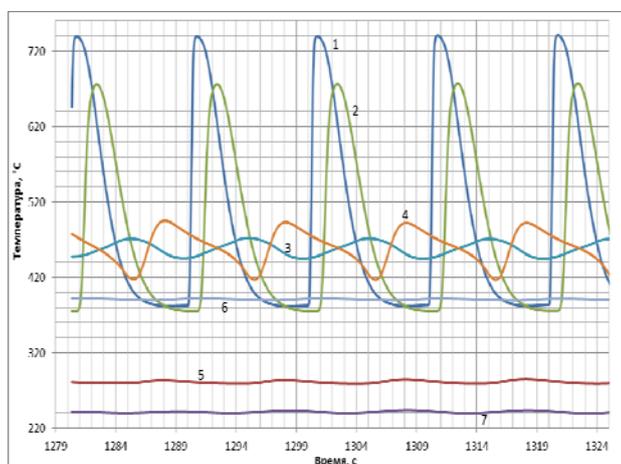


Рис. 2. Типичное изменение температур лития во времени:

1 — температура в а.з.; 2 — температура на выходе из реактора; 3 — температура на входе в ВТО; 4 — температура в горячей части бака; 5 — температура на входе в реактор; 6 — температура в холодной части бака; 7 — температура на выходе из ВТО

Аттестация датчика контроля термодинамической активности кислорода в расплаве свинца для реакторных установок в качестве средства измерения утвержденного типа

**Садовничий Р. П., Скоморохов А. Н., Асхадулин Р. Ш., Левченко В. М.,
Лунина С. В., Легких А. Ю.**

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

Ключевые слова: термодинамическая активность кислорода, твердый электролит, контроль, свинец, свинец-висмут, датчик, диапазон измерений, точность, аттестация, эталон.

В АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» активно ведутся разработки датчиков на твёрдых электролитах для контроля термодинамической активности (ТДА) кислорода в расплавах свинца и свинца-висмута не только для исследовательских стендов, но и для перспективных реакторных установок на быстрых нейтронах с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями. Создание датчиков контроля ТДА кислорода для реакторных установок выдвигает повышенные требования к надежности конструкции и точности измерений, что потребовало выполнения значительного комплекса исследований и разработки специальной эталонной поверочной установки для воспроизведения ТДА кислорода в расплаве свинца в диапазоне от 10^{-6} до 1 с заданной точностью (эталона ТДА кислорода в расплаве свинца).

На сегодняшний день в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» разработан и аттестован единственный в мире эталон единицы ТДА кислорода в расплаве свинца с погрешностью воспроизведения ТДА до 2 с помощью пароводородных смесей. На данной установке был проведен комплекс работ по определению точности измерений образца датчика контроля ТДА кислорода для реакторных установок. В 2020 году датчик для реакторных установок был аттестован как средство измерения с погрешностью измерения ТДА кислорода 15%.

Опыт использования газовых датчиков ТДА кислорода в экспериментах по испытаниям конструкционных сталей в ТЖМТ

Ниязов С-А. С., Чепоров Р. Ю., Иванов К. Д., 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: жидкий металл, свинец, свинец-висмут, газовая фаза, датчик термодинамической активности кислорода.

Идея использовать в защитном газе реакторных установок с ТЖМТ газовые датчики кислорода и водорода на основе твердоэлектrolитной кислородопроводящей керамики возникла практически сразу после создания работоспособных конструкций таких датчиков. В настоящее время данные газовые датчики вошли в технические проекты реакторных установок БРЕСТ ОД-300 (датчик водорода) и СВБР-100 (датчики кислорода и водорода).

Однако, что касается практического использования газовых датчиков в системе ТЖМТ — защитный газ, то в условиях циркуляционных контуров к настоящему времени имели место только единичные случаи их применения. Более существенный опыт получен в условиях статических экспериментальных установок для исследования образцов конструкционных сталей в ТЖМТ.

При этом контроль защитного газа осуществлялся как на входе в реакционную ёмкость установки, так и на выходе защитного газа из неё. Такая схема циркуляции защитного газа обеспечивала доставку газообразного кислорода к жидкометаллическому расплаву, образование на его поверхности твердой фазы оксидов теплоносителя, её растворение и за счет конвективного движения расплава поступление кислорода к образцам исследуемой стали и датчикам ТДА кислорода, расположенным в нижней части тигля. Методика проводимых испытаний состояла в экспозиции данных образцов в течение заданного времени и при заданной температуре расплава в требуемом интервале изменения ТДА кислорода, которая поддерживалась периодическим введением в газовую систему установки дозированного количества воздуха.

В целом реализованная в экспериментах схема испытаний сталей, за исключением масштабного фактора, качественно соответствует условиям стендовых испытаний. А именно: в теплоносителе имеется относительно небольшой (~ 10–15 °С) перепад температур, обеспечивающий его циркуляцию и доставку растворенного кислорода к образцам исследуемой стали. Это позволяет накопленный в данных установках опыт использования газовых датчиков распространять и на более сложные системы, в том числе и на газовые системы реакторных установок с ТЖМТ.

В докладе рассмотрены основные результаты использования газовых датчиков кислорода при испытаниях конструкционных сталей в ТЖМТ. При этом продемонстрирована их полезность как источников дополнительной информации о процессах массопереноса в системе защитный газ — ТЖМТ:

- при проведении режимов водородной очистки теплоносителя;
- при поддержании кислородного режима теплоносителя с использованием газообразного кислорода.

Выявлены особенности применения газовых датчиков ТДА кислорода в защитном газе установок с ТЖМТ и разработаны конкретные рекомендации по их практическому использованию в этих условиях.

Повышение тепловой мощности парогенератора для перспективных РУ с ВВЭР

Короткова О. В., Лякишев С. Л., Блохина А. Н.

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

Ключевые слова: парогенератор, тепловая мощность, ВВЭР, теплообменные трубы.

С целью повышения тепловой мощности парогенератора для перспективных РУ с ВВЭР был разработан горизонтальный парогенератор ПГВ-1К с одним коллектором теплоносителя. Данный парогенератор обладает улучшенными характеристиками и предназначен для работы в составе двухпетлевой РУ с ВВЭР.

ПГВ-1К имеет удвоенную тепловую мощность по сравнению с действующим парогенератором ПГВ-1000МКП на АЭС с ВВЭР, максимальную наполняемость теплообменными трубами, плотную компоновку РУ под защитной оболочкой и удобное обслуживание.

Горизонтальный парогенератор ПГВ-1К позволяет повысить безопасность РУ за счет исключения аварий с большой течью теплоносителя из первого контура во второй, а также за счет улучшенной работы данного парогенератора в режиме естественной циркуляции теплоносителя.

Парогенератор ПГВ-1К позволяет снизить массу парогенераторов в составе РУ более чем на 30%, уменьшить размеры защитной оболочки, а также сократить сроки строительства, что приведет к заметному удешевлению АЭС в целом.

Гидравлика газлифтного зонда со свинцовым теплоносителем

Верещагина Т. Н.¹, Лемехов В. В.², Моркин М. С.²

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

² Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалея», Москва

Ключевые слова: газлифт, свинцовый теплоноситель, двухфазный поток, газосодержание, приведенная скорость, размеры пузырьков, скорость всплытия, расход, межфазная поверхность.

Явление газлифта широко применяется в различных технических устройствах. Применение газлифтных устройств также активно обсуждается применительно к ядерным, в том числе к ускорительно управляемым, реакторам с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

Ключевым вопросом проектирования газлифтных устройств является расчет расхода жидкости, вызванного подачей газа. Сложность расчета заключается в том, что расход теплоносителя, вызванный заданным расходом газа, зависит от структуры двухфазного потока и гидравлических потерь в контуре циркуляции, которые, в свою очередь, зависят от расходов теплоносителя и газа.

В докладе обсуждается работа газлифтного зонда системы контроля герметичности оболочек твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300. Проблема построения расчетной модели для ГЛЗ со свинцовым теплоносителем состоит в том, что далеко не все необходимые зависимости изучены для жидких металлов. Представлена методика расчета гидравлики теплоносителя в газлифтном зонде, в которой использованы некоторые результаты исследований на прозрачных жидкостях. Методика верифицирована по результатам выполненных в НИКИЭТ стендовых испытаний макета газлифтного зонда. В результате расчетов показано, что потери давления непосредственно в подъемном тракте макета газлифтного зонда почти на порядок ниже суммарных потерь давления в циркуляционном контуре стенда.

По разработанной методике выполнены расчеты прогнозируемого расхода теплоносителя в газлифтном зонде системы контроля герметичности оболочек твэлов в условиях реактора. Прогнозируемый расход теплоносителя более чем в три раза превышает расход, полученный при испытаниях макета зонда на стенде НИКИЭТ при том же расходе газа. Это связано с различием контуров циркуляции теплоносителя в условиях реактора и при стендовых испытаниях. Потери же давления непосредственно в подъемном тракте газлифтного зонда на порядок ниже, чем в циркуляционном контуре стенда.

Существенное увеличение прогнозируемого расхода в штатном газлифтном зонде привело к заметному снижению объемного газосодержания, сокращению времени всплытия пузырьков газа и к снижению площади межфазной поверхности в реакторных условиях по сравнению с результатами, полученными при испытаниях макета зонда. Однако, несмотря на снижение среднего газосодержания почти в 2 раза, рост расхода теплоносителя через газлифтный зонд в реакторных условиях привел к уменьшению размеров пузырьков и, в итоге, площадь межфазной поверхности снизилась менее чем на 30% по сравнению с результатами стендовых испытаний макета.

Оценка чувствительности газлифтного зонда в системе контроля герметичности оболочек твэлов по модели растворения/дегазации газообразных продуктов деления в свинцовом теплоносителе

Гончар Н. И.¹, Моркин М. С.²

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

² Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалы», Москва

Ключевые слова: жидкометаллический теплоноситель, система контроля герметичности оболочек твэлов, газообразные продукты деления, газлифтный зонд, перенос газообразной активности, модель растворения/дегазации, открытая поверхность топлива, оценка чувствительности.

Контроль герметичности оболочек твэлов (КГО) осуществляют как на работающем, так и на остановленном реакторе. Физический принцип контроля в рабочих условиях – рост активности продуктов деления в средах первого контура при разгерметизации твэла и увеличение плотности потока запаздывающих нейтронов в теплоносителе на стадии разрушения оболочки. Способы реализации контроля для конкретной РУ выбирают с учётом её особенностей.

Контроль герметичности оболочек твэлов РУ с ЖМТ выполняют измерением активности газообразных продуктов деления в средах первого контура. Основные задачи — диагностировать приближение РУ к пределу безопасной эксплуатации (ПБЭ) по количеству негерметичных твэлов и определить область расположения наиболее повреждённых ТВС.

Для РУ с ТЖМТ приближение к ПБЭ оценивают по объёмной активности газообразных продуктов деления (ГПД) в защитном газе первого контура. Рост средней удельной активности ГПД в теплоносителе указывает на наличие негерметичных твэлов, но не позволяет определить место их расположения. Для этого нужен локальный контроль активности ГПД в теплоносителе на выходе из активной зоны.

В перспективной РУ, охлаждаемой свинцом, контроль активности инертных газов в теплоносителе по секторам активной зоны РУ выполняет специальная подсистема КГО, основным элементом которой является газлифтный зонд (ГЛЗ) [1].

Зонд предназначен для транспортировки ГПД от выхода из активной зоны до измерительной ёмкости, оснащённой гамма-спектрометрическим устройством. Он представляет собой коаксиальную трубу, погружённую в теплоноситель. По внутренней трубке подаётся газ-носитель под давлением, достаточным для образования пузырьков на её нижнем конце. Вход теплоносителя в ГЛЗ расположен на небольшом расстоянии от выхода из ТВС. Принцип работы зонда основан на эффекте газлифта – подъёме жидкости за счёт подаваемого в неё газа. Растворённые в теплоносителе ГПД диффундируют внутрь пузырей и выносятся ими к поверхности раздела фаз в сепарационной полости. В качестве газа-носителя используют защитный газ из газовой системы первого контура (аргон). Если в ТВС есть негерметичные твэлы, поступление ГПД в проходящий через неё теплоноситель будет больше, чем в среднем по активной зоне, а удельная активность на выходе из ТВС выше средней по контуру. Прокачиваемый через теплоноситель газ обогащается ГПД и в конце барботажного тракта выходит в сепарационную полость, откуда по трубке подъёма газа поступает в измерительную ём-

кость. Чем больше негерметичных твэлов, чем крупнее их дефекты и чем ближе выход из дефектной ТВС ко входу в зонд, тем выше активность ГПД в выходящем из неё теплоносителе и тем больше превышение объёмной активности ГПД в измерительной ёмкости над средней объёмной активностью в газовой системе. Для ГПД с периодом полураспада много больше периода циркуляции теплоносителя по контуру максимальный прирост активности на выходе из барботажного тракта будет наблюдаться в период от момента возникновения или расширения дефекта до завершения оборота теплоносителя по контуру, то есть пока сохраняется максимальная разница между активностью входящего в ТВС теплоносителя и вкладом дефекта. Для короткоживущих ГПД значительный дефект просто обеспечивает существенный рост их активности в теплоносителе дефектной ТВС и в измерительной ёмкости.

Чувствительность ГЛЗ можно оценить сравнением скорости поступления активности ГПД в измерительную ёмкость со скоростью её поступления в теплоноситель ТВС через дефекты. Каждому типу дефекта соответствует свой набор реперных изотопов. Чувствительность ГЛЗ зависит от конструкции барботажного тракта и расхода газа-носителя. Суммарная поверхность пузырей должна быть достаточно велика, чтобы забрать значимое количество ГПД из теплоносителя, а время их доставки к измерительной ёмкости достаточно коротким, чтобы сохранить короткоживущие изотопы. Для оценки чувствительности ГЛЗ надо построить модель переноса активности по всему тракту, от сопла до измерительной ёмкости, и рассмотреть, возникновение каких дефектов и на каком фоне можно обнаружить.

В работе представлена модель переноса газообразной активности от сквозного дефекта оболочки твэла до измерительного участка зонда. Перенос описан на основе процессов растворения/дегазации инертных газов в свинце. ГПД выходят из твэла через дефект в виде микропузырьков, которые потом частично или полностью растворяются в теплоносителе. Пузыри и микропузырьки сливаются и дробятся, диффузия газа через их поверхность может идти как наружу, так и внутрь пузыря. Собственная скорость всплытия у микропузырьков меньше, чем у пузырей газа-носителя, её можно пренебречь и считать, что микропузырьки переносят теплоноситель. Удельный объём и межфазная поверхность микропузырьков намного меньше, чем у пузырей газа-носителя. Для упрощения содержащаяся в них активность включена в активность выходящего из ТВС теплоносителя.

К свободному уровню в сепарационной полости приходят обогащённые ГПД пузыри прокачиваемого газа и пузырьки, выходящие через дефект оболочки. В газовом объёме полости образуется смесь аргона и ГПД, поступивших в пузыри из теплоносителя ТВС, вышедших с микропузырьками через сквозной дефект оболочки и изначально содержащихся в газе-носителе. Из сепарационной полости смесь по трубке подъёма газа поступает в измерительную ёмкость. Массовый расход газа постоянен по всему тракту.

В работе использована наиболее консервативная модель переноса газовой активности по барботажному тракту. ГПД из микропузырьков полностью растворяются в теплоносителе, а из него диффундируют в пузыри газа-носителя. Расчёт по этой модели даёт нижнюю оценку активности ГПД в сепарационной полости.

В качестве примера выполнены расчёты чувствительности ГЛЗ к дефекту «открытая поверхность топлива». Рассмотрены все ГПД обладающие значимым гамма-излучением. Расчёты выполнены для гидродинамических условий натурального стенда ГЛЗ. Необходимые параметры двухфазного течения рассчитаны по методике, изложенной в работе [2].

Сделаны оценки расхода объёмной активности ГПД через измерительную ёмкость при наличии в ТВС открытой поверхности топлива в зависимости от её размера и расположения ГЛЗ относительно дефектной ТВС. Рассчитано отношение скорости посту-

пления активности ГПД в измерительную ёмкость к скорости их выхода с открытой поверхности в теплоноситель ТВС. Результаты подтверждают принципиальную возможность определения сектора расположения ТВС с крупным дефектом.

Список литературы

1. Устройство для обнаружения дефектных ТВС ядерного реактора с жидкометаллическим теплоносителем. Лемехов В.В., Моркин М.С., Ярмоленко О.А. Патент RU 2594179C1 G21C17/04, G21C3/32.
2. Верещагина Т.Н., Лемехов В.В., Моркин М.С. Гидравлика газлифтного зонда со свинцовым теплоносителем // Наст. сборник. — С. 136.

Экспериментальное исследование применимости твердого оксидного электролита для определения нижней границы контроля кислорода в натрии

Блохин В. А., Борисов В. В., Жмурин В. Г., Засорин И. И.,
Камаев А. А., Пахомов И. А.

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

Ключевые слова: твердый оксидный электролит, натрий, диоксид циркония, оксид титана, оксид кальция, нижний предел парциального давления кислорода.

Твердый оксидный электролит на основе диоксида циркония является наиболее изученным в настоящее время и поэтому это вызывает интерес к использованию его для контроля кислорода в жидкометаллических теплоносителях. Особенностью жидких металлов является то, что необходимо контролировать низкое содержание кислорода, например, для эвтектического сплава свинец-висмут на уровне 0,02 ppm, для натрия в пределах от 10 до 0,1 ppm. Ионная проводимость твердых оксидных электролитов зависит от многих факторов: температуры, вида и количества стабилизированной добавки кислорода, примесного состава, технологии изготовления и особенно от парциального давления в контролируемой среде. Для контроля кислорода в контролируемой среде необходимо, чтобы среднее ионное число переноса электролита находилось не ниже уровня $0,95 \pm 0,05$. Среднее ионное число переноса зависит существенно от величины парциального давления кислорода. Считают, что нижним пределом применимости по кислороду и температуре является диссоциация самого электролита. В литературе указано, что полученная предельная величина парциального давления кислорода от температуры для электролита $0,85\text{ZrO}_2 \cdot 0,15\text{CaO}$ с помощью кулонометрического титрования кислорода через твердый оксидный электролит равна

$$\lg P_{\text{O}_2} = -60,5 \cdot 10^3 T^{-1} + 23,3.$$

Для электролита $0,85\text{ZrO}_2 \cdot 0,15\text{Y}_2\text{O}_3$ нижняя граница применимости по парциальному давлению кислорода и температуре указывается, что она ниже на два порядка, чем у электролита $0,85\text{ZrO}_2 \cdot 0,15\text{CaO}$.

В настоящей работе представлено экспериментальное исследование нижней границы применимости твердого оксидного электролита $0,85\text{ZrO}_2 \cdot 0,15\text{Y}_2\text{O}_3$ для контроля кислорода в натрии при температуре $(400 \pm 5)^\circ\text{C}$. Изменение концентрации кислорода в натрии производилось путем введения навесок лития, который способен раскислить натрий при температуре 400°C до уровня $1,4 \cdot 10^{-12}$ ppm. Показано, что нижний предел применимости твердого оксидного электролита $0,85\text{ZrO}_2 \cdot 0,15\text{Y}_2\text{O}_3$ для контроля кислорода в жидком натрии при температуре 400°C равен $\sim 7 \cdot 10^{-5}$ ppm. Подтверждено, что нижняя граница применимости электролита $0,85\text{ZrO}_2 \cdot 0,15\text{Y}_2\text{O}_3$ по парциальному давлению кислорода на два порядка ниже, чем у электролита $0,85\text{ZrO}_2 \cdot 0,15\text{CaO}$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ.

СЕКЦИЯ 7.

Использование технологий ядерной энергетики в других отраслях

Поддержание качества свинецсодержащих теплоносителей в перспективных технологиях переработки органического и неорганического сырья

Ульянов В. В., Кошелев М. М., Харчук С. Е.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Обнинск

vulyanov@ippe.ru

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, свинец, эвтектический сплав свинца с висмутом, жидкометаллический пиролиз отработавших автомобильных шин, прямоконтактный парогенератор, кислород воздуха, водородная очистка.

Тяжелые жидкометаллические теплоносители (свинец, эвтектический сплав свинца с висмутом) обладают набором благоприятных теплофизических и технологических свойств, но в сравнении с натриевым теплоносителем более агрессивны по отношению к конструкционным материалам, а также могут загрязняться твердыми примесями в процессе эксплуатации. Вследствие этого для установки любого назначения, использующей в качестве рабочего тела жидкие свинец и сплав свинца с висмутом, необходимо поддержание требуемого их качества для обеспечения длительной безаварийной работы.

Из положительных качеств тяжелых жидкометаллических теплоносителей следует выделить их низкую химическую активность при взаимодействии с воздухом, органическими соединениями, водой и водяным паром, что исключает возможность взрывов и пожаров; высокую температуру кипения (≥ 1670 °C), что дает возможность использовать их в широком диапазоне температур; низкое давление паров и, как следствие, низкое давление в циркуляционном контуре, повышающее безопасность и надежность и упрощающее конструкцию.

Набор вышеприведенных качеств позволил рассматривать тяжелые жидкие металлы и сплавы не только как теплоносители перспективных реакторных установок (СВБР, БРЕСТ, MYRRHA, CLEAR и др.), но и в качестве рабочих тел в теплообменных аппаратах для переработки органического и неорганического сырья. Эти аппараты могут быть как рекуперативного (поверхностного), так и смесительного (прямоконтактного) типа. Последние по сравнению с рекуперативными обладают следующими преимуществами:

- а) более низкая стоимость и простота конструкции;
- б) отсутствие теплопередающих поверхностей, которые могут быть подвержены коррозии, загрязнению и вибрационным повреждениям;
- в) уменьшенные габариты за счет большей поверхности теплообмена в единице объема.

Наибольший технологический уровень готовности (четвертый уровень из девяти по методике Минобрнауки РФ, то есть созданы экспериментальные образцы и запатентованы технические решения) достигнут применительно к следующим процессам:

- 1) Жидкометаллический пиролиз (термическое разложение без доступа кислорода) твердых органических полимерных отходов, в первую очередь, отработавших автомо-

бильных шин, защищенный патентами РФ № 2672295, 2693800, 2694355. В результате пиролиза вместо экологически вредного отхода получают пиролизная жидкость (аналог синтетической нефти), технический углерод, неорганический остаток (зола, металлокорд и др.) и пиролизный газ (близкий по свойствам к попутному нефтяному газу). Использование свинцового теплоносителя снижает длительность пиролиза, позволяет получать дорогостоящие продукты, убирает вредные серосодержащие и азотсодержащие соединения из продуктов по сравнению с «классическим» пиролизом в газе.

2) Прямоконтактная дистилляция воде без предварительной подготовки, защищенная патентами РФ № 2381431, 2384800, 2384801. Непосредственное смешение свинецсодержащих расплавов с исходной водой с любым солесодержанием вкуче с высокотемпературной фильтрацией водяного пара от аэрозолей свинца открывает перспективы разделения солевых растворов на пресный конденсат и сухой остаток соли, а также создания пара в разомкнутом паровом цикле.

3) Обратимый металлооксидный цикл «металл — оксид металла», защищенный патентом РФ № 2616082, может быть применен для эффективного разделения воздуха на кислород в форме PbO и азот, беспламенное сжигание органического топлива, переработка органических радиоактивных отходов и др.

Существуют и другие направления использования тяжелых жидкометаллических теплоносителей для термоэлектрохимического разложения воды, синтеза наноструктурных материалов, утилизации сбросного тепла машин непрерывного литья заготовок, увеличения степени переработки нефтепродуктов и др.

Поддержание качества теплоносителей в вышеприведенных процессах упрощено в сравнении с реакторными установками вследствие отсутствия тонкостенных конструктивных элементов и меньшей разницы температур в циркуляционном контуре. Тем не менее для исключения неконтролируемого шлакоотложения должна обеспечиваться герметичность жидкометаллического контура.

Водородная очистка от шлаков на основе оксида свинца не требуется в смесительных аппаратах с органическим сырьем (т. к. само сырье будет выступать в качестве раскислителя), но она необходима для обеспечения чистоты теплоносителя и внутренних поверхностей оборудования контура в остальных процессах. В процессе водородной очистки протекает реакция: $PbO + H_2 \leftrightarrow Pb + H_2O$, в результате которой восстановленный из оксида свинец возвращается в теплоноситель.

Для предотвращения диссоциации защитных оксидных покрытий на конструкционных материалах для водородной очистки необходимо использование увлажненного водорода, а для обеспечения технологичности процесса и снижения риска взрывоопасности газовая смесь должна разбавляться инертным газом.

В зависимости от конструктивных особенностей контура водород может взаимодействовать как с поверхностью теплоносителя, так и вводиться в поток теплоносителя. В последнем случае следует использовать специальные устройства: эжекторы, сопловые насадки или механические диспергаторы газа с вращающимися элементами.

Специальных средств регулирования концентрации химически активного растворенного в теплоносителе кислорода, как правило, не требуется. Однако в случае необходимости, в теплоноситель может дозировано подаваться кислород как в форме увлажненных газообразных смесей инертного газа с водородом, так и за счет управляемого растворения гранул оксида свинца специально подобранной геометрии. В то же время контроль термодинамической активности кислорода необходим, что осуществимо при помощи специальных датчиков, защищенных патентами РФ № 2533931, 2536315, 2548374, 2584378.

Учитывая возможность интенсивного образования аэрозолей теплоносителя, а также необходимость эффективного разделения получаемых продуктов и теплоносителя, обязательно должны предусматриваться высокотемпературные газовые фильтры.

Моделирование процессов теплопереноса в перспективном комплексе «сталь — жидкометаллический кристаллизатор», решающем задачу утилизации тепла машин непрерывного литья заготовок

Ульянов В. В., Кошелев М. М., Коновалов М. А., Харчук С. Е.

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

Ключевые слова: легкоплавкие металлы и сплавы, свинцово-висмутовый теплоноситель, реакторные установки, машины непрерывного литья заготовок, кристаллизатор стали.

В рамках поиска новых направлений применения жидкометаллических теплоносителей предложено их использование для охлаждения кристаллизаторов стали машин непрерывного литья заготовок вместо воды. Это позволит за счет осуществления паросилового цикла с получением электрической энергии сократить энергетические затраты при производстве стали до 40%. Предлагаемая замена требует проведения комплекса исследований, включающих в себя выбор жидкометаллического теплоносителя, моделирование охлаждения жидкометаллическим теплоносителем каналов кристаллизатора различной формы.

Выбор жидкометаллического теплоносителя для использования его при отводе тепла от кристаллизатора стали должен проводиться на основании следующих критериев: цена, теплопроводность, теплоемкость, давление насыщенных паров, температура плавления, температура кипения, коррозионное взаимодействие с конструкционными материалами, токсичность и др. Установлено, что наилучшим образом при охлаждении кристаллизуемой стали в машинах непрерывного литья заготовок подходит эвтектический сплав свинца с висмутом, успешно использовавшийся в качестве теплоносителя судовых реакторов в Советском Союзе.

В докладе представлены результаты анализа охлаждения затвердевающей жидкой стали в канале кристаллизатора круглого сечения Pb-Bi (водой). Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность перехода от охлаждения водой кристаллизатора к жидкометаллическому охлаждению с термодинамическими параметрами теплоносителя на выходе из кристаллизатора, достаточными для реализации паросилового цикла. Целесообразно продолжение исследований для выбора материала стенки и определения оптимальной формы охлаждающих каналов кристаллизатора для максимальной интенсификации теплообмена между застывающей сталью и Pb-Bi.

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований и Правительству Калужской области, при финансовой поддержке которых в рамках научного проекта № 19-48-400003 выполняются исследования в обоснование снижения энергетических затрат при производстве стали за счет утилизации тепла машин непрерывного литья заготовок.

О возможности создания природоподобных биохимических аккумуляторов для накопления низкопотенциальной тепловой энергии АЭС

Сахипгареев Д. Р.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Обнинский институт атомной энергетики (ИАТЭ НИЯУ МИФИ), Обнинск
sakhipgareevdenis.email@gmail.com*

Ключевые слова: АЭС, аккумуляторы, теплоемкость, эффективность, биохимия, природоподобность, макроэнергетические связи, АТФ, низкопотенциальная энергия, материалы.

Современные технологические процессы выделяют большое количество тепловой энергии, которая не реализуется, а рассеивается в окружающей среде. Это так называемое сбросное тепло является низкопотенциальным, имеющим температуру немного выше температуры окружающей среды.

Эффективное использование низкопотенциального тепла даст возможность решить некоторые экономические и экологические проблемы как в энергетике в целом, так и в атомной отрасли в частности. Помимо этого, накопление энергии в аккумуляторах в периоды минимального энергопотребления даст возможность эксплуатировать АЭС в базовом режиме, повышая одновременно её экономическую эффективность.

Для рационального использования низкопотенциальной энергии АЭС, возможно использование аккумуляторов тепла, способных собирать, хранить и применять тепловую энергию для нужд человека [1]. Основопологающей задачей при разработке и проектировании данных устройств становится подбор наиболее оптимального теплоаккумулирующего материала (ТАМ).

В настоящее время выделяют три основных типа тепловых аккумуляторов: жидкостные, с твердым теплоаккумулирующим материалом и аккумуляторы фазового перехода (АФП) [1]. На выбор необходимого ТАМ очень сильно влияют его теплофизические и природные свойства: температура плавления, теплопроводность, сопротивление, вязкость, коррозионная активность и т. д.

Еще одним способом накопления низкопотенциального тепла может стать использование природоподобных технологий, основанных на протекании биохимических реакций в живых клетках макроэнергетических соединений, способных накапливать, хранить и расходовать тепловую энергию в ходе протекания химических реакций [2]. Одной из таких технологий может стать использование цикла АТФ — АМФ.

Аденозинтрифосфат (АТФ) — это универсальный источник энергии, поставляющий её для протекания химических реакций в организмах живых существ [2]. АТФ — это органическое соединение, состоящее из аденина, рибозы и трех остатков фосфорной кислоты. Благодаря наличию двух макроэнергетических связей между фосфатными остатками, содержащих большую химическую энергию, АТФ может высвободить большое количество тепловой энергии. Вступая в реакцию гидролиза, АТФ теряет один из остатков фосфорной кислоты, превращаясь в аденозиндифосфат (АДФ) и выделяя от 40 до 60 кДж/моль энергии. В ходе дальнейшего протекания гидролиза у АДФ отщепляется второй остаток фосфорной кислоты и идет превращение в аденозинмонофосфат (АМФ) с высвобождением еще 40–60 кДж/моль энергии. Такой процесс является обратимым, т. е. АТФ выступает своеобразным универсальным органическим аккумулятором тепловой энергии, который тратит её в необходимый живому организму момент времени [3].

Использование цикла АТФ — АМФ дает возможность запастись уже выделившуюся энергию без ненужных дополнительных энергозатрат. В концепции использования цикла АТФ — АМФ находится решение проблемы рационального применения низкопотенциального тепла через его запасание в макроэргических связях, возникающих в процессе синтеза АМФ в АТФ. В будущем АТФ может поступать к некоторому условному потребителю, где во время гидролиза данного соединения энергия, находящаяся в образовавшихся макроэргических связях, начинает высвобождаться.

Другими веществами, подобными аденозинтрифосфату (АТФ), которые также являются макроэргическими соединениями, то есть биологическими молекулами, способными накапливать, хранить и расходовать тепловую энергию в процессе протекания химических реакций [2], являются следующие соединения: гуанозинтрифосфат (ГТФ), креатинфосфат, 1,3 – дифосфоглицерат, фосфоенолпируват.

Для получения сравнительной оценки были проведены расчеты запасаемой энергии (в кДж/кг) для вышеприведенных биохимических соединений, а также для более стандартных теплоаккумулирующих материалов: АТФ (137,99 кДж/кг — 2 связи); ГТФ (133,36 кДж/кг — 2 связи); креатинфосфат (198,92 кДж/кг — 1 связь); 1,3 – дифосфоглицерат (172,92 кДж/кг — 1 связь); фосфоенолпируват (321,33 кДж/кг — 1 связь); вода (334,64 кДж/кг); кирпич керамический красный (68,8 кДж/кг); кирпич силикатный (63,6 кДж/кг).

Из полученных результатов видно, что наибольшей теплоемкостью из ряда веществ обладает вода, но она обладает рядом недостатков, среди которых узкий интервал температур эксплуатации и большие потери тепла в окружающую среду при нагреве до высоких температур. За водой по эффективности следуют соединения с макроэргическими связями. У них есть ряд преимуществ: теплотери близки к нулю, не происходит коррозионных процессов, нет необходимости нагревать вещество, почти все биохимические реакции с этими соединениями являются обратимыми.

Для определения возможности создания природоподобных биохимических аккумуляторов для накопления низкопотенциальной тепловой энергии АЭС необходимо выполнить программу исследований. Прежде всего, выбрать интересующие характеристики и свойства (температура, теплопроводность, сопротивление, вязкость, коррозионная активность), задать определенные условия исследования и провести эксперименты. Параллельно можно провести исследования с другими исходными условиями и параметрами. По полученным экспериментальным данным построить зависимости исследуемых свойств и сравнить между собой. На основе всей полученной базы данных выявить сильные и слабые стороны анализируемого материала. Исходя из соотношения всех выводов, можно судить не только о возможности создания, но и об эффективности природоподобных биохимических аккумуляторов низкопотенциальной энергии.

Список литературы

1. Левенберг В.А., Ткач М.П. и др. Аккумуляирование тепла. – Киев: Техника, 1991.
2. Ленинджер А. Основы биохимии: В 3-х т. Т. 2. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
3. Кольман Я., Рём К.-Г. Наглядная биохимия. 2-е изд.: Пер. с нем. — М.: Мир, 2004.

Алфавитный указатель

- Авдеев Е.Ф. 88, 90
Авдеенков А.В. 119
Алексеев В.В. 29, 33, 41
Алчагиров Б.Б. 57
Антропов А.С. 111
Анфимов А.М. 118
Арнольд М.Н. 9, 14
Артемов К.П. 129
Асхадуллин Р.Ш. 14, 17, 39, 49, 53, 60, 63, 133
Афанасьев А.В. 103
Ачаковский О.И. 119
- Байрамуков А.Ш.** 75
Баясхаланов М.В. 109
Бедретдинов М.М. 124
Безнос А.В. 71, 80
Белавина Е.А. 104
Беляев И.А. 99, 100, 104
Блохин В.А. 140
Блохина А.Н. 92, 123, 135
Боков П.А. 68, 71, 80
Бокова Т.А. 68, 71, 80
Борисов В.В. 33, 140
Бутов А.А. 116
Быков М.А. 114
- Васильев Н.В.** 24
Верещагина Т.Н. 102, 136
Виноградов М.М. 54
Волков Н.С. 68, 71
Воронин И.А. 17, 41
- Гальченко Э.Ф.** 83
Ганичев Н.С. 33, 43, 44
Глебов А.П. 19
Гончар Н.И. 137
Гордеев С.С. 77
Грабежная В.А. 78
Грибачёва В.А. 131
Гриценко С.Ю. 129
Гулевич А.В. 29
- Дельнов В.Н.** 18, 108
Денисова Н.А. 65
Дмитриев С.М. 22, 81
Добров А.А. 22, 81
Доронков Д.В. 22, 81
Дышекова Ф.Ф. 57
- Егоров Ю.В.** 103
- Жмурин В.Г.** 140
- Забилов А.Р.** 54
Загорюлько Ю.И. 43, 44
Засорин И.И. 140
Зейгарник Ю.А. 24
Зыкова Р.О. 41
- Иванов А.П.** 29
Иванов К.Д. 49, 50, 51, 52, 60, 63, 134
Ивочкин Ю.П. 27
Иванов Е.Ф. 65
- Кабанов Ю.А.** 69
Казанцев А.А. 120
Камаев А.А. 29, 33, 140
Канаметова О.Х. 57
Каримов А.З. 126
Карякин М.Ю. 126
Кириллов И.Н. 118
Киркин А.М. 126
Климонов И.А. 116
Клинов Д.А. 29
Кондратьев А.М. 56, 61
Коновалов М.А. 41, 43, 44, 143
Корниенко Ю.Н. 114
Коробенко В.Н. 61
Короткова О.В. 92, 123, 135
Корсун А.С. 109
Котин А.В. 127
Кошелев М.М. 37, 39, 141, 143
Красин В.П. 35
Кругликов Ю.С. 125
Крюков А.Е. 78
Кудашов И.Г. 116
Кудряева Ю.В. 102
Кузина Ю.А. 29, 41, 65
Кузнецов Д.В. 118
Кулаков А.В. 20
Куприянов А.В. 84
Курындин А.В. 126
Кустова И.Н. 69
- Лаврова О.В.** 49, 53
Левченко В.М. 133
Легких А.Ю. 17, 45, 46, 53, 133
Лемехов В.В. 136
Листратов Я.И. 100
Логинов Н.И. 95
Лощинин В.М. 83
Лубина А.С. 73

- Лунина С.В. 108, 133
Лучинкин Н.А. 99
Львов А.В. 68, 71
Лыскова В.Э. 22
Лякишев С.Л. 92, 123, 135
- Макаров В.В.** 103
Мамаев А.В. 127
Маров А.Р. 68, 71
Матвиенко И.В. 103
Махин В.М. 20
Меринов И.Г. 109
Митрофанова О.В. 15, 75
Михеев А.С. 78, 102
Молотова И.А. 54
Моркин М.С. 136, 137
Морозов А.В. 29, 85, 87, 93, 94
- Низовцев А.А.** 65
Никаноров О.Л. 118
Никель О.А. 69
Ниязов С-А.С. 49, 50, 63, 134
Носенко А.П. 103
- Орлов Ю.И.** 9
Осин А.Б. 84
Осипов А.А. 49, 50, 51, 52, 59, 60, 63, 134
- Пахомов И.А.** 140
Перевезенцев В.В. 97
Пиминов А.А. 20
Привезенцев В.В. 65
Пронин А.Н. 22, 81
Пучков М.В. 103
Пятницкая Н.Ю. 104
- Разуванов Н.Г.** 99
Рахель А.Д. 56, 61
Рачков В.И. 9
Рубцова Е.В. 22
Рязанов А.В. 22, 81
Рязапов Р.Р. 127
- Садовничий Р.П.** 45, 133
Салаяев А.В. 118
Самойлов О.Б. 84
Сардов П.А. 99, 100
Сахипгареев А.Р. 85, 87, 93
Сахипгареев Д.Р. 144
Селезнев А.В. 103
- Семишкин В.П. 20
Семченков А.А. 69
Сергеев В.В. 83
Сергеев Вл.В. 120, 121
Скобеев Д.А. 46
Скоморохов А.Н. 45, 133
Смирнов Г.С. 113
Смирнова В.О. 90
Соборнов А.Е. 127
Солнцев Д.Н. 22, 81
Сорокин А.П. 9, 29, 41, 65, 77
Сорокин В.Д. 84
Сорокин Г.А. 65
Союстова С.И. 35
Старовойтов Н.А. 75
Стегайлов В.В. 111, 113
Степанов О.Е. 124
Супотницкая О.В. 120, 125
Сутягин И.А. 33
Сычева Т.В. 116
- Треушников М.В.** 127
- Ульянов В.В.** 17, 37, 39, 141, 143
Усов Э.В. 116
- Федоринов А.В.** 75
- Харитонов В.С.** 109
Харитоновна Н.Л. 47
Харчук С.Е. 37, 39, 141, 143
Хибиев А.Х. 57
Хренников Н.Н. 47
Хробостов А.Е. 22, 81
- Чепоров Р.Ю.** 49, 134
Чуркин А.Н. 114
Чусов И.А. 20
Чухно В.И. 116
- Шарафутдинов Р.Б.** 47
Шарый Н.В. 92
Шипилов В.В. 88
Шипов Д.Л. 84
Шлепкин А.С. 85, 87, 93, 94
- Щербаков С.И.** 106, 131
- Янцева Л.М.** 125

Подписано в печать 26.08.2020.
Тираж 200 экз. Заказ № 196. Уч.-изд. л. 9,3. Усл. п. л. 8.8.

Отпечатано в ОПИНТИ ГНЦ РФ – ФЭИ.
249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского».