ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

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

Научно-техническая конференция

ТЕПЛОФИЗИКА РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА-2018

Тезисы докладов

16-18 мая 2018 года Обнинск **Теплофизика реакторов нового поколения** (Теплофизика – 2018) / Сборник тезисов докладов на научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2018)», 16–18 мая 2018, г. Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ. 2018. – 182 с.

Сборник тезисов докладов включает материалы, представленные на конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2018)», отражающие состояние и задачи НИОКР по теплофизическому обоснованию легководных и быстрых реакторов с охлаждением натрием и свинцом.

В пленарных докладах рассмотрены проблемные вопросы: экспериментальное моделирование гидродинамики и теплообмена в быстрых реакторах с ЖМТ, теплообмен в реакторе-токамаке, технология ТЖМТ в РУ нового поколения, влияние процессов вихреобразования и закрутки потока на безопасность ЯЭУ интегрального типа, перспективные реакторные технологии 4-го поколения в рамках Международного Форума «Поколение IV», подобие гидродинамики раздающих коллекторных систем с различным подводом жидкости, анализ тяжелых аварий в РУ ВВЭР, концептуальные предложения по реактору ВВЭР-СКД, проект РИФМА, тепловые трубы в атомной энергетике.

На секционных заседаниях рассмотрен широкий круг задач в области физхимии и массопереноса в системах с ЖМТ, включая термодинамические модели растворов Ме-О. поверхностное натяжение сплавов натрия, смачиваемость реакторных сталей жидким свинцом, механизмы дробления перегретых ЖМТ капель и т. д.; исследования в обоснование технологии ЖМТ быстрых реакторов, в том числе, геттерной очистки натрия от кислорода, моделирования физико-химических процессов в контурах РУ с ТЖМТ, возможности исследований отработавших кассет реакторов с ТЖМТ для обоснования технологий ЯЭУ; исследования теплогидравлики РУ в обоснование повышения эффективности и безопасности легководных реакторов и с ЖМТ: гидродинамических процессов в ТВС-КВАДРАТ активной зоны реактора PWR, теплофизических процессов при работе пассивных систем безопасности ВВЭР, кипения натрия в ТВС в аварийных режимах, формирования температурного поля активной зоны быстрого реактора в процессе кампании, теплогидравлики при подъемном течении жидкого металла в компланарном магнитном поле, изучение теплогидравлики витого парогенератора с ТЖМТ. На специальных секциях рассмотрены результаты разработки и испытаний датчиков, систем контроля и оборудования для РУ, разработки и верификации теплофизических кодов СОКРАТ/В1, ЕВКЛИД/V2, SAFR/V1, КУПОЛ-МТ, ANSYS CFX 15.0, КОРСАР/ГП, ОрепFOAM, СОREMELT3D, использование технологий ядерной энергетики в других отраслях.

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

Под общей редакцией

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

Технический редактор Н. А. Денисова

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Проект № 18-08-20028)

ISBN 978-5-906512-99-4

Содержание

Пленарные доклады

Моделирование теплофизических процессов в обоснование проектов быстрых реакторов нового поколения с жидкометаллическими теплоносителями	11
Проблемы теплообмена в реакторе-токамаке Свиридов В.Г., Фрик П.Г.	14
Обеспечение технологии тяжелого жидкометаллического теплоносителя в реакторных установках нового поколения Асхадуллин Р.Ш., Стороженко А.Н., Мельников В.П., Легких А.Ю., Ульянов В.В.	16
Концептуальные предложения по водоохлаждаемому реактору со сверхкритическими параметрами (обзор зарубежных и российских разработок SCWR)	17
Анализ влияния процессов вихреобразования и закрутки потока на безопасность работы транспортных ЯЭУ интегрального типа	18
Перспективные реакторные технологии 4-го поколения и их развитие в рамках Международного форума «Поколение IV»	20
Сравнительные оценки отечественных и зарубежных подходов к развитию перспективных реакторных технологий и топливного цикла в атомной энергетике	21
Современные подходы к анализу тяжелых аварий на внутрикорпусной стадии для АЭС с РУ ВВЭР Пантюшин С.И., Литышев А.В., Гаспаров Д.Л., Николаева А.В., Аулова О.В., Букин Н.В., Быков М.А.	23
Свойство подобия гидродинамики раздающих коллекторных систем с различными условиями подвода жидкости в коллектор Дельнов В.Н.	24
Тепловые трубы в атомной энергетике Логинов Н.И., Верещагина Т.Н.	25
Теплофизические аспекты проекта РИФМА	26
Конференции как инструмент сохранения знаний научной школы теплофизики ФЭИ Верещагина Т.Н.	27
Разработка метода учёта неоднородных распределений параметров одно- и двухфазных потоков при выводе интегралов типа Лайона	28
О некоторых проблемах описания и обобщения экспериментальных данных о критических тепловых потоках при кипении в каналах Сергеев В.В.	30

Секция 1. Физическая химия и массоперенос в системах с жидкометаллическими теплоносителями

Координационно-кластерная модель для расчета константы Сивертса растворов водорода в расплавах системы Li-Sn	32
Термодинамическая модель растворов Ме-О Осипов А.А., Ниязов СА.С.	35
Равновесная модель диссоциации соединений Осипов А.А., Иванов К.Д., Асхадуллин Р.Ш.	36
Поверхностное натяжение сплавов натрия на основе олова Алчагиров Б.Б., Кясова О.Х.	38
Автоматизированная установка для измерения быстрых изменений поверхностного натяжения жидкометаллических теплоносителей	40
Температурная зависимость смачиваемости реакторных сталей жидким свинцом, висмутом и эвтектикой Pb-Bi с добавлением лития в интервале от 500 до 1800 К Алчагиров Б.Б., Таова Т.М., Хоконов Х.Б.	42
Применение высокотемпературной электронной микроскопии к изучению теплофизических процессов	44
Поляризационный эффект при измерении термодинамической активности кислорода гальванической концентрационной ячейкой <i>Мусихин Ю.А., Арнольдов М.Н</i>	46
Механизмы дробления перегретых жидкометаллических капель, погруженных в холодную воду Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г.	48
Экспериментальное исследование поведения кориума на границе его раздела с реакторными конструкционными материалами Загорулько Ю.И., Ганичев Н.С.	50
О возможных механизмах термического взаимодействия кориума с натрием при тяжелых авариях	52
Исследование кинетики растворения графита в ламинарных потоках натрия Загорулько Ю.И., Ганичев Н.С., Коновалов М.А.	53
Влияние коррозии охлаждаемой поверхности на теплообмен при кипении недогретых жидкостей	54
Секция 2. Исследования процессов гидродинамики и теплообмена в элементах оборудования реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями	
Теплообмен при кипении жидкометаллических теплоносителей в ТВС быстрых реакторов в аварийных режимах	55
Диагностика вихревой структуры потоков теплоносителей на основе использования метода акустических резонансов	57

Поздеева И.Г., Митрофанова О.В.

Моделирование гидродинамики и теплообмена в элементах парогенерирующих систем транспортных ЯЭУ	59
Особенности формирования температурного поля активной зоны реактора на быстрых нейтронах в процессе кампании	61
Особенности гидродинамики и теплообмена в ТВС активной зоны в быстром реакторе с высоким темпом наработки вторичного топлива	63
Вопросы и предложения по созданию базы экспериментальных данных для валидации программных средств по направлению «Теплогидравлические расчеты АЭС» Забиров А.Р., Смирнова А.А., Феофилактова Ю.М., Шевченко С.А., Яшников Д.А.	64
Модель подавления турбулентности компланарным магнитным полем при течении жидкого металла в прямоугольном канале Пятницкая Н.Ю., Свиридов Е.В., Разуванов Н.Г., Мельников И.А.	66
Экспериментальное исследование полей температуры и коэффициента теплоотдачи при подъемном и опускном течении жидкого металла в канале, имитирующем тепловыделяющую сборку активной зоны ядерного реактора БРЕСТ	68
Теплообмен при смешанной конвекции расплава соли в присутствии магнитных полей Белавина Е.А., Беляев И.А., Бирюков Д.А., Котляр А.В., Листратов Я.И., Рознин И.М., Свиридов В.Г.	70
Теплообмен при смешанной конвекции жидкого металла в присутствии магнитных полей	71
Экспериментальное исследование теплообмена при смешанной МГД-конвекции жидкого металла в наклонном канале	72
Исследование теплообмена при подъемном течении жидкого металла в компланарном магнитном поле Костычев П.В., Разуванов Н.Г., Свиридов В.Г.	73
Структурные свойства температурных пульсаций в жидких металлах Осипов А.А., Ульянов В.В., Кошелев М.М., Харчук С.Е.	74
О доверительности результатов измерений Арнольдов М.Н.	75
О влиянии направления течения жидкометаллического теплоносителя на теплогидравлические характеристики в витом парогенерирующем канале	77
Экспериментальное и расчётное определение сопротивления на начальном участке канала ячейки твэл	79

Особенности процессов при гидроударе в трубопроводе с малым недогревом теплоносителя	80
Авоеев Е.Ф., Каракуш Джихан Определение расхода в каналах ячеек ТВЭЛ по измеренной максимальной скорости	Q 1
Авдеев Е.Ф., Смирнова В.О.	
Секция 3. Экспериментальные и расчетные исследования в обоснование технологии жидкометаллических теплоносителей быстрых реакторов	
О возможности исследований отработавших кассет и твэлов реакторов АПЛ с ТЖМТ проектов 705 и 705К для обоснования технологий перспективных ЯЭУ Забудько А.Н., Бугреев М.И., Иванов К.Д., Николаев С.А., Чернов В.А., Николаев А.Н., Мастеров А.В.	82
Повышение информативности контроля термодинамической активности кислорода в расплавах тяжелых жидкометаллических теплоносителей Иванов К.Д., Ниязов СА.С., Чёпоров Р.Ю	85
Влияние примеси урана и тория в ТЖМТ и конструкционных материалах активной зоны на содержание газообразных продуктов деления в защитном газе и источник запаздывающих нейтронов в теплоносителе <i>Гончар Н.И.</i>	87
Численное моделирование процессов кристаллизации в жидких металлах Варсеев Е.В., Алексеев В.В., Коновалов М.А.	89
Расчет равновесного состояния системы натрий-кислород-водород Алексеев В.В., Борисов В.В., Перевозников С.В.	90
Оценки в обоснование геттерной очистки натрия от кислорода Сорокин А.П., Алексеев В.В., Коновалов М.А., Торбенкова И.Ю.	91
Анализ подходов к моделированию физико-химических процессов в контурах ядерных реакторов с ТЖМТ	92
Кинетики процесса удаления водорода с помощью гранулированного оксида свинца в бескислородной газовой среде Скобеев Д.А., Легких А.Ю.	93
Расчетная модель взаимодействия примесей железа и кислорода в тяжелых жидкометаллических теплоносителях Осипов А.А., Иванов К.Д., Ниязов СА.С.	94
Неразрушающая методика измерений теплофизических свойств твэлов с плотным топливом Стручалин П.Г., Круглов А.Б., Круглов В.Б., Харитонов В.С.	96
Методика исследования термического сопротивления контакта жидкого металла и теплопередающей поверхности Стручалин П.Г., Круглов А.Б., Круглов В.Б., Харитонов В.С.	97
Секция 4. Исследования гидродинамики и теплообмена в обоснование повышения эффективности и безопасности водоохлаждаемых реакторов	
Водоохлаждаемые реакторные установки со спектральным регулированием реактивности	98

Моделирование теплообменных процессов в вертикальных каналах, охлаждаемых водой СКД Николаева А.В., Чуркин А.Н.	99
Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя во входном участке ТВС Дмитриев С.М., Добров А.А., Солнцев Д.Н., Пронин А.Н., Рязанов А.В.	. 100
Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-КВАДРАТ реактора PWR	. 101
Исследование гидродинамических характеристик потока теплоносителя в активной зоне реактора универсального атомного ледокола нового поколения Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.	. 103
Экспериментальные исследования процессов турбулентного смешения в основном оборудовании ЯЭУ Дмитриев С.М., Баринов А.А., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.	. 104
Исследование теплообмена и гидродинамики в водо- и воздухоохлаждаемых теплообменниках систем безопасности АЭС с водоохлаждаемыми реакторами Балунов Б.Ф., Лычаков В.Д., Щеглов А.А., Матяш А.С., Старухина К.С.	. 106
Измерение эффективности очистки воздуха систем вентиляции АЭС йодидными фильтрами с использованием фреона <i>Ягодкин И.В., Посаженников А.М.</i>	. 108
Сопоставление поглощающей способности йодидных фильтров-сорбентов по радиоактивному метилйодиду и фреону Ягодкин И.В., Посаженников А.М., Саутин С.А., Исаев А.Ю.	. 110
Экспериментальные исследования прочности тепловыделяющих сборок реакторов с водой под давлением	. 112
Исследование локальных полей скоростей в ТВС	. 114
Результаты экспериментальных исследований смесительных свойств и гидравлических сопротивлений перемешивающих решёток на установке «ТРАССЕР»	. 115
Экспериментальное исследование теплофизических процессов при работе пассивных систем безопасности ВВЭР Морозов А.В., Калякин Д.С.	. 117
Особенности моделирования и расчета систем безопасности АЭС Леденева О.М.	. 118
Экспериментальные исследование процессов теплообмена в пучке воздухоохлаждаемых труб с поперечным оребрением в пассивной системе безопасности АЭС с ВВЭР <i>Сахипгареев А.Р., Морозов А.В.</i>	. 119

Экспериментальное исследование влияния неконденсирующихся газов на процессы конденсации пара в трубчатке модели парогенератора ВВЭР Шлепкин А.С., Морозов А.В.	121
Проблемы описания динамики концентрации раствора борной кислоты в аварийных режимах Шмаль И.И.	122
Влияние концентрации раствора борной кислоты в дополнительной системе залива активной зоны на процессы массопереноса в РУ ВВЭР в случае аварии Питык А.В., Морозов А.В., Рагулин С.В., Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С.	124
Исследование газо-водной смеси в полости гильзы кластерного регулирующего органа Салахова А.А., Белозеров В.И., Милинчук В.К.	125
Секция 5. Расчетные модели, коды и результаты численного моделирования	
Расчет теплогидравлических систем АЭС с применением графического редактора математических моделей	126
Расчетные технологии. Формулировка механизма движения жидкости для нестационарного анализа в дискретном времени	127
Расчетные технологии. Вычислительные схемы для улучшения моделирования тепломассопереноса в дискретном времени	130
Расчетный код COREMELT3D для расчета аварийных и переходных процессов в быстрых реакторах с натриевым теплоносителем	133
Моделирование теплообмена при продольном течении в пучках труб с искусственной шероховатостью	134
О возможности совместного применения матричного метода и аппарата обобщенных степеней Берса для математического моделирования процесса теплопереноса в объектах, обладающих цилиндрической симметрией Гладышев Ю.А., Калманович В.В., Серегина Е.В., Степович М.А.	135
Подходы для моделирования тяжелых аварий в реакторных установках на быстрых нейтронах в модуле SAFR/V1 кода ЕВКЛИД/V2 <i>Чухно В.И., Усов Э.В., Бутов А.А., Прибатурин Н.А., Мосунова Н.А.</i>	136
Расчёт экспериментов по плавлению топлива из диоксида урана кодом ЕВКЛИД/V2 с модулем SAFR/V1 Бутов А.А., Климонов И.А., Кудашов И.Г., Прибатурин Н.А., Усов Э.В., Чухно В.И.	138
Расчетное исследование вибрации труб экспериментальной модели прямоточного парогенератора с использованием CFD-кода Носенко А.П., Волков В.Ю., Скибин А.П., Макаров В.В., Афанасьев А.В.	139
Анализ чувствительности при моделировании ТА на РУ с ВВЭР-1000 с применением РК СОКРАТ/В1 Астахов В.В., Гаспаров Д.Л., Николаева А.В., Пантюшин С.И., Литышев А.В., Букин Н.В., Быков М.А.	141

Расчет гидродинамики струйно-вихревого конденсатора системы локализации аварии	142
Верификация модели струйно-вихревого конденсатора системы локализации аварии в коде КУПОЛ-М Казанцев А.А., Попова Т.В., Супотницкая О.В., Сергеев Вл.В.	143
Тестирование CFD-модели кипения на экспериментальной модели прямоточного ПГ с закруткой потока Сергеев Вл.В., Дьяченко Я.В.	144
Уточнение параметров интегральной модели турбулентности для случая углового обтекания регулярной стержневой структуры Мищенко А.А., Баясхаланов М.В., Корсун А.С., Меринов И.Г., Филиппов М.Ф.	146
Моделирование с помощью CFD-кода поля температуры теплоносителя в головках ТВС АЭС-2006 и ВВЭР-1000 Бугаева В.А., Олексюк Д.А., Киреева Д.Р.	147
Численное моделирование горения натрия при аварийных проливах в помещениях РУ БН-1200	148
Применение численного эксперимента для определения критической скорости обтекания из анализа условия устойчивости многокомпонентной системы труб <i>Каплунов С.М., Вальес Н.Г., Фурсов В.Ю., Самолысов А.В.</i>	149
Расчетно-экспериментальное исследование конденсационных гидроударов в трубопроводах реакторных установок	150
Исследование влияния профиля потока теплоносителя на прочность прямотрубного теплообменного аппарата <i>Блохина А.Н., Лякишев С.Л.</i>	151
Расчёт распределений локальных параметров адиабатных двухфазных потоков по коду ANSYS CFX	152
Моделирование малой течи на стенде ПСБ ВВЭР с использованием РК КОРСАР/ГП Харламова А.А., Щеколдин В.В.	154
Секция 6. Датчики, системы контроля и оборудование для РУ	
Прогнозирование фоновых показаний измерительных каналов секторной системы контроля герметичности оболочек твэлов реактора БН-800 Албутова О.И., Лукьянов Д.А.	155
Система температурного контроля активной зоны современного реактора на быстрых нейтронах Даниленко В.П., Ельшина Н.В., Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кондратович Ф.В., Кудряев А.А., Лукьянов Д.А.	156
Экспериментальные исследования эксплуатационного ресурса датчика газоанализатора водорода в режиме моделирования условий функционирования на АЭС Богданов С.В., Бережной С.Н., Вашляев Ю.Н.	157

Испытания макета индукционного расходомера Генералов Е.В., Кебадзе Б.В., Лагутин А.А., Стефани А.Г.	158
Влияние механических воздействий на термо-ЭДС термопар градуировки нихросил – нисил	159
Стабильность метрологических характеристик термопар градуировки нихросил – нисил (N-тип) и хромель – алюмель (К-тип) при температуре более 1000 °С Стефани А.Г., Ковалев Д.М., Корнилов В.П.	160
Применение вихревых магнитоиндукционных расходомеров с осесимметричным телом обтекания в контурах с жидкометаллическим теплоносителем	162
Инерционность термопар с изолированным и неизолированным рабочим спаем	163
Моделирование высокопредельных электромагнитных расходомеров для ЖМТ Фомин А.Н., Генералов Е.В., Кебадзе Б.В., Шурупов В.А.	164
Выбор параметров времяпролетного расходомера жидких металлов Фомин А.Н., Кебадзе Б.В., Стефани А.Г., Шурупов В.А.	165
Секция 7. Использование технологий ядерной энергетики в других отраслях	
Карнотизированные газотурбинные преобразователи перспективных атомных станций малой мощности и задача их расчётно-конструкторской оптимизации и экспериментальной теплотехнической отработки	166
Подход ФБУ «НТЦ ЯРБ» к оценке влияния теплоносителя на противоаварийную готовность и реагирование	168
О возможности применения свинецсодержаших расплавов для нефтеперерабатывающей и сталелитейной отраслей промышленности Кошелев М.М., Ульянов В.В., Гулевский В.А., Коновалов М.А., Харчук С.Е.	170
Свинецсодержащие расплавы: от теплоносителей перспективных реакторов к инновационным аппаратам для переработки твердого, жидкого и газообразного сырья	172
Исследование влияния условий жидкометаллического пиролиза отработавших автомобильных шин на состав и форму получаемых продуктов	174
О возможности применения тепловых труб в инновационных ядерных и неядерных технологиях	176
Проблема накопления и эффективного использования низкопотенциального тепла Питык А.В., Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С., Морозов А.В.	178

Пленарные доклады

Моделирование теплофизических процессов в обоснование проектов быстрых реакторов нового поколения с жидкометаллическими теплоносителями

Сорокин А. П., Кузина Ю. А., Орлов А. И.

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

Ключевые слова: гидродинамика, теплообмен, жидкие металлы, быстрые реакторы, физическое моделирование, скорость, давление, температура, теория подобия теплофизических процессов, критерии подобия, каналы сложной формы, активная зона, бак реактора, интегральная компоновка оборудования, гидравлическое сопротивление, теплоотдача, межканальное перемешивание.

Теплогидравлический анализ реакторных установок (РУ) с быстрыми реакторами является одним из важнейших направлений комплекса взаимосвязанных задач по обоснованию параметров РУ, относящихся к нейтронной физике реакторов, теплофизике, термомеханике, прочности конструкции и т.д. Особенности интегральной компоновки оборудования приводят к необходимости комплексного (экспериментального и расчетного) решения значительного объема научных задач теплогидравлического обоснования оборудования РУ с жидкометаллическими теплоносителями:

 – гидродинамики потоков жидкометаллического теплоносителя в каналах, стержневых системах, камерах и коллекторных распределительных системах;

 теплообмена в трубах, сборках твэлов активной зоны реактора и теплообменниках с жидкометаллическими теплоносителями с учетом межканального перемешивания (поперечного обмена массой, импульсом и энергией);

- гидродинамики и теплопередачи в парогенераторах;

– теплообмена в «горячей» камере смешения с учетом особенностей струйных течений на выходе из ТВС активной зоны реактора и т. д.

Необходимость развития методов численного моделирования гидродинамики и теплообмена для обоснования проектных решений и безопасности реакторных установок требуют проведения экспериментальных исследований для получения данных по физическим закономерностям теплофизических процессов, характеристикам гидродинамики и теплообмена в РУ, соотношений для замыкания уравнений численных моделей и верификации расчетных кодов.

Необходимо проведение широкого круга экспериментальных исследований по направлениям:

- гидродинамика в каналах, пучках стержней и камерах смешения быстрых реакторов:
 - распределение скорости и гидравлическое сопротивление в каналах различной формы (труба, кольцевой канал и т.д.);
 - распределение скорости, касательных напряжений, гидравлическое сопротивление, межканальное гидродинамическое перемешивание (межканальный обмен импульсом) и микроструктура турбулентности в сборках гладких и оребренных стержней с номинальной геометрией;
 - поля скорости и касательные напряжения в центральной и периферийной областях в сборках стержней с деформированной решеткой;
 - поля скорости в камерах смешения быстрых реакторов;

- теплообмен и температурные поля в каналах, пучках стержней и камерах смешения быстрых реакторов:
 - распределение температуры и теплоотдача в каналах различной формы (труба, кольцевой канал и т. д.);
 - распределение температуры, теплоотдача, межканальное тепловое перемешивание (межканальный обмен теплом) в центральной и периферийной областях в сборках гладких и оребренных стержней с номинальной геометрией и деформированной решеткой;
 - поля температуры в камерах смешения быстрых реакторов.

Для решения этих задач был создан комплекс экспериментальных жидкометаллических стендов, разработано оборудование, методы моделирования, методики проведения экспериментов и техника измерений, созданы датчики, средства автоматизации съема и обработки экспериментальной информации.

Теплообмен в жидких металлах имеет свои особенности, в значительной степени, обусловленные их высокой теплопроводностью и, соответственно, низким значением числа Прандтля. При низких значениях числа Прандтля понятие теплового пограничного слоя, который в данном случае распространяется до центра канала, теряет смысл. При изучении теплообмена жидких металлов, прежде всего в области теплоотдающей поверхности, следует учитывать поведение примесного состава жидкометаллического теплоносителя у поверхностей его циркуляции для номинального режима и при отклонениях от режима нормальной эксплуатации, а также осуществлять контроль его состояния.

Таким образом, одним из важнейших вопросов при подготовке и проведении экспериментов является выполнение условий механического, теплового и термодинамического подобия, устанавливающего зависимость физических свойств движущейся теплопроводящей среды от параметров состояния и самые общие зависимости для описания теплопередачи в различных жидкостях при самых разнообразных условиях гидродинамики и теплообмена.

При планировании экспериментального исследования, обобщении его результатов, анализ подобия и следующие из него критерии и асимптотические решения должны применяться в полном объеме. В том случае, когда возможно достаточно полное аналитическое решение или численное исследование математической модели, цель экспериментов – апробация ее основных предпосылок, а также уточнение расчетных коэффициентов.

Прямое физическое моделирование заключается в том, что воспроизводится процесс той же физической природы, что в натурном образце, но одноименные характеристики процесса изменены (уменьшены или увеличены) на некоторые постоянные множители. Иначе говоря, любые два физически подобные явления могут образовывать пару натурный образец – модель. Отсюда следует фундаментальное правило моделирования, сформулированное М.В. Кирпичевым и А.А. Гухманом (Гухман А.А., Кирпичев М.В. Теория моделей // Изв. Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина. – 1927. – Т. 30. – С. 1–50): подобны системы одной физической природы, условия однозначности которых подобны, а одноименные критерии, составленные из условий однозначности, численно одинаковы.

Для полного подобия модели натурному образцу должны быть выполнены следующие условия:

a) процесс, воспроизводящийся в модели, относится к тому же классу физических явлений, что и процесс в натурном образце, оба процесса подчиняются одним и тем же уравнениям и характеризуются одинаковыми физическими величинами;

б) модель геометрически подобна натурному образцу;

в) безразмерные краевые условия в натурном образце и модели одинаковы качественно и численно;

г) безразмерные независимые переменные (определяющие критерии), переменные в натурном образце и модели попарно имеют одинаковое численное значение.

При выполнении этих условий моделирование является прямым и полным.

Физическое моделирование с достаточно четко очерченными границами достоверности получаемых с его помощью результатов возможно только на базе некоторой заранее выбранной математической модели.

Практически прямое моделирование может неограниченно применяться лишь для процессов, определяемые числа подобия которых являются функциями только геометрических симплексов системы и одного определяющего критерия. Наличие двух определяющих критериев, как, например, чисел Re и Pr при теплообмене, заметно осложняет моделирование. При трех определяющих критериях прямое моделирование обычно неосуществимо. В таких случаях необходима постановка систематических многовариантных экспериментов.

Назначением таких моделирующих экспериментов является реальное выявление эффектов, разрешенных весьма общей математической моделью, но не воспроизводимых на современном уровне математических технологий ни аналитически, ни в численных исследованиях. Например, выяснение сложных вихревых структур в потоках вязкой жидкости, корреляционные функции конкретных турбулентных течений и т.д.

В настоящей работе представлены результаты анализа с использованием имеющихся данных принципов моделирования процессов гидродинамики и теплообмена и особенностей применения теории подобия теплофизических процессов применительно к моделированию:

- гидродинамики жидких металлов в каналах сложной формы;

теплообмена в жидких металлах в каналах сложной формы;

 теплогидравлики в стержневых системах (активная зона, теплообменники и парогенераторы);

 полей температуры и скорости в баке быстрого реактора с интегральной компоновкой оборудования в различных режимах работы.

Проблемы теплообмена в реакторе-токамаке

Свиридов В. Г., Фрик П. Г. НИУ «МЭИ», г. Москва, info@cati.ru

Ключевые слова: термоядерный реактор, теплообменная система токамака, конвективный теплообмен, теплоноситель, жидкие металлы, вторичные вихри, численное моделирование.

Прежде всего, с сожалением отметим проблему концептуального характера. Хотя интенсивно ведётся строительство международного термоядерного реактора ИТЕР, до сих пор не согласована единая концепция построения теплообменных систем токамака, нет единства по вопросу выбора теплоносителя. Это обстоятельство затрудняет планирование работ по лабораторному и численному моделированию процессов конвективного теплообмена в условиях токамака.

Авторы данного доклада убеждены в перспективности жидких металлов (ЖМ) как теплоносителей в бланкете и диверторе токамака. Однако создание жидкометаллических теплообменных систем требует преодоления серьезных проблем конвективного теплообмена в специфических условиях термоядерного реактора, то есть в условиях существенного совместного воздействия массовых сил различной природы – термогравитационной (силы плавучести) и электромагнитной (силы Лоренца). При этом теория подобия доказывает [1], что процессы гидродинамики и теплообмена любого ЖМ можно, в принципе, моделировать с помощью любого другого ЖМ. Разумеется, этот общий вывод относится и к жидким металлам и сплавам ядерной энергетики, таким как натрий, литий, свинец, сплавы свинец-висмут, свинец-литий и др. Выбор ЖМ в качестве рабочей среды для лабораторного моделирования конвективного теплообмена следует делать из соображений удобства. Экспериментальная практика показывает, что наиболее удобной модельной жидкостью является ртуть. Объединенная научная команда НИУ «МЭИ» и Объединенного института высоких температур (ОИВТ РАН) на протяжении многих лет использует уникальный ртутный МГД-комплекс, разнообразные микродатчики и зондовые методы, позволяющие проводить 3-мерные измерения осредненных полей и пульсаций скорости, температуры в довольно широких диапазонах критериев Рейнольдса (Re), Грасгофа (Gr), Гартмана (Ha) [2]. Такие измерения технически возможны только на ртути, но результаты измерений методами теории подобия могут быть пересчитаны на реальные жидкометаллические теплоносители ядерной энергетики, указанные выше. В ходе подробных исследований были впервые обнаружены ранее неизвестные весьма опасные режимы теплообмена [2]:

 крайне неоднородное распределение локальных коэффициентов теплоотдачи по периметру сечения теплообменного канала, вплоть до образования зон ухудшенного теплообмена («горячих пятен»);

– развитие в потоке и, как следствие, в стенке теплообменного канала низкочастотных пульсаций температуры аномально высокой амплитуды (опасная термокачка).

Именно эти весьма опасные эффекты авторы имели в виду как «проблемы теплообмена» в заголовке данного доклада. Важно отметить, что подобные проблемы возможны не только в реакторе-токамаке, но, по нашим оценкам, и в крупномасштабных теплообменных системах с тяжелым ЖМ в быстрых реакторах нового поколения (БРЕСТ и др.). Физическая причина указанных опасных эффектов – развитие в потоке ЖМ вторичных течений термогравитационной природы в форме крупных вихрей. Такие вторичные вихри могут развиваться как при отсутствии магнитного поля (быстрый реактор), так и при наличии магнитного поля (токамак). В последнем случае магнитное поле может способствовать развитию и устойчивому существованию вторичных вихрей. Отметим, что рассматриваемые эффекты проявляются в разной степени, в зависимости от соотношений критериев режима теплообмена – Re, Gr, Ha. Поэтому целью дальнейших исследований является расширение диапазонов этих критериев для определения «запрещённых диапазонов», которые могли бы привести к авариям теплообменных систем. Однако использованный нами ртутный МГД-комплекс МЭИ – ОИВТ РАН имел существенное ограничение: электромагнит создавал индукцию магнитного поля не более 1 Тесла, что недостаточно. В 2017 году в состав уникального ртутного МГДкомплекса МЭИ – ОИВТ РАН введен новый полностью автоматизированный ртутный стенд ОИВТ РАН, оснащённый электромагнитом с максимальной индукцией магнитного поля практически до 3 Тесла. По совокупности технических характеристик, важных для моделирования МГД-теплообмена, новый электромагнит в настоящее время не имеет аналогов в мире. Появилась возможность воспроизвести в экспериментах реальные условия теплообмена жидкого металла в токамаке – термоядерном источнике нейтронов (ТИН).

Первые результаты опытов являются обнадёживающими. По-видимому, в условиях ТИН вышеуказанные опасные режимы МГД-теплообмена могут быть подавлены, если теплообменный канал представляет собой круглую трубу в поперечном магнитном поле. То есть круглая труба – допустимая конфигурация в теплообменнике ТИН.

Разумеется, мы помним о проблеме возрастания гидравлического сопротивления в магнитном поле токамака, которая в рамках данной работы не обсуждается, но является ся весьма существенной. В связи с этой проблемой представляется перспективной идея [3] замены жидкого металла на альтернативные теплоносители – расплавы солей: фториды лития и бериллия (LiF.BeF2) или фториды щелочных металлов (LiF.NaF.KF), возможно, с добавками фторида урана или фторида тория. По сравнению с жидкими металлами эти среды слабо электропроводны, поэтому МГД-потери давления малы. Однако воздействием магнитного поля, как и воздействием термогравитационной конвекции на турбулентное течение и теплообмен расплава соли в условиях токамака пренебречь нельзя. В связи с этим общими усилиями специалистов МЭИ – ОИВТ РАН создан и введен в эксплуатацию стенд, моделирующий МГД теплообмен расплава соли в условиях ТИН. Для создания магнитного поля индукцией до 3 Тесла используется вышеупомянутый электромагнит. Планируются адресные исследования: необходимо выяснить, возможно ли в теплообменных системах с расплавами солей развитие опасных эффектов, аналогичных обнаруженным на жидких металлах.

Работа поддерживается мегагрантом правительства РФ № 14.Z50.31.0042.

Список литературы

- 1. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Издательство МЭИ, 2003. 548 с.
- Belyaev I.A., Listratov Ya.I., Melnicov I.A. et al. Specific features of liquid metal heat transfer in a tokamak reactor // Magnetohydrodynamics. – 2013. – Vol. 49. – N 1. – P. 177.
- 3. Азизов Э., Алексеев П., Велихов Е., Гуревич М. и др. Зеленая ядерная энергетика. В мире науки. 2012. № 9. С. 14–21. / www.sciam.ru/

Обеспечение технологии тяжелого жидкометаллического теплоносителя в реакторных установках нового поколения

Асхадуллин Р. Ш., Стороженко А. Н., Мельников В. П., Легких А. Ю., Ульянов В. В.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>raskhadullin@ippe.ru</u>

Ключевые слова: реакторная установка, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, массообменный аппарат, датчик контроля кислорода, диспергатор газа, фильтр теплоносителя, фильтр газовый, нормы, химический анализ.

Выбор теплоносителя реакторной установки в значительной степени определяет её инженерный облик и параметры безопасности. Тяжелые жидкометаллические теплоносители (свинец, свинец-висмут) – взрывопожаробезопасные эффективные теплоносители, позволяющие отводить тепло при высоких температурах и малых давлениях. В настоящее время на национальном и международном уровнях на основе современных стандартов безопасности, устойчивости, экономической эффективности, физической защиты, разрабатываются реакторные установки нового поколения со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. В России завершается техническое проектирование реактора «БРЕСТ-ОД-300», завершен технический проект реакторной установки «СВБР-100». На стадии предварительного технического проектирования находится китайский реактор с тяжелым теплоносителем «CLEAR-I». В Европе разрабатываются следующие реакторные установки: «ALFRED» (европейский демонстрационный реактор со свинцовым теплоносителем IV поколения), MYRRHA (исследовательский реактор со свинцово-висмутовым теплоносителем на основе электроядерной системы), ELFR (европейский коммерческий реактор со свинцовым теплоносителем IV поколения).

Имеющийся в России значительный опыт работы с тяжелыми теплоносителями (реакторные установки подводных лодок, циркуляционные стенды) показывает, что для безаварийной и безопасной эксплуатации установок с данными теплоносителями необходимо выполнение комплекса по технологии теплоносителя.

Необходимость выполнения специального комплекса мер определяется следующими особенностями использования теплоносителя:

 образование твердофазных шлаков на основе оксидов свинца при контакте с кислородом (в случае разгерметизации реактора), необходимы специальные методы очистки теплоносителя;

 взаимодействие с конструкционными сталями (коррозионные повреждения поверхности в случае отсутствия защитных оксидных покрытий), необходимы специальные методы обеспечения условий формирования и поддержания оксидных покрытий на поверхностях сталей;

 накопление твердофазных оксидов металлических примесей на поверхности теплоносителя и теплообменных поверхностях (при отсутствии непрерывной фильтрации теплоносителя), необходимо использование высокотемпературных фильтров теплоносителя;

 накопление аэрозолей теплоносителя и твердофазных оксидов металлических примесей в защитном газе реактора (при отсутствии фильтрации защитного газа), необходимо использование специальных фильтроматериалов для газовых фильтров.

В докладе рассмотрены современные подходы к технологии тяжелого жидкометаллического теплоносителя, а также представлена информация о стендовой базе АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».

Концептуальные предложения по водоохлаждаемому реактору со сверхкритическими параметрами (обзор зарубежных и российских разработок SCWR)

Махин В. М., Чуркин А. Н.

ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, makhin@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: водоохлаждаемый реактор, сверхкритические параметры, корпус.

В настоящее время в различных странах (Россия, США, Япония, Германия, Канада, Китай и др.) выполнены или выполняются концептуальные проекты водоохлаждаемого реактора со сверхкритическими параметрами (SCWR), которые рассматриваются в данной обзорной работе. Более детально рассмотрены концепции корпусного и канального реакторов HPLWR и Canadian SCWR, разработка которых завершена за последние пять лет. Предлагается упрощение схемы энергоблока и его оборудования путем перехода на одноконтурную схему циркуляции теплоносителя со снижением капитальных затрат и эксплуатационных расходов. При указанном подходе и температуре теплоносителя на выходе из реактора 500–625 °C снижение капитальных затрат на строительство энергоблоков с электрической мощностью 1000–1200 МВт оценивается 20–40 %. Рассматриваются реакторы с тепловым и быстрым, а также со смешанным спектром нейтронов в активной зоне с различными схемами циркуляции теплоносителя.

Анализ влияния процессов вихреобразования и закрутки потока на безопасность работы транспортных ЯЭУ интегрального типа

Митрофанова О. В., Уртенов Д. С., Ивлев О. А.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, omitr@yandex.ru

Ключевые слова: ядерные энергетические установки, гидродинамика, теплообмен, моделирование, вихревые структуры, закрученные потоки.

Изучение процессов, приводящих к генерации устойчивых вихреобразований в каналах сложной неометрии, связано с необходимостью исключения резонансных эффектов в элементах теплогидравлического контура нового поколения судовых реакторов ядерных энергетических установок (ЯЭУ) интегрального типа, так как при совпадении частот акустических колебаний теплоносителя с собственными частотами элементов внутрикорпусных устройств ЯЭУ может существовать опасность возникновения вибрационных процессов, а также режимов термоциклирования, приводящих к снижению прочностных характеристик теплообменных поверхностей, межконтурным течам и другим негативным последствиям.

В настоящей работе предприняты расчетно-теоретические исследования по моделированию процессов гидродинамики и теплообмена в элементах теплогидравлического тракта судовой реакторной установки нового поколения. В качестве объектов моделирования выбраны участки контура циркуляции теплоносителя коллекторной и трубопроводной систем, геометрия которых может приводить к генерации устойчивых крупномасштабных вихреобразований, обуславливающих появление широкого спектра частот акустических колебаний теплоносителя.

Рассмотрено несколько тестовых задач, соответствующих случаям течения, которые могут иметь место при петлевом подключении, пусковом и переходных режимах работы реактора, из-за возникновения закручивающего момента за счёт конструктивных особенностей или из-за рассогласованности работы насосов.

При помощи программного пакета ANSYS CFX смоделированы течения теплоносителя в упрощенной геометрии напорного коллектора реакторной установки интегрального типа. Проведено 3 серии вычислительных экспериментов: без закрутки потока во входных патрубках (на выходе из ГЦН), с закруткой потока во входных патрубках с учетом влияния ГЦН и с неравномерным расходом теплоносителя по петлевым подводам. Проведено сравнение расчетных результатов, полученных с помощью различных моделей турбулентности и модели невязкой жидкости.

Полученные результаты численных расчетов по определению полей скорости, давления, завихренности, спиральности и температуры позволяют выявить факторы, влияющие на возникновение крупномасштабной закрутки потока, генерацию широкого спектра частот акустических колебаний теплоносителя и вероятность появления режимов термоциклирования в динамическом режиме работы реактора.

Вычислительные эксперименты показали, что результаты расчетов, проведенных с использованием различных моделей турбулентности, хотя и имеют существенные различия, но, вместе с тем, указывают на один и тот же качественный результат: при выбранной схеме подвода теплоносителя в напорном коллекторе должны возникать крупномасштабные вихри, частота вращения в которых и амплитуда генерируемых ими колебаний зависят от выбранной геометрии и величины расхода теплоносителя. На основе сравнительного анализа применимости моделей турбулентности можно сделать вывод, что наиболее адекватными являются результаты, полученные при использовании модели Shear Stress Transport.

Результаты расчетов подтверждают полученные ранее экспериментально факты образования крупномасштабных вихрей в напорном коллекторе реактора моноблочного типа, что является причиной значительных пульсаций давления, может приводить к акустическим колебаниям в звуковом диапазоне и служить источником вибраций в активной зоне. Результаты вычислительных экспериментов показали, что в РУ моноблочного типа РИТМ – 200 возможна генерация устойчивых крупномасштабных вихреобразований.

Процесс возникновения крупномасштабных вихреобразований, приводящий к генерации низкочастотных акустических колебаний в трубопроводной системе компенсации давления ядерного реактора, был рассмотрен на примере моделирования турбулентного течения воды на участке трубопровода сложной геометрии для случаев повышения и понижения мощности реакторной установки. Соответствующие этим случаям две серии вычислительных экспериментов были условно названы «горячей» и «холодной» задачами.

В «горячей» задаче рассматривалось условие увеличения мощности ядерного реактора, соответствующего скачку давления $\Delta P = 0,3$ МПа при номинальном давлении $P_0 = 16,0$ МПа. Под действием перепада давления горячая вода из ядерного реактора при температуре 300 °С начинает движение от первого к конечному расчетному сечению вдоль трубопровода, заполненного в начальный момент времени водой при температуре 100 °С.

В «холодной» задаче ставится обратное начальное условие. Под действием отрицательного перепада давления $\Delta P = -3$ МПа движение холодной воды при температуре 100°С начинается от последнего к 1-му сечению. При этом температура воды в трубопроводе падает от 300 до 100 °С при заполнении всего трубопровода холодной водой из компенсатора давления.

Результаты расчетов показывают, что в обоих случаях при условиях «горячей» и «холодной» задач в конечном по ходу течения теплоносителя сечении трубопровода формируется закрученное течение в масштабе всего поперечного сечения канала. При этом угловая скорость вращения потока сравнима с собственной частотой работы насосов.

Полученные расчетные результаты указывают также на тот факт, что распределение поля завихренности в исследуемом нестационарном процессе течения теплоносителя топологически совпадает с полем локальной температуры потока в трубопроводах. Поэтому выявление условий устойчивых крупномасштабных вихрей дает возможность избежать режимов термоциклирования и повысить надежность и долговечность трубопроводных систем.

Результаты проведенных исследований предназначены для выработки рекомендаций по оптимизации конструкций и повышению работоспособности судовых ЯЭУ нового поколения с реакторными установками интегрального типа.

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» при поддержке гранта РФФИ 16-08-00687-а и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ «МИФИ» (Договор No. 02.a03.21.0005).

Перспективные реакторные технологии 4-го поколения и их развитие в рамках Международного форума «Поколение IV»

Ашурко Ю. М.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>ashurko@ippe.ru</u>

Ключевые слова: перспективные реакторные технологии, быстрый натриевый реактор, быстрый свинцовый реактор, быстрый газовый реактор, сверхкритический водяной реактор, жидкосолевой реактор, сверхвысокотемпературный газовый реактор, проектные критерии безопасности.

Дана информация по работам, проводимым по этим технологиям в рамках Международного форума «Поколение IV» (МФП): представлены дорожные карты их реализации и текущее состояние работ. Дано описание структуры МФП, ее глобальных целей, подходов и направлений их реализации.

В докладе представлен обзор перспективных реакторных технологий, которые рассматриваются в качестве реакторных технологий 4-го поколения:

- быстрый натриевый реактор (РБН);
- быстрый свинцовый реактор (БСР);
- быстрый газовый реактор (БГР);
- сверхкритический водяной реактор (СКВР);
- жидкосолевой реактор (ЖСР);
- сверхвысокотемпературный газовый реактор (СВТГР).

Дана информация по работам, проводимым по этим технологиям в рамках Международного форума «Поколение-IV» (МФП): представлены дорожные карты их реализации и текущее состояние работ. Дано описание структуры МФП, ее глобальных целей, подходов и направлений их реализации.

Российская Федерация участвует в работах по четырем реакторным технологиям из шести, разрабатываемых в рамках МФП: РБН, БСР, СКВР и ЖСР.

Наибольшее внимание уделено обсуждению работ, проводимых по РБН, которые являются наиболее проработанной реакторной технологией.

В рамках Проектного соглашения МФП по системной интеграции и оценке РБН проводится оценка концепций перспективных проектов РБН на предмет их соответствия требованиям, предъявляемым к установкам 4-го поколения. В настоящее время на рассмотрение в рамках данного Проектного соглашения заявлены концепции:

- японского JSFR;
- европейского ESFR;
- южнокорейского KALIMER;
- американского AFR-100,
- российского БН-1200.

Планируется представление на рассмотрение также концепции китайского проекта CFR1200.

Освещена деятельность рабочей группы МФП по разработке проектных критериев безопасности для РБН 4-го поколения. В настоящее время проведена сравнительная оценка требований российских нормативных документов по безопасности, использованных при разработке проекта БН-1200, и проектных критериев безопасности для РБН 4-го поколения, разработанных данной рабочей группой МФП, которая выявила их соответствие друг другу.

Отмечается также деятельность МФП по анализу и сбору информации об имеющейся в странах-членах МФП экспериментальной базы для проведения НИОКР в обоснование перспективных реакторных технологий 4-го поколения.

Сравнительные оценки отечественных и зарубежных подходов к развитию перспективных реакторных технологий и топливного цикла в атомной энергетике

Глебов А. П.

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

Ключевые слова: водоохлаждаемые реакторы Поколения 3+, реакторы БН и БРЕСТ, МОХ-топливо, замкнутый топливный цикл, двухкомпонентная атомная энергетика, реакторы со спектральным регулированием, реакторы Поколения IV охлаждаемые водой сверхкритического давления – SCWR, ВВЭР-СКД, экспериментальный реактор с СКД теплоносителя.

В развитии атомной энергетики в мире можно выделить три этапа, разделенных большими авариями на АЭС: «Три-Маил-Айленд» (США, 1979 г.), Чернобыльской АЭС (СССР, Украина, 1986 г.) и АЭС «Фокусима-1» (Япония, 2011 г.).

На первом этапе до 1990 г. происходило бурное развитие атомной энергетики, когда вводилось в год по 20–30 блоков и их количество выросло до 391 при суммарной мощности 321 ГВт, затем последовало резкое снижение (после 90-х годов), выведение многих блоков из эксплуатации, достигших предельного срока – 40 лет. Так за постфокусимский период с 2011–2016 гг. введены 24 блока, а выведены 17 (за 5 лет добавилось 7 блоков и 13 ГВт энергии). В результате на 01.12.2016 суммарная установленная мощность 450 блоков составляла 392 ГВт.

При этом снизились цены на уран и газ, а последнее привело к повышению конкурентоспособности газовых ТЭС (ПГУ с КПД до 55–60 %).

Доля мирового производства электроэнергии на АЭС упала с 17,6 % (1995 г.) до 10,7 % (2015 г.). Для повышения конкурентоспособности АЭС требовалось существенное повышение уровня безопасности при упрощении и удешевлении собственно проектов, в первую очередь реакторного отделения (ядерного острова – ЯО), стоимости оборудования энергоблока, строительства и монтажа на площадке, снижение затрат при эксплуатации. В результате были разработаны и уже строятся водоохлаждаемые реакторы «Поколения 3+». Это реакторы фирмы Westinghouse (США) АР-1000, АРR-1400 (Корея), кипящий – General Electric (США) ESBWR-1650, Areva (Франция) EPR (1600 MBт), а также в России Росатом – АЭС-2006 (1200 MBт) и ВВЭР-ТОИ (1250 MBт). В работе представлены результаты сравнения экономической эффективности этих проектов.

В январе 2000 г. по инициативе Министерства энергетики США (DOE) была начата программа «Международный форум «Поколение IV» (GIF или МФП-4). Целями программы МФП-4 являлось определение основных направлений НИОКР по разработке перспективных ЯЭУ 4-го поколения. В результате оценки, выполненной группой, состоявшей из 100 экспертов – ведущих специалистов по атомной энергетике, были выбраны шесть базовых концепций ЯЭУ для разработки в рамках программы МФП-4. В данной работе рассматриваются только три из указанных шести концепций: это реакторы, охлаждаемые натрием (SFR), свинцом (LFR) и водой сверхкритического давления (SCWR).

Под руководством МАГАТЭ было проведено исследование (2005–2007 г.) по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (International Project Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles – INPRO) в котором принимало участие 8 стран с развитой атомной энергетикой с целью определить ядерно-энергетическую систему, основанную на замкнутом топливном цикле (ЗТЦ) с быстрыми реакторами, готовую к развертыванию в ближайшие 20–30 лет, основанную на испытанных технологиях, таких как натриевый теплоноситель, таблеточное смешанное оксидное (MOX) топливо и усовершенствованная технология водной переработки.

В последние годы темпы развития атомной энергетики существенно снизились, разведанные запасы урана увеличились до 5,7 млн т с себестоимостью менее 130 долл./кг (этих запасов при существующей структуре атомной энергетики хватит на ~70 лет) и до 7,6 млн т с себестоимостью менее 260 долл./кг (этих запасов хватит на ~120 лет), в этом случае проблемы с хранением отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и топливообеспечения путем реализации в атомной энергетике ЗТЦ могут сдвинуться к ~2050 г.

Рассматриваются особенности развития атомной энергетики, реализации ЗТЦ в разных странах и преимущественно в России, этапы, сроки их выполнения, возникающие проблемы. Обсуждается использование водоохлаждаемых реакторов, в том числе и SCWR с быстрым спектром нейтронов в системах с ЗТЦ.

Современные подходы к анализу тяжелых аварий на внутрикорпусной стадии для АЭС с РУ ВВЭР

Пантюшин С. И., Литышев А. В., Гаспаров Д. Л., Николаева А. В., Аулова О. В., Букин Н. В., Быков М. А.

ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, pantyushin@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: ВВЭР, тяжелые аварии, программные коды, реакторная установка, РК СОКРАТ, ЗПА, ТА, РУЗА, РУТА.

В соответствии с требованиями Федеральных норм и правил в области использования атомной энергетики расчетный анализ тяжелых аварий для АЭС с РУ ВВЭР является обязательной частью «Отчета по обоснованию безопасности» и «Руководства по управлению запроектными авариями (включая тяжелые аварии)». Материалы по анализу тяжелых аварий также входят в состав технического проекта АС и РУ. Объем и содержание соответствующих анализов определяются требованиями норм и правил (для российских АЭС с РУ ВВЭР), требованиями контрактов (для зарубежных АЭС с РУ ВВЭР). Номенклатура и критерии для анализов определяются в составе ТЗ на АС и РУ, а также требованиями норм и правил.

Наибольший интерес для ОКБ «ГИДРОПРЕСС», как организации Главного конструктора РУ, представляет анализ внутрикорпусной стадии тяжелых аварий с оценкой времени наступления характерных событий, поведения основных параметров РУ, выхода за пределы корпуса массы и энергии теплоносителя и материалов активной зоны (после разрушения корпуса реактора).

Выполняемые работы направлены на демонстрацию эффективности мер по управлению тяжелыми авариями в части смягчения последствий и прекращения развития аварии, а также на разработку исходных данных для проектирования систем и оборудования, применяемого для управления тяжелыми авариями. Всесторонний анализ тяжелых аварий требует учета большого количества процессов и явлений, начиная с исходного события и заканчивая разрушением физических барьеров (первый контур и защитная оболочка). В анализах должны учитываться теплогидравлические, термомеханические и физико-химические процессы. В соответствии с требованиями нормативных документов для таких анализов должны применяться аттестованные программные средства.

В ОКБ «ГИДРОПРЕСС» основным средством для анализа тяжелых аварий для АЭС с РУ ВВЭР является аттестованный расчетный код СОКРАТ/В1. Код разрабатывался в 2000–2010 годах в России, а в 2010 прошел процедуру аттестации.

Совместно с разработчиками кода СОКРАТ – ИБРАЭ РАН проводятся работы по верификации, модернизации и совершенствованию кода. С учетом внедрения новых модулей и моделей круг задач, решаемых в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» с использованием РК СОКРАТ, постоянно расширяется.

В рамках границ проектирования ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (Главного конструктора РУ ВВЭР) в части внутрикорпусной стадии тяжелых аварий решаются следующие задачи:

– обоснование безопасности реакторной установки в ходе тяжелых аварий;

– обоснование аварийных инструкций для запроектных (РУЗА) и тяжелых аварий (РУТА);

 определение параметров массы и энергии расплава, теплоносителя и водорода, поступающих из РУ в ЗО;

 обоснование требований, эффективности и работоспособности системы и оборудования для управления тяжелыми авариями;

– выполнение НИОКР и других работ, направленных на поддержку проектирования и эксплуатации АЭС с РУ ВВЭР.

В докладе представлены методические подходы и качественные результаты решения данных задач применительно к проектируемым и действующим АЭС с РУ ВВЭР.

Свойство подобия гидродинамики раздающих коллекторных систем с различными условиями подвода жидкости в коллектор

Дельнов В. Н.

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

Ключевые слова: подобие гидродинамики, раздающая коллекторная система, плоская и цилиндрическая системы, струйно-вихревое течение, проточная часть.

Коллекторные системы являются характерными элементами проточной части основного оборудования и вспомогательных систем ЯЭУ. Для них характерны сложная конструкция, что приводит к необходимости оптимизации их теплогидравлических характеристик.

Цель работы – обоснование подобия гидродинамики проточных частей осесимметричных раздающих коллекторных систем с различными условиями подвода жидкости в коллектор.

Выполнено сопоставление гидродинамики проточной части цилиндрической РКС с центральным подводом и боковым отводом жидкости, плоской РКС с центральным подводом и боковым отводом жидкости, цилиндрической РКС с боковым подводом и центральным отводом жидкости, плоской РКС с боковым подводом и центральным отводом жидкости.

Установлено неизвестное ранее свойство гидродинамики проточных частей осесимметричных раздающих коллекторных систем с обратным поворотом жидкости проявления идентичной гидродинамики проточных частей осесимметричных плоских и цилиндрических раздающих коллекторных систем с обратным поворотом жидкости при различных местоположениях подвода жидкости в коллектор.

Указанное свойство основано на присутствии в проточной части указанных РКС струйно-вихревого течения жидкости, универсальности характерных для этого типа течения свойств жидкости, идентичности механизмов преобразования одних типов струй в другие и влиянии отношения коэффициентов местного гидравлического сопротивления выходного элемента и коллектора на распределение массового расхода на выходе из коллектора.

Данное свойство обусловлено расширением свободных и полузатопленных струй и, соответственно, снижением средней скорости жидкости в них за счет ее торможения, преобразованием затопленных струй в полузатопленные струи и наоборот, изменением положения максимальной скорости в поперечном сечении струи на ее поворотах и далее по ходу жидкости, движением отдельных полузатопленных струй вдоль перфорированных частей выходного элемента с раздачей расхода по пути, расположенных за пределами места встречи струи с выходным элементом, совпадением местоположений максимальной скорости жидкости в подающей на выходной элемент струе и массового расхода жидкости на выходе из него, прямо пропорциональной зависимостью средней скорости на выходе из выходного элемента, обратно пропорциональной зависимостью максимального массового расхода жидкости на выходе из выходного элемента, обратно пропорциональной зависимостью максимального массового расхода жидкости на выходе из выходного элемента, обратно пропорциональной зависимостью отдельной корфициентов местного гидравлического сопротивления выходного элемента и коллектора.

Тепловые трубы в атомной энергетике

Логинов Н. И., Верещагина Т. Н.

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

Ключевые слова: атомный реактор, тепловые трубы, технические решения, патенты, ядерные источники энергии

Тепловая труба представляет собой замкнутое теплопередающее устройство с естественной циркуляцией теплоносителя. Перенос тепла в тепловой трубе осуществляется паром в виде скрытой теплоты парообразования в результате процессов испарения и конденсации рабочего вещества, а возврат конденсата обратно производится действием массовых (гравитационных, центробежных) и/или поверхностных сил (поверхностное натяжение жидкости).

Термин «тепловая труба» впервые был использован в 1963 году Д.М. Гровером (Лос-Аламосская национальная лаборатория, США). Однако первое техническое решение по использованию тепловых труб в ядерном реакторе было опубликовано уже в 1957 году в патенте GB785886 «Improvements in o relating to Nuclear Reactors» (заявка от 1955 г.). В указанном патенте предлагалось передавать тепло от активной зоны ядерного реактора с помощью труб с испаряющейся жидкостью. Чуть позже в патенте GB10022354 «Nuclear Reactor having a Vaporisible Coolant» (заявка от 1962 г.) предлагался ядерный реактор, использующий испаряющуюся жидкость в качестве теплоносителя и замедлителя в реакторе под давлением. И только в 1968 году в патенте GB1108499 «Cooling System for Nuclear Reactor» (заявка от 1965 г.) употребляется термин «тепловая труба».

К настоящему времени имеется более сотни патентов, в которых предлагаются технические решения по использованию тепловых труб в ядерной энергетике. В научно-технической литературе опубликовано еще больше статей по разработкам ядерных реакторов с тепловыми трубами.

В докладе приведен обзор технических решений по использованию тепловых труб в ядерной энергетике, опубликованных в патентной литературе более чем за 60 лет, а также приведены данные по применению тепловых труб в разрабатываемых и действующих энергоустановках с ядерным топливом.

Теплофизические аспекты проекта РИФМА

Аогинов Н. И., Верещагина Т. Н. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, loginov@ippe.ru

Ключевые слова: атомный реактор, автономные модули, тепловые трубы, литий, тепловыделяющие элементы, фотоэлементы, инфракрасное излучение.

Автономные ядерные электрогенерирующие установки малой мощности, от единиц до сотен киловатт, представляют существенный интерес для электроснабжения удалённых от централизованных сетей объектов гражданского и военного назначения. Происходящая в настоящее время очистка арктического побережья России от «мусора» показывает насколько неприемлемо использование в этих районах дизель-генераторов.

Привлекательно использовать здесь известные разработки космических ядерных установок БУК и ТОПАЗ с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую. Они полностью автономны, то есть не требуют обслуживания, но имеют низкий системный КПД (3–5%), большие тепловые выбросы, отрицательно влияющие на экологическую ситуацию, и недостаточно обоснованный длительный ресурс работы. Разрабатываемые термоэмиссионные электрогенерирующие каналы могут обеспечить КПД преобразования 10–15%. Машинные способы преобразования (циклы Ренкина, Брайтона, Стирлинга) обеспечивают более высокий КПД, но требуют обслуживания. Известно, что удельные технико-экономические характеристики установок малой мощности существенно хуже, чем у крупных установок. Поэтому требуются новые технические решения, не только удовлетворяющие потребности в электроэнергии, но и приемлемые экономически, обеспечивающие пассивную безопасность, не требующие обслуживания.

В 2017 году, в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» предложена концепция инновационной ядерной энергетической установки малой мощности для автономного снабжения электричеством объектов, удалённых от централизованных энергосистем. Рассмотрены установки с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую за пределами активной зоны. Электрическая мощность до 10 и до 100 кВт. Особенностью каждой установки является полностью пассивная система передачи тепла от активной зоны реактора до конечного поглотителя – атмосферного воздуха. В качестве преобразователей энергии рассматриваются фотоэлектрические элементы, работающие в инфракрасной области спектра. Активная зона состоит из автономных модулей, включающих тепловыделяющие элементы и тепловые трубы.

Охлаждение тепловыделяющих элементов осуществляется испарением лития, теплота испарения переносится высокотемпературными тепловыми трубами за пределы активной зоны и передаётся излучением на фотоэлементы. Непреобразованное тепло отводится от фотоэлементов низкотемпературными тепловыми трубами к воздушному теплообменнику и сбрасывается в атмосферу за счёт естественной циркуляции воздуха. Таким образом, энергоустановка не содержит движущихся элементов и механизмов, за исключением органов управления реактором, и может работать автономно, без обслуживающего персонала. Полное название энергоустановки: «Реактор Испарительного охлаждения, с Фотоэлектрическим преобразованием, Малой мощности, Автономный». Краткое название: РИФМА. Предполагаемое основное назначение – электроснабжение автономных объектов, расположенных в Арктике. Проработаны варианты шахтного расположения установки в зоне вечной мерзлоты без отрицательных воздействий на окружающую среду. Проработано и рассчитано около десятка вариантов конструкции модулей активной зоны и её компоновки. В данном докладе рассматриваются только теплофизические аспекты этих проработок.

Конференции как инструмент сохранения знаний научной школы теплофизики ФЭИ

Верещагина Т. Н.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>vtn@ippe.ru</u>

Ключевые слова: научная школа, теплофизика, конференции, сохранение знаний.

В 1955 году, через год после образования теплотехнического отдела, в Лаборатории В, правопреемником которой является Физико-энергетический институт, была проведена «Всесоюзная научно-техническая конференция по использованию жидких металлов в качестве теплоносителей». На ней обсуждались результаты и планы работ по освоению жидких металлов в качестве теплоносителей ЯЭУ.

С тех пор было проведено еще 40 крупных научно-технических мероприятий с различным статусом: от отраслевого научно-технического семинара, до международной конференции. В докладе представлен обзор теплофизических конференций, проведенных в Физико-энергетическом институте.

Первые конференции проводились по отдельным наиболее актуальным в текущий момент проблемам: изучение свойств и освоение технологии жидких металлов (1955, 1962, 1972 гг.), проблемы использования воды как теплоносителя ЯЭУ – кипение, кризис теплообмена, проблемы теплообмена в двухфазных теплоносителях (1970, 1976, 1977 гг.). Были проведены конференции по приборам и методам теплофизических измерений (1980, 1986, 1996 гг.); конференции по теплофизическим исследованиям для космоса (1978, 1984 гг.); по статистическим методам исследования и точности расчетов (1983, 1985 гг.). Конференция 1979 года была посвящена тепловым трубам, на конференции 1982 года рассмотрены проблемы гидродинамики и вибрации оборудования ЯЭУ. Во времена перестройки были проведены две конференции посвященные конверсии – применению имеющихся знаний и технологий в неядерных отраслях промышленности (1991, 1994 гг.). В 2001, 2003 гг. прошли конференции по численным методам расчета – теплогидравлическим кодам. После аварии на Чернобыльской АЭС существенно повысилось внимание к вопросам безопасности, которые нашли отражение в тематике всех теплофизических конференций, проведенных после 1990 года. С 2010 по 2016 гг. конференции проводились ежегодно, и тематика каждой из них включала практически весь спектр вопросов, касающихся проблем теплофизики и безопасности ЯЭУ, независимо от типа теплоносителя и назначения реакторных установок.

По материалам конференций можно проследить развитие направлений исследований, проблемы и задачи, стоящие перед атомной отраслью России.

В докладе приведены также статистические данные по количеству участников, по публикациям тезисов и докладов.

На примере рассмотренных теплофизических конференций показано, что участие в научно-техническом мероприятии – это наиболее оперативный способ представления широкой научной общественности результатов научных исследований, в том числе и результатов научной школы теплофизики Физико-энергетического института. Кроме того, это и наиболее оперативный способ получения оценки научных и практических результатов со стороны научного сообщества.

На примере теплофизических конференций ФЭИ показано, что научнотехнические конференции играют важную роль в сохранении знаний. По сути, они решают главную задачу управления знаниями – построить мост между теми, кому необходимы знания, и теми, у кого они есть.

Разработка метода учёта неоднородных распределений параметров одно- и двухфазных потоков при выводе интегралов типа Лайона

Корниенко Ю. Н.

ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, kornienko_un@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: аналитические методы, коэффициенты пристенного трения, тепло- и массообмена, обобщённые формы интегралов Лайона, квазиодномерный метод.

Совершенствование 1D кодов «улучшенной оценки», используемых в анализах безопасности современных активных зон BBЭP, требует более строгого и детального учёта 3D-мерных структур потока, что является весьма сложной и трудоёмкой проблемой, как в экспериментальных, так и численно-аналитических исследованиях. Причины трудностей заключены в: широком диапазоне изменения режимных условий; возникновении областей с неравновесным двухфазным потоком; многообразии физических эффектов, сопровождающих течение; отсутствии и/или неполноте необходимых моделей для двухфазных неравновесных турбулентных потоков (ДНТП); сложной субканальной геометрии сборок ТВС. В известных отечественных 1D кодах контурного типа – КОРСАР, СОКРАТ и субканального типа – SC1, ТИГРСП и др., как правило, использованы корреляции на основе допущения с гомогенным равномерным распределением параметров и рядом поправочных эмпирических констант, что может вносить заметные «дефекты» при расчётах массы, импульса и энергии в контрольных объёмах (КО) этих кодов. В этой связи суммарные ошибки накапливаются по КО расчётной области, приводя к неприемлемым результатам при верификации 1D кодов.

Следует отметить, что эмпирические рекомендации по теплообмену и трению, хотя экономичны в численных реализациях, но ограничены в предсказании теплогидравлических характеристик, например, пузырьковых потоков теплоносителей при высокой термической неравновесности, типичных для аварийных режимов ЯЭУ. Физический смысл недостаточности такого «гидравлического приближения» связан с неучётом влияния указанных неодномерных распределений параметров.

В настоящее время не существует законченной и строгой системы рекомендаций для физико-математически обоснованного пространственно-временного масштабирования при переходе от 3D мерного описания к 1D форме даже для однофазных турбулентных потоков. Это связано, прежде всего, с незавершённостью собственно теории турбулентности и с тем, что прямое численное моделирование требует разрешения пространственно-временных шагов на масштабах много меньших размеров турбулентного «моля» и частоты его пульсаций приводя к исключительно высоким затратам памяти, времени счёта и последующих проблем «сглаживания» полученных полей переменных. При этом трудности моделирования в ещё большей степени возрастают для двухфазных неравновесных турбулентных потоков.

Одним из решений этих проблем является разработка аналитического метода масштабирования («скэйлинга») исходных моделей законов сохранения ДНТП, учитывающего вклад пространственных, в том числе неоднородных (гетерогенных) распределений, параметров и переводящего его из 3D в класс квазиодномерных (к1D) моделей теплогидравлики для использования в расчётах и кодах анализа аварийных ситуаций ЯЭУ. По сути, именно гетерогенные поперечные неоднородности создают дополнительные эффекты, требующие учёта в таких к1D моделях. Причём, не только из-за массовых сил (плотность в задачах смешанной конвекции), но и других компонент переноса субстанций: массы, импульса и энергии, а также их источников и стоков.

В работе представлен обобщённый аналитический квази-1D метод учёта эффектов 3D структуры потока в этих коэффициентах, расширяющий их область применения для условий двухфазного неравновесного потока теплоносителя в элементах ЯЭУ. В частности, таких как: кипение с недогревом, «седлообразные» профили парогазосодержания, вклад естественной конвекции, впрыск (отсос) и т. п. В данном подходе сочетаются методы на основе применения обобщённых массовых сил В.К. Щукина и обобщённого разделения переменных А.Д. Полянина. Представлен аналитический вывод обобщённых форм интегралов типа Р. Лайона для искомых коэффициентов с отражением вклада отмеченных неоднородных распределений переменных. Показано выполнение «принципа соответствия» при асимптотических переходах к предшествующим теориям и указаны примеры применения предложенного метода, включая аномальное поведение коэффициентов трения и теплообмена, для условий «седлообразных» профилей фаз потока, характерных для неравновесных процессов.

Разработаны обобщённые Лайон-подобные интегральные соотношения (аналитические формы) для коэффициентов трения, тепло- и массообмена ДНТП на основе форм-факторов, являющихся мерой неоднородности (гетерогенности) распределений переменных, для труб/щелей/колец и сборок ТВС ЯЭУ. Они отражают влияние полей обобщённых массовых сил на профили потока импульса, тепла и массы, учитывающих пространственную неоднородность ДНТП теплоносителя.

Предложенный квазиодномерный метод представляет основу для наиболее полного, теоретически последовательного и строгого учета эффектов радиальной и азимутальной неоднородности, логично увязывает между собой локальные, интегральные и фрагментарные модели, необходимые для обоснования новых замыкающих соотношений теплогидравлики в каналах и ТВС.

При этом полученные аналитические соотношения и критерии обладают повышенной эвристической ценностью и являются мощным средством получения новых механистических моделей и полуэмпирических зависимостей исследуемых явлений. Например, таких как влияние эффектов естественной конвекции, диссипации, а также источников (стоков) субстанций. По сути, именно эти трансверсальные изменения профилей параметров и представляют дополнительные эффекты для одномерной модели. Причем ими является не только профили плотности, (в задачах смешанной конвекции), но и другие компоненты в процессах переноса импульса, тепла и массы, также как их источники (и стоки) в поперечном сечении канала.

Приведённые примеры верификации к1D подхода на имеющемся массиве российских опытных данных показывают недостаточность используемых ныне моделей, основанных на «псевдо-решеточном» представлении турбулизирующего действия пузырьков, а также моделей, основанных на, так называемой, «пузырьковой шероховатости». Тогда как, к1D описание коэффициентов трения и теплообмена, основанных на использовании форм-факторов в рамках простейшей модели с кусочно-постоянной аппроксимацией профиля истинного объёмного парогазосодержания, оказалось вполне адекватным, включая области их аномального поведения, в широком диапазоне режимных условий.

О некоторых проблемах описания и обобщения экспериментальных данных о критических тепловых потоках при кипении в каналах

Сергеев В. В.

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

Ключевые слова: кипение, кризис теплоотдачи, критический тепловой поток, экспериментальные данные, эмпирические корреляции, «скелетные» таблицы, тепловой баланс, мультиколлинеарность.

Кризис теплоотдачи при кипении и связанное с ним резкое повышение температуры оболочек топливных стержней ограничивают мощность реакторной установки, а запас до кризиса теплоотдачи, определяемый отношением локальной плотности теплового потока к величине критического теплового потока (КТП), является одним из основных проектных критериев теплотехнической надежности активной зоны.

Исследования кризиса теплоотдачи при кипении в каналах ведутся с середины прошлого столетия и продолжаются в настоящее время. Число публикаций на эту тему исчисляется сотнями. Для определения величины КТП предложено множество эмпирических и полуэмпирических соотношений и методик, основанных на описании ограниченных массивов экспериментальных данных в достаточно узких диапазонах режимных параметров. Однако, несмотря на многолетние усилия, кризис теплоотдачи при кипении теплоносителя в каналах до сих пор остается недостаточно изученным и плохо поддающимся теоретическому описанию явлением. В докладе анализируются причины такого положения дел.

В первую очередь обращается внимание на отсутствие строгого определения кризиса теплоотдачи, проявляющееся даже в терминологии, используемой для идентификации этого явления. Так, в литературе можно встретить следующие термины: «прекращение пузырькового кипения» (departure from nucleate boiling), «осушение» (dry out), «критический тепловой поток» (critical heat flux) и наконец, просто «пережог» (burn out).

Следствием расплывчатости самого понятия кризиса теплоотдачи является отсутствие достаточно четких критериев для экспериментальной регистрации условий его наступления. Вряд ли можно назвать четкими такие, например, критерии как «подскок температуры стенки» или «повышение температуры стенки, непропорциональное подводимой мощности». Именно этим обстоятельством, в значительной мере, объясняется большой разброс экспериментальных данных о критическом тепловом потоке. Да и само понятие «критический тепловой поток» применительно к кипению в каналах далеко не однозначно.

Так, если при кипении в большом объеме возникновение кризиса теплоотдачи определяется по сути единственной независимой переменной, а именно плотностью теплового потока, то при кипении в каналах условия возникновение кризиса теплоотдачи определяются сочетанием геометрии канала, свойств теплоносителя и режимных параметров, в том числе и теплового потока. При этом не всегда величина теплового потока является определяющей. Например, при фиксированных геометрии, давлении, температуре на входе в канал и подводимой мощности условия возникновения кризиса теплоотдачи будут определяться величиной массовой скорости теплоносителя. Еще один пример – так называемый кризис 2-го рода, возникающий при достижении определяющей для кризиса теплоотдачи является именно величина граничного паросодержания, а вовсе не тепловой поток.

Что касается экспериментальных значений КТП, то они, в общем случае, являются функцией геометрических характеристик канала и режимных параметров:

$$q_{\rm kp} = f(L, D, P, \rho w, T_{\rm BX}), \tag{1}$$

где P – давление; ρw – массовая скорость; L – обогреваемая длина; D – диаметр канала; $T_{\rm BX}$ – температура на входе.

В то же время на практике для описания и обобщения экспериментальных данных о КТП чаще всего используют более простую на первый взгляд зависимость:

$$q_{\rm kp} = f(D, P, \rho w, x_{\rm BX}), \tag{2}$$

основанную на, так называемой, «локальной гипотезе» кризиса, согласно которой определяющими для кризиса теплоотдачи являются параметры потока в месте его возникновения. Соответственно, иллюстрацией «влияния» критического паросодержания на КТП служат графики в координатах $q_{\kappa p}(x_{\kappa p})$, построенные при фиксированных значениях $D, P, \rho w$.

На той же «локальной гипотезе» основаны и, так называемые, «скелетные» таблицы (look-uptable) значений КТП, построенные с использованием сложной процедуры осреднения и сглаживания первичных экспериментальных данных разных авторов. При этом игнорировалось влияние таких важных параметров, как обогреваемая длина и температура воды на входе, что находится в явном противоречии с экспериментальными данными. Следствием этого явилось нарушение закона сохранения энергии при осреднении первичных экспериментальных данных, в которых значения критического паросодержания рассчитывались с использованием уравнения теплового баланса.

Еще одной проблемой, связанной «локальной гипотезой» кризиса, является проблема мультиколлинеарности уравнения (2), то есть наличие сильной связи между её переменными, обусловленной уравнением теплового баланса, что легко увидеть на примере равномерно обогреваемой трубы:

$$q_{\rm Kp} = \frac{D}{Lr\rho w \left(x_{\rm Kp} - x_{\rm BX} \right)},\tag{3}$$

где *r* – теплота испарения, а *x*_{вх} – относительная энтальпия на входе.

Мультиколлинеарность приводит к неустойчивости оценок параметров регрессии (2), выражающейся в их статистической неопределенности – дисперсии оценок. Это означает, что конкретные результаты оценки могут сильно различаться для разных выборок, несмотря на то, что выборки однородны. Именно этим объясняется большое количество и разнообразие эмпирических соотношений для критического теплового потока даже для каналов простейшей геометрии.

Из вышесказанного следует, что использование для описания и обобщения экспериментальных данных о КТП «скелетных» таблиц и эмпирических зависимостей вида $q_{\rm kp} = f(D, P, \rho w, x_{\rm kp})$, где сама величина $x_{\rm kp}$ зависит от $q_{\rm kp}$, может привести к неправильной интерпретации данных и неверной оценке влияния геометрических и режимных параметров на величину КТП.

СЕКЦИЯ 1.

Физическая химия и массоперенос в системах с жидкометаллическими теплоносителями

Координационно-кластерная модель для расчета константы Сивертса растворов водорода в расплавах системы Li-Sn

красин В. П., Союстова С. И. ФГБО ВО «МПУ», г. Москва, <u>vkrasin@rambler.ru</u>

Ключевые слова: константа Сивертса, капиллярно-пористые системы, изотопы водорода, координационно-кластерная модель, внутрикамерные компоненты, парциальное давление, термодинамическая активность, энтропия смешения.

Капиллярно-пористые системы (КПС) являются альтернативой твердых материалов в конструкциях, обращенных к плазме внутрикамерных компонентов токамаков. В связи с этим литий, галлий и олово рассматриваются в качестве возможных жидких металлов, которыми предполагается заполнять такие КПС.

Из перечисленных металлов литий является наиболее исследованным, если рассматривать его свойства с точки зрения требований, предъявляемых к жидкометаллическому компоненту КПС. Хотя по своим свойствам литий обладает рядом преимуществ перед другими легкоплавкими металлами, следует упомянуть о существовании двух еще не полностью решенных проблем, связанных с возможностью накопления в литии высоких концентраций трития и повышенного давления пара над его расплавом. Фактор давления приходится учитывать при использовании жидкого лития как материала, контактирующего с плазмой. В качестве возможных жидкометаллических компонентов КПС рассматриваются также сплавы олова с литием, в которых содержание лития варьируется от 20 до 30 ат. %. Сплавы Li-Sn стали возможной альтернативой литию из-за отсутствия двух упомянутых выше проблем, но существует ряд обстоятельств, которые требуют дополнительных исследований. В частности, использование расплавов, содержащих олово, которое обладает высоким по сравнению с литием значением зарядового числа Z, вызывает озабоченность с точки зрения возможного загрязнения плазмы. Другая особенность этих сплавов связана с тем, что при использовании сплавов литий-олово возникает необходимость выполнения дополнительных требований к состоянию контактирующих с расплавом металлических поверхностей для обеспечения смачивания. Заслуживает внимания тот факт, что при контакте поверхности жидкого Li-Sn сплава с плазмой токамака имеет место адсорбция лития на поверхности Li-Sn сплава. Также необходимы более систематические исследования стойкости конструкционных материалов КПС к коррозионному воздействию со стороны жидких Li-Sn сплавов. Выбор жидкометаллического компонента для КПС должен быть сделан с учетом возможности восстановления испаренного с поверхности металла, а также взаимодействия между ионизированными компонентами жидкометаллического расплава (после того как они покинут последний) и поверхностью расплава, принимая во внимание вероятность распыления в условиях токамака.

Выбор олова как одного и компонентов сплава обусловлен чрезвычайно низкой растворимостью водорода в этом металле и отсутствием стабильных гидридов (SnH₄ характеризуется температурой разложения, близкой к 100 °C). Результаты экспериментов на установке с горячей дейтериевой плазмой можно рассматривать как некоторое предварительное подтверждение того, что жидкое олово и расплав Li-Sn (30/70 ат. %) характеризуются низкими значениями параметров, отвечающих за способность удерживать изотопы водорода в жидкометаллическом расплаве. Ценность таких исследований с точки зрения изучения свойств системы Li-Sn-H велика, если принять во внимание ограниченность информации о термодинамике этой системы.

В настоящей работе ставится задача на основе очень ограниченных экспериментальных данных, имеющихся для двух составов системы литий-олово, с помощью математического аппарата координационно-кластерной модели расчетным путем получить значения констант Сивертса для всего диапазона составов бинарной системы Li-Sn.

В рассматриваемой модели предполагается, что термодинамические свойства трехкомпонентного (многокомпонентного) жидкометаллического раствора зависят от распределения атомов водорода по кластерам и выражаются через термодинамические параметры соответствующих бинарных систем, которые могут быть составлены из компонентов тройной (многокомпонентной) системы. Для коэффициента термодинамической активности водорода в бинарном расплаве Li-Sn можно записать, следующее выражение

$$\lim_{x_{\rm H}\to 0} \gamma_{\rm H} = \left\{ \sum_{j=0}^{z} \frac{z!}{j!(z-j)!} \left[\frac{x_{\rm Sn} \gamma_{\rm Sn(Li-Sn)}^{t}}{\gamma_{\rm H(Sn)}^{1/z}} \right]^{j} \cdot \left[\frac{x_{\rm Li} \gamma_{\rm Li(Li-Sn)}^{t}}{\gamma_{\rm H(Li)}^{1/z}} \right]^{z-j} \cdot \exp\left(-\frac{j(z-j)h_{B}}{2RT}\right) \right\}^{-1}, \quad (1)$$

где $\gamma_{\rm H}$, $\gamma_{\rm H(Li)}$, $\gamma_{\rm H(Sn)}$ – коэффициенты термодинамической активности водорода в разбавленных растворах водорода в тройной системе Li-Sn-H и бинарных системах Li-H и Sn-H, соответственно; $\gamma_{\rm Sn(Li-Sn)}$, $\gamma_{\rm Li(Li-Sn)}$ – коэффициенты активности Sn и Li в сплаве Li-Sn, соответственно; $x_{\rm Sn}$, $x_{\rm Li}$ – мольные доли компонентов в расплаве Li-Sn-H; z – координационное число для атомов водорода в жидком сплаве; *j* – число атомов Sn в координационном кластере H(Li_{z-j}, Sn_j) (в первой координационной сфере вокруг атома водорода в определенной атомной конфигурации); h_B – энергетический параметр, значение которого выбирается из условия наилучшего совпадения результатов расчета с экспериментальными данными; *t* – параметр, учитывающий относительное ослабление прочности металлической связи для атомов находящихся в кластере; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

От коэффициентов активности водорода можно перейти к константам Сивертса, если воспользоваться следующим уравнением

$$\gamma_{\rm H(M)} = \frac{K_{\rm H(M)}}{f_{\rm H}^0}, \qquad (2)$$

где индекс M соответствует одному из металлических компонентов (Sn или Li) и $f_{\rm H}^0$ – фугитивность чистого жидкого водорода (гипотетическое стандартное состояние) при температуре *T* и давлении *p*.

Комбинируя формулы (1) и (2), исключаем фугитивность $f_{\rm H}^0$ и выражаем константу Сивертса для раствора водорода в системе Li-Sn через термодинамические данные для бинарных систем

$$K_{\rm H} = \left\{ \sum_{j=0}^{z} \frac{z!}{j!(z-j)!} \left[\frac{x_{\rm Sn} \gamma_{\rm Sn(Li-Sn)}^{t}}{K_{\rm H(Sn)}^{1/z}} \right]^{j} \cdot \left[\frac{x_{\rm Li} \gamma_{\rm Li(Li-Sn)}^{t}}{K_{\rm H(Li)}^{1/z}} \right]^{z-j} \cdot \exp\left(-\frac{j(z-j)h_{B}}{2RT}\right) \right\}^{-1}, \quad (3)$$

где *K*_{H(Sn)} и*K*_{H(Li)} – константы Сивертса водорода в двойных системах Sn-H и Li-H, соответственно.

Анализ полученных результатов показал, что использование уравнений координационно-кластерной модели для растворов водорода в расплавах Li-Sn приводит к теоретическим значениям константы Сивертса, которые находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными для расплавов Li₅₇Sn₄₃ и Li₆₂Sn₃₈.

Реакция растворения водорода в расплавах Li-Sn в зависимости от состава может по своему характеру быть как экзотермической, так и эндотермической. Основываясь на прогнозных оценках, полученных с помощью уравнений ККМ, можно заключить, что при 800 °C в расплавах Li-Sn с содержанием лития $0,32 < x_{\rm Li} < 1,0$ водород должен растворяться экзотермически, а для расплавов, состав которых находится в диапазоне $0 < x_{\rm Li} < 0,32$, реакция растворения становится эндотермической.

Расчет по уравнения ККМ показывает, что поведение расплавов $Li_{20}Sn_{80}$ и $Li_{30}Sn_{70}$ по способности поглощать водород более близко́ к поведению чистого олова. Помимо низких уровней растворимости водорода, два этих сплава объединяет с чистым оловом эндотермический характер реакции растворения водорода. В условиях токамака более высокое давление водорода (трития) над Li-Sn следует рассматривать, как преимущество перед чистым литием, поскольку в этом случае не возникает опасности накопления трития в жидкометаллическом расплаве.

Доклад подготовлен в рамках выполнения базовой части государственного задания ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет» (проект № 3.4880.2017/8.9).

Термодинамическая модель растворов Ме-О

Осипов А. А., Ниязов С.-А. С.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, osipov@ippe.ru, osipov177@yandex.ru

Ключевые слова: примеси железа, расчетная модель, параметр взаимодействия активность кислорода, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, парциальное давление, кислород, свинец-висмут, свинец, константа равновесия.

Опыт освоения жидких металлов как теплоносителей реакторных установок показал, что обеспечение химико-технологических процессов в жидкометаллическом теплоносителе (ЖМТ) является важной и актуальной проблемой в задаче обеспечения работоспособности и ресурса реакторной установки. Химико-технологические процессы, протекающие в реальном контуре с ЖМТ сложны, и как показывает опыт очень трудно, а в ряде случаев и просто невозможно провести их экспериментальное обоснование, тогда как предварительные термодинамические расчеты позволяют успешно выйти на первоначальный вариант процесса и даже оптимизировать его. В технологии ЖМТ химическая термодинамика позволяет давать термодинамическое обоснование и составлять прогнозирующие расчеты процессов очистки теплоносителя от примесей, поведения защитных покрытий при нагреве и изменении кислородного потенциала и т. п.

С точки зрения обеспечения работоспособности и ресурса реакторной установки именно примесь кислорода в жидком металле является наиболее важной, поэтому химическая термодинамика растворов Ме-О является фундаментальной составляющей современной технологии ЖМТ. Однако существующие в настоящее время представления о термодинамике растворов Ме-О являются не полными, а иногда и противоречивыми, что обусловлено отсутствием общей термодинамической модели таких растворов. В данной работе предпринята попытка построения такой модели. В основе обсуждаемой модели лежит взаимодействие в растворе Ме-О, а именно химические реакции между атомами кислорода и металла. В предложенной модели дано обобщение закона Генри на растворы с химическим взаимодействием, введены понятия интегрального и дифференциального законов Генри. Предложенная модель устанавливает связь между измеряемой активностью кислорода и интегральной (суммарной) концентрацией кислорода в жидком металле; позволяет получить информацию о количественном содержании различных форм кислорода в жидком металле; позволяет учесть влияние других примесей (например, железа) на активность кислорода. Показано, что самовзаимодействие и взаимодействие кислорода с другими примесями приводит к нелинейной зависимости измеряемой активности кислорода от его концентрации, даже в разбавленном растворе.

Равновесная модель диссоциации соединений

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

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, osipov@ippe.ru, osipov177@yandex.ru

Ключевые слова: термическая диссоциация, химическое соединение, нестехиометрия конгруэнтный переход, состав, энергия Гиббса, термодинамическое равновесие, модель, уравнение Гиббса-Дюгема, конденсированная фаза, жидкий металл, разбавленный раствор.

Теория диссоциации соединений лежит в основе всех физико-химических процессов, поскольку степень диссоциации соединений является мерой их прочности или термодинамической устойчивости. В классической теории термической диссоциации соединений рассматривают переход компонентов конденсированного соединения в газовую фазу. Возникает вопрос о применимости такого подхода к рассмотрению процессов, протекающих при взаимодействии конденсированных соединений с другими конденсированными фазами. В частности, применительно к перспективным ядерным энергетическим установкам (ЯЭУ) с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) актуальным является вопрос о процессах взаимодействия оксидных пленок с жидким металлом.

При рассмотрении термической диссоциации учитывают переход компонентов конденсированного соединения в газовую фазу. Для расчета равновесного состояния в такой системе к уравнениям равновесия добавляют уравнение баланса давлений или потоков, например, для конденсированного соединения $A_n B_m$ эти уравнения записываются следующим образом.

$$\begin{split} \frac{P_{\Sigma A}}{P_{\Sigma B}} &= \frac{n}{m}, \ P_{A_{n}B_{m}} = P_{A_{n}B_{m}}^{\circ} \\ P_{\Sigma A} &= P_{A} + 2P_{A_{2}} + P_{AB} + 2P_{A_{2}B} + ..., \\ P_{\Sigma B} &= P_{B} + 2P_{B_{2}} + P_{AB} + P_{A_{2}B} + ..., \\ \frac{w_{\Sigma A}}{w_{\Sigma B}} &= \frac{n}{m}, \ w_{i} &= \alpha_{i}P_{i}\sqrt{2\pi M_{i}RT}, \\ w_{\Sigma A} &= w_{A} + 2w_{A_{2}} + w_{AB} + 2w_{A_{2}B} + ..., \\ w_{\Sigma B} &= w_{B} + 2w_{B_{2}} + w_{AB} + w_{A_{2}B} + ..., \end{split}$$

где P_i и w_i – парциальные давления и скорости испарения компонентов соответственно, а α_i – коэффициент, характеризующий отношение частиц, покидающих систему, к общему числу испаряющихся частиц.

Балансовые уравнения соответствуют случаю конгруэнтного перехода компонентов конденсированного соединения в газовую фазу и являются следствием законов Коновалова. Для растворов и химических соединений, имеющих на диаграмме состояния области гомогенности, при испарении в условиях вакуума или инертного для системы несущего газа, когда диффузионное торможение отвода продуктов реакции от поверхности не играет существенной роли, конгруэнтность перехода определяется балансом скоростей испарения. При большом диффузионном торможении газовой фазы (малые значения α над поверхностью испарения) создается практически насыщенное давление
паров испаряемых компонентов и поэтому конгруэнтность перехода определяется балансом давлений. Таким образом, модель термической диссоциации рассматривает конгруэнтный переход компонентов конденсированного соединения в инертную газообразную среду. Очевидно, что в ряде случаев, среда, в которой находится соединение, не является ни газообразной, ни инертной по отношению к компонентам химического соединения, а конгруэнтность перехода может, и не выполнятся. Поэтому в данных случаях необходима другая более общая модель.

В данной работе обозначены некоторые сложности применении классической теории к проблеме диссоциации соединений в многокомпонентных системах, состоящих из конденсированных фаз, и намечены пути их преодоления. Основным результатом работы является модель равновесной диссоциации соединений, построенная на основе решения системы уравнений сохранения массы, законов действующих масс и уравнений Гиббса-Дюгема. На примере оксидов железа продемонстрированы области пересечения обсуждаемой модели с другими подходами. Ключевым моментом в рассматриваемом подходе является тезис о нестехиометрии соединений.

Поверхностное натяжение сплавов натрия на основе олова

Алчагиров Б. Б., Кясова О. Х.

ФГБОУ ВО «КБГУ им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик, alchg@kbsu.ru

Ключевые слова: олово, натрий, теплоносители, бинарные сплавы, поверхностное натяжение, эксперимент, метод большой капли, поверхностная активность, адсорбция.

Жидкометаллические расплавы системы олово-натрий считаются перспективными теплоносителями для ядерных реакторов, разработки и создания новых энергоемких химических источников тока. Но многие теплофизические и физико-химические свойства сплавов системы олово-натрий остаются недостаточно изученными, что затрудняет анализ перспектив использования этих расплавов. В настоящей работе ставится задача изучения концентрационной зависимости поверхностного натяжения жидких сплавов с малым (до 5 ат.%) содержанием натрия в олове.

В литературе имеются лишь две работы, посвященные изучению поверхностного натяжения (ПН) сплавов $\sigma(x)$ системы олово-натрий. В первой из них Н. Покровским и Н. Галаниной (1949 г.) методом максимального давления в капле впервые было изучено влияние небольших (от 0,03 до 4,6 ат.%) добавок Na к олову в интервале температур 573-723 К. Поскольку в предварительных опытах авторами было установлено, что использование для определения ПН двух образцов олова – спектрально-чистого и олова технической чистоты, в пределах точности измерений дают одинаковые результаты, то при измерениях ПН сплавов Sn-Na они использовали для приготовления сплавов только олово технической чистоты. Более того, из-за отсутствия в литературе того времени сведений о плотности жидких сплавов системы Sn-Na, необходимые для вычисления ПН, данные о температурной зависимости плотности $\rho(t)$ олова, ими было сделано грубое допущение, приняв, что, поскольку плотность натрия невелика в сравнении с плотностью олова, а его концентрации в сплавах с оловом достаточно малы, то и плотности сплавов не должны существенно отличаться от плотности чистого олова. В этом приближении ими и были произведены расчеты изотермы ПН всех 10 сплавов натрия на основе олова.

Результаты измерений $\sigma(x)$ сплавов Sn-Na, полученные H. Покровским и H. Галаниной, описываются уравнением $\sigma(x) = 532 - 38 \ln (24x + 1) + 14x$. Они свидетельствуют о том, что натрий понижает ПH олова, особенно значительно – в области составов с содержанием около 1 ат.% Na в Sn.

Вторая работа (В. Anusionwu, 2003 г.) посвящена теоретическому расчету изотермы ПН сплавов системы Sn-Na в полном интервале составов в рамках простой статистической модели, возможности образования комплексов Sn_mNa_n и базирующейся на концепции наличия слоистой структуры вблизи границы фаз. На полученной в ней изотерме ПН $\sigma(x)$ обнаруживаются и минимум, и максимум. К сожалению, отсутствие экспериментальных данных об изотерме $\sigma(x)$ системы Sn-Na в широкой концентрационной области составов не позволяет однозначно судить о достоверности существования теоретически предсказываемых аномалий на концентрационной зависимости ПН системы Sn-Na ввиду множества причин, по которым возможно их появление, которые обсуждаются в сообщении.

Измерения ПН проводились методом большой лежащей капли на автоматизированной установке с использованием программного пакета «SigmaDrop» в цельнопаянном стеклянном приборе, установленном внутри вращающегося воздушного термостата. Сплавы готовились из олова марки «ОВЧ-000» и натрия с содержанием основного компонента 99,993 % в вакууме около 10⁻⁴ Па. Измерительная ячейка позволяет без вскрытия и разгерметизации ее, непосредственно по ходу экспериментов готовить сплавы и проводить измерения ПН в одинаковых условиях статического вакуума.

Поверхностное натяжение чистого натрия в данной работе не измерялось, но, по данным Б. Алчагирова с сотрудниками, оно составляет 205 мН/м, что находится в согласии с рекомендуемыми данными других авторов. Измеренная нами температурная зависимость поверхностного натяжения $\sigma(T)$ чистого олова аналитически описывается уравнением прямой $\sigma(T) = 545 - 0.06 (T - T_{nn})$, из которого следует, что при температуре плавления ПН олова составляет 545 мН/м. Наши данные превышают величину ПН олова, полученные Н. Покровским и Н. Галаниной на 12 мН/м, а данные теоретических расчетов В. Anusionwu – на 30 мН/м. По нашему мнению, отмеченное различие опытных данных ПН олова в значительной степени объясняется тем, что нами в использовалось олово повышенной чистоты (99,9999 %), тогда как в работе Н. Покровского и Н. Галаниной для определения ПН использовано олово лишь технической чистоты, то есть олово с содержанием 99,9 вес. % основного элемента. О том, что это могло послужить одной из главных причин различия сравниваемых результатов, свидетельствует также и ряд других исследований ПН олова и других легкоплавких металлов, специально выполненные с целью выяснения степени возможного влияния примесей как в самих металлах, так и активных примесей в защитной газовой среде, на величину ПН и его температурную зависимость. В частности, различие ПН у двух образцов олова с содержанием основного элемента 99,855 и 99,999 % соответственно, при температуре плавления достигает 56 мН/м. По литературным данным, лишь когда содержание примесей в олове становится меньше определенной «пороговой» величины, температурные зависимости ПН $\sigma(T)$ стабилизируются и остаются строго линейными. Например, согласно данным P. Fima, R. Nowak, N. Sobczak (2010 г), пороговое содержание примесей в олове составляет около 10^{-4} ат. %, то есть при объемном содержании в олове менее 0,0001 ат. % примесей последние практически перестают влиять на величину ПН и его температурную зависимость $\sigma(T)$.

Результаты измерения ПН 19 сплавов натрия на основе олова в изученном нами интервале составов показали, что полученная изотерма ПН $\sigma(x)$ представляет собой плавную ниспадающую кривую, то есть добавки натрия к олову приводят к существенному понижению ПН сплавов, что свидетельствует о высокой поверхностной активности, проявляемой натрием при малом его содержании в сплавах с оловом. При этом полученная изотерма ПН располагается систематически несколько ниже изотермы $\sigma(x)$, полученной Н. Покровским и Н. Галаниной: максимальное отклонение сравниваемых изотерм ПН достигает 20 мН/м, что выходит за пределы погрешности экспериментов в несколько раз.

Используя полученную в опытах изотерму ПН $\sigma(x)$, мы оценили предельную поверхностную активность Na в сплавах с Sn при 573 K: она составила около 15 H/(м·ат. доли), что свидетельствует о более высокой поверхностной активности a_{Na} , проявляемой натрием при малом его содержании в олове, чем предельная поверхностная активность Na, рассчитанная по данным H. Покровского H. Галаниной. Расчеты адсорбции натрия в изученных сплавах по формуле Гуггенгейма – Адама в «N» – варианте показали, что Na в сплавах с оловом проявляет высокую поверхностную активность, максимальное значение которой достигается в области составов с содержанием около 1,5 ат. % натрия в олове.

Таким образом, из имеющихся в литературе и полученных нами результатов следует, что имеется настоятельная необходимость в продолжении измерений поверхностного натяжения сплавов системы олово-натрий в широкой концентрационной области составов как с целью пополнения весьма скудных экспериментальных данных, так и для выяснения достоверности существования теоретически предсказываемых аномалий на изотерме $\sigma(x)$ системы олово-натрий.

Автоматизированная установка для измерения быстрых изменений поверхностного натяжения жидкометаллических теплоносителей

Алчагиров Б. Б., Кясова О. Х., Коков З. А., Узденова А. Н.

ФГБОУ ВО «КБГУ им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик, oksikyas160993@gmail.com

Ключевые слова: жидкие металлы и сплавы, поверхностное натяжение ртути, быстрые изменения, автоматизация эксперимента, температура, вакуум, газовая атмосфера, цифровое изображение, компьютер.

Успехи и достижения в изучении физико-химических свойств веществ определяются уровнем состояния и развития используемых методов, приборов и техники эксперимента. Особенно актуальными являются создание новых методик и автоматизированных экспериментальных установок для изучения физикохимии быстропротекающих процессов на исследуемых поверхностях (фазовых переходов, адсорбционных явлений и т. д.) с применением современных способов сбора и обработки первичных данных. В связи с этим в работе ставится задача разработки и создания экспериментальной установки с программным комплексом, позволяющей автоматизировать процессы измерения, сбора и обработки получаемых массивов первичных данных о поверхностном натяжении (ПН) жидкометаллических расплавов известным методом большой лежащей капли, суть которого состоит в определении ПН по форме меридионального сечения (контура) лежащей на горизонтальной подложке осесимметричной капли. Помимо громоздкости и большой трудоемкости ручной обработки первичных данных и расчета по ним ПН, основной недостаток метода лежащей капли до недавних пор состоял в том, что для описания всей кривой меридионального сечения (контура) лежащей капли использовались лишь 5 точек, лежащих на этой кривой. Быстродействие и высокая производительность современной вычислительной и цифровой техники позволяют теперь проводить автоматически «обмер» параметров капли и получать координаты желаемого количества точек, лежащих на контуре капли, необходимые для более точных расчетов ПН практически в режиме реального времени. В результате появилась возможность изучать быстрые изменения свойств металлических расплавов, например, отслеживать кинетику быстрых изменений ПН, происходящих в результате адсорбционных процессов и многое другое.

Разработанный нами в среде программирования C Shap 5.0 программный пакет «SigmaDrop» позволяет проводить цифровую обработку изображений жидких капель исследуемых металлов или сплавов и рассчитывать ПН. В качестве приемника изображения исследуемых капель использована 8-мегапиксельная камера UCMOS08000KPA фирмы «Touptek», позволяющая получать изображение профиля капли с разрешением не менее 3264×2448 пикселей со скоростью до 10 кадров/с. Программная оболочка комплекса «SigmaDrop» позволяет проводить весь набор необходимых операций по получению и цифровой обработке изображений капель жидких металлов и сплавов.

Программный пакет «SigmaDrop» состоит из нескольких функциональных блоков:

1) Блок ввода изображений, позволяющий выбирать режимы работы камеры («снимок»/«видео»), варьировать экспозицией, чувствительностью, изменять форматы вводимых в ЭВМ изображений и т.п. Нами применен также специальный алгоритм программной коррекции «подушкообразной» дисторсии, позволивший снизить нелинейные искажения в автоматическом режиме еще на стадии первичной обработки изображения лежащей капли.

2) Блок цифровой обработки оснащен широким набором инструментов – от калибровки масштаба по реперным точкам до традиционно применяемых методов математической обработки изображений (инвертирование, изменение яркости и контраста, двумерная фильтрация (сглаживание, подчеркивание границ), построение гистограмм распределения яркостей, измерение расстояний и т. д.).

3) Блок выделения контура капли и расчета коэффициента ПН. С помощью линейного дифференциального оператора – детектора границ Кэнни (Canny) реализовано прецизионное выделение контура исследуемой капли.

Алгоритм состоит из пяти отдельных звеньев: сглаживания (удаление шума) и поиска градиентов яркостей изображения, подавления не-максимумов (только локальные максимумы отмечаются как границы), двойной пороговой фильтрации (потенциальные границы определяются порогами) и трассировки областей неоднозначности (подавляются все края, несвязанные с определенными (сильными) границами). В алгоритме Кэнни три регулируемых параметра, влияющие на время вычисления и эффективность алгоритма: размер гауссового фильтра, верхний и нижний пороги фильтрации. Двойная пороговая фильтрация необходима, если фон и объекты сильно отличаются друг от друга, а нужно выделить лишь контур границы. Для уменьшения вычислительных затрат перед применением детектора Кэнни изображение капли преобразуется в полутоновое черно-белое. Измерение геометрических параметров профиля капли, необходимое для расчета ПН, проводится в автоматизированном режиме.

Для практической реализации возможностей разработанного программного пакета «SigmaDrop» и автоматизации с его использованием измерений ПН жидких металлов и сплавов нами создана и испытана экспериментальная установка для изучения быстрых изменений ПН жидкометаллических теплоносителей. В частности, автоматизированная установка опробована нами для изучения влияния воздуха и кислорода на ПН высокочистой ртути при переходе от условий высокого вакуума к атмосфере воздуха или кислорода соответственно. В опытах использовались высокочистая ртуть марки Р-О (99,9997 % основного элемента), сертифицированный воздух (99,7 %) и спектральночистый кислород. Данные о ПН ртути, полученные с использованием новой автоматизированной установки в условиях высокого вакуума и адсорбции из атмосферного воздуха и кислорода, соответственно, показали хорошую надежность и точность получаемых данных. В частности, нами было получено более 1700 значений ПН, 186 из которых – в условиях вакуума. На зависимости ПН ртути от времени обнаружены два пологих участка, соответствующие двум этапам измерений ПН ртути – в условиях вакуума и атмосфере воздуха (или кислорода). Статистическая обработка значений ПН ртути в вакууме дала величину овак \approx 476,8 мH/м, а для ПН ртути на воздухе о возд \approx 446,6 ± 5,6 мН/м. Из результатов измерения ПН ртути при 293 К, полученные в непрерывном режиме в вакууме (1180 мин) и атмосфере кислорода (1460 мин) на одной и той же поверхности капли Нg, следует, что в условиях вакуума ПН ртути составляет 475 ± 4 мН/м и остается стабильным за все время измерений. После напуска кислорода в прибор и началом экспонирования поверхности ртути в кислороде ПН Нд очень быстро понижается до 360 мН/м.

Таким образом, полученная на новой установке зависимость ПН ртути от времени в условиях адсорбции газов позволила впервые четко показать, что в сравнении с вакуумом, в атмосфере воздуха ПН ртути понижается на 35 ± 3 мН/м, а в среде кислорода – на 115 мН/м. Отметим также, что новая экспериментальная установка позволяет измерять температурные и концентрационные зависимости плотности и скорости испарения жидкометаллических расплавов, а по протяженности ступенек $\Delta \sigma$ вдоль оси времени – оценивать время установления адсорбционного равновесия на различных межфазных границах.

Температурная зависимость смачиваемости реакторных сталей жидким свинцом, висмутом и эвтектикой Pb-Bi с добавлением лития в интервале от 500 до 1800 К

Алчагиров Б. Б., Таова Т. М., Хоконов Х. Б.

ФГБОУ ВО «КБГУ им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик, <u>khb180532@gmail.ru</u>

Ключевые слова: свинец, висмут, литий, эвтектика, теплоносители, смачиваемость, краевой угол, реакторные стали.

Изучение температурной зависимости смачиваемости $\theta(T)$ металлических поверхностей жидкими металлами и сплавами представляет практический интерес для разработки новых жидкометаллических теплоносителей, выбора оптимальных технологических условий пайки материалов, а также решения многих других задач. В работе приводятся результаты изучения температурных зависимостей краевых углов смачивания полированных поверхностей реакторных сталей 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т и ЭК-173 жидкими Pb, Bi и эвтектическим сплавом Pb-Bi с добавками лития.

Изучение $\theta(T)$ поверхностей реакторных сталей осуществлялось методом лежащей капли на автоматизированной экспериментальной установке, разработанной авторами. Погрешность измерения θ составила 1–2 угловых градуса. Использованные образцы Pb и Bi содержали не менее 99,999 %, а Li – 99,9 % основного элемента.

Смачиваемость в системе «сталь 12Х18Н9Т – жидкий свинец». На зависимости $\theta(T)$ системы «сталь 12Х18Н9Т – Рb» по мере повышения температуры дважды происходили ступенчатые уменьшения углов смачивания: в интервале $T_{nn} = 650$ °C от 100 до 40 угловых градусов, а при 720 °C и больше – от 40 до 10 угловых градусов и менее. Наличие отмеченных ступенек связано, по нашему мнению, с разрушением окисных плёнок свинца и хрома при отмеченных выше температурах. Действительно, согласно данным фотоэлектронной спектроскопии, на поверхностях хромистых сталей разрушение окисной плёнки происходит лишь при температурах выше 600 °C; при этом оксид свинца разрушается по схеме 2PbO \rightarrow 2Pb + O₂. В результате при температурах более 600 °C на поверхности подложки разрушается оксид свинца, что приводит к интенсивному уменьшению краевых углов смачивания. Стадия уменьшения углов смачивания, согласно полученным нами данным, протекает за считанные минуты.

Сравнение наших результатов с данными $\theta(T)$, полученными П.В. Проценко (МГУ, 2002 г), который также изучал смачиваемость в условиях вакуума методом «сидящей» капли жидкого свинца на поверхности хромистой стали, к тому же мало отличающейся по составу от использованной нами стали 12Х18Н9Т, показало качественное согласие. В работе достаточно подробно обсуждаются полученные результаты, и дается объяснение наличию «второго порога» смачиваемости на зависимости $\theta(T)$, обнаруженному в области более *высоких температур*.

Смачиваемость в системе «висмут – сталь ЭК-173». Сталь марки ЭК-173 (с содержанием 1,2 % Al по массе) вначале не смачивается вплоть до температуры 600 °С. Дальнейшее повышение температуры до 700 °С приводит к интенсивному смачиванию стали жидким висмутом: угол смачивания $\theta(T)$ достигает значения 75 градусов в течение последних 15–20 минут, то есть для системы «жидкий висмут – сталь ЭК-173» критическая температура смачивания (КТС) оказалась около 600 °С. При 700 °С опыты были прекращены из-за распыления висмута в вакууме. Сравнение наших результатов $\theta(T)$ с данными работы А. Кашежева и др., (2008 г.) по изучению смачиваемости стали ЭК-173 жидким Ві (метод «лежащей капли») показывает, что ими также были обнаружены КТС (около 650–700 °C), что значительно превышает определенное нами значение КТС. Причиной несовпадения и некоторой неопределенности данных КТС отмеченной группы с нашими является отсутствие опытных точек на полученной ими зависимости $\theta(T)$ в области температур от 620 °C до 720 °C, хотя при температуре 720 °C на кривой $\theta(T)$ имеются две экстремальные точки, соответствующие углам смачивания θ , равным около 78 угловых градусов.

Плохую смачиваемость стали ЭК-173 жидким висмутом в области температур от 270 до 570 °C можно объяснить тем, что примеси Al (1,2 масс %) в стали ЭК-173 в процессе сегрегации накапливаются на межфазной границе и образуют защитные оксидные пленки.

Смачиваемость жидким эвтектическим сплавом PbBi реакторной стали ЭК-173. В зависимости от температуры и времени $\theta(T, \tau)$ остается практически неизменной в области температур от T_{nn} до 720 °C, в которой углы смачивания составляют около 150 градусов. Как и для рассмотренных выше систем стали с чистыми Pb и Bi, дальнейшее повышение температуры системы «сталь ЭК-173 – эвтектический сплав Pb-Bi» также приводит к быстрому понижению углов смачивания – в течение десяти минут θ становится равным 100 угловым градусам, то есть в системе «сталь ЭК-173 – жидкоэвтектический сплав Pb-Bi» обнаруживается КTC, равная около 750 °C. К сожалению, интенсивное распыление эвтектического сплава при температуре большей 980 °C не позволило завершить эксперименты до наступления смачивания стали жидкой эвтектикой PbBi.

Температурные зависимости смачивания стали 12X18H10T эвтектическим сплавом (Pb-Bi)_{эвт} с содержанием 20,86 и 35,1 ат.% Li в условиях вакуума. Расплав (Pb-Bi)_{эвт} + 20,86 ат.% Li, сформированный на подложке из стали 12X18H10T при 700 К, смачивает ее после соприкосновения, образуя краевой угол около 75 градусов. Этот угол остается постоянным в течение трех часов, хотя за это время температура достигает 1500 К, что является свидетельством наличия критического порога смачивания или критической температуры смачивания (КТС).

Смачивание реакторной стали 12X18H10T расплавом (Pb-Bi)_{эвт} с содержанием 35,1 ат.% Li (расплавом Pb_{28,6}Bi_{36,3}Li_{35,1}) во всем температурном интервале измерений (775–1000 К) смачивает подложку. В начале при температурах до 800 К происходит достаточно быстрое уменьшение краевого угла смачивания с 60 до 45 угловых градусов, но, по мере дальнейшего повышения температуры до 1000 К, угол смачивания, уменьшаясь по линейном закону, достигает при 975 К значения $\theta = 25$ градусов. По нашему мнению, лучшее смачивание поверхности стали 12Х18Н10Т жидким сплавом Рb_{28.6}Вi_{36.3}Li_{35.1}, содержащим 35.1 ат.% Li, обусловлено бо́льшим содержанием лития на 12 ат.% Li в исходном сплаве (Pb-Bi)_{эвт}, чем в сплаве с 20,86 ат.% Li. Представляет интерес сравнение политерм смачиваемости стали 12Х18Н10Т жидкими сплавами, мало отличающиеся один от другого по содержанию лития в (Pb-Bi)_{эвт}, но одна из которых получена при измерениях θ в вакууме (около 10^{-4} Па), а другая – в защитной атмосфере аргона. Из их сравнения следует, что они существенно отличаются друг от друга: жидкий сплав (Pb-Bi)_{эвт} + 20,86 ат.% Li в условиях вакуума при всех температурах смачивает сталь, тогда как в атмосфере аргона расплав (Pb-Bi)_{эвт} + 23,56 ат.% Li не смачивает эту же поверхность. Более того, в условиях вакуума на зависимости $\theta(T)$ обнаруживается КТС, которая отсутствует в случае проведения измерений в инертной атмосфере.

Применение высокотемпературной электронной микроскопии к изучению теплофизических процессов

Васяшин А. В., Рухляда Н. Я.

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ», г. Обнинск, vasyashin@iate.obninsk.ru

Ключевые слова: термоэлектронный эмиссионный микроскоп, работа выхода, фазовые переходы, кинетика, скрытая теплота превращения, скорость превращения.

Особенности образования контраста в электронном эмиссионном микроскопе (ЭЭМ) позволяют наблюдать и исследовать многие явления на поверхности:

 диффузию компонентов и примесей материалов к поверхности исследуемого материала;

различные виды поверхностной диффузии;

- химические реакции между различными веществами на поверхности;

 процессы изменения кристаллической структуры материалов – рекристаллизацию, фазовые переходы.

Многие вещества могут существовать в различных кристаллографических модификациях, то есть при одном и том же химическом составе обладают разными физическими и химическими свойствами. При фазовых переходах происходят изменения во внешних электронных оболочках атомов, а, следовательно, и изменения свойств твердого тела. Вещества, которые в твердом состоянии могут существовать в различных модификациях, называют аллотропными или полиморфными. Используются и те, и другие названия, но считается, что термин «аллотропный» применим к элементам, а название «полиморфный» относится к соединениям, хотя строгого различия не проводится. Полиморфизм – широко распространенное явление. Из всех известных элементов таблицы Д.И. Менделеева 63 испытывают аллотропные превращения. Вещество может переходить из одной модификации в другую под воздействием, например, нагрева, давления, облучения и т. д. В технологических процессах изготовления деталей из полиморфных металлов необходимо учитывать изменения их свойств, таких как пластичность, формоизменение при переходе через точку фазового превращения.

Термоэлектронный эмиссионный микроскоп как прибор для изучения фазовых переходов. Эффективным прибором, с помощью которого можно изучать количественно и качественно кинетику высокотемпературных фазовых переходов является электронный эмиссионный микроскоп (ЭЭМ).

Контраст изображения на экране микроскопа формируется за счет различия плотностей токов с различных участков поверхности образца. Плотность локального тока определяется работой выхода данного участка (основной вклад), микрорельефом, полем пятен и т. д. При фазовых переходах типа твердое тело – твердое тело скачком изменяется работа выхода и резко изменяется контраст изображения поверхности исследуемого полиморфного материала. Таким образом, по изменению контраста в ЭЭМ можно наблюдать кинетику фазового перехода с помощью видеокамеры и детально изучать в дальнейшем, используя компьютер.

Экспериментальные результаты наблюдений движения границы раздела фаз в рутении. В качестве объекта исследования в настоящей работе выбран рутений.

Образец Ru помещался в ЭЭМ для определения локальных эффективных работ выхода. С помощью манипулятора образец можно было перемещать и получать эмиссионные изображения поверхностей различных моноблоков. Температурная область существования β-фазы – всего 30 К. В высокотемпературных измерениях это – небольшой интервал. Предпринимавшиеся ранее попытки обнаружить фазовые переходы в рутении как косвенными, так и прямыми высокотемпературными измерениями параметров решетки с помощью рентгеновского анализа к успеху не приводили.

Кинетика фазового перехода $\beta \rightarrow \gamma$. При переходе через критическую температуру фазового перехода $T_{\beta\gamma}$ (1230 K) становятся возможными переход из фазы β в фазу γ (при перегреве) и переход из фазы γ в фазу β (при переохлаждении). Рассмотрим перегрев образца величиной ΔT , при котором фаза β является родительской фазой, а фаза γ – растущей. Вероятности и, как следствие, скорости переходов подчиняются распределению Больцмана:

$$V_{\beta \to \gamma} = v_{\beta} \cdot \exp\{-E_{\gamma}/kT\},\$$

$$V_{\gamma \to \beta} = v_{\gamma} \cdot \exp\{-E_{\beta}/kT\},\$$

где E_{γ} и E_{β} – свободные энергии в γ и β фазах, соответственно, а $T = T_{\beta\gamma} + \Delta T$.

При небольших перегревах можно считать $v_{\beta} = v_{\gamma} = v$. В этом случае скорость перехода можно определить так:

$$V = V_{\beta \to \gamma} - V_{\gamma \to \beta} = v \cdot \exp\{-E_{\gamma}/kT\} \cdot (1 - \exp\{-E_{\beta \gamma}/kT\}).$$

Разность свободных энергий можно выразить в виде $E_{\beta\gamma} = E_{\beta} - E_{\gamma} = \Delta H_{np} - T \cdot \Delta S_{np}$. При этом изменение энтропии ΔS_{np} и энтальпии ΔH_{np} при любой температуре фазового перехода постоянны и $\Delta S_{np} = \Delta H_{np}/T_{\beta\gamma}$, что приводит к следующему выражению $E_{\beta\gamma} = \Delta H_{np} \cdot \Delta T/T_{\beta\gamma}$.

Теперь для скорости перехода получаем:

$$V = v \cdot \exp\{-E_{\gamma}/kT\} \cdot (1 - \exp\{-\Delta H_{\rm np} \cdot \Delta T/kTT_{\beta\gamma}\}).$$

Если считать T = const, то $V = V_0 \cdot (1 - \exp\{-B \cdot \Delta T\})$, где $B = \Delta H_{np} / kTT_{\beta\gamma}$.

Измерив экспериментально скорость движения границы раздела фаз, можно построить график зависимости скорости от величины перегрева, а затем аппроксимировать полученную зависимость теоретической кривой путём подбора коэффициентов V_0 и B.

Обработка результатов эксперимента. Оценка скорости движения границы раздела фаз, основывалась на последовательном анализе видеокадров, фиксирующих их положения. Этот процесс представлял собой нетривиальную процедуру из-за наличия множества границ и сложности их конфигурации. Кроме этого, было необходимо удалять неподвижные участки границ, для чего требовалась специальная методика. В данной работе предлагается метод оценки скорости, основанный на обработке горизонтальных и вертикальных сечений изображений.

Измеренная скорость движения границы раздела фаз находится в пределах от 3 до 13 мкм/с. Полученная зависимость скорости движения границы раздела от степени перегрева аппроксимирована теоретической кривой, и вычисленная по ней скрытая теплота превращения оказалась слишком высокой. Сделан вывод о необходимости получения большего количества экспериментальных точек и повышения точности измерений для корректной оценки скрытой теплоты.

Поляризационный эффект при измерении термодинамической активности кислорода гальванической концентрационной ячейкой

Мусихин Ю. А., Арнольдов М. Н. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>arnoldov@ippe.ru</u>

Ключевые слова: гальваническая концентрационная ячейка, жидкометаллический теплоноситель, поляризационный эффект, ЭДС, твёрдый электролит.

Гальваническая концентрационная ячейка (ГКЯ) является эффективным средством измерений термодинамической активности кислорода в жидкометаллических теплоносителях (ЖМТ). В рабочих условиях ГКЯ развивает ЭДС, которая формируется за счет протекания электродных реакций разряда – ионизации атомов кислорода. Активность кислорода в ЖМТ определяют по значениям ЭДС из расчетной зависимости, связывающей термодинамическую (расчетную) ЭДС, активность кислорода и температуру теплоносителя в зонеГКЯ. При отсутствии каких-либо посторонних факторов на рабочем электроде показания ГКЯ близки к термодинамической ЭДС, чем достигается наибольшая точность определения активности кислорода в ЖМТ.

Наличие таких факторов, как адсорбция оксидов, различных примесей и побочные химические реакции на границе электролит – теплоноситель приводит к появлению поляризационных эффектов на рабочем электроде. В результате показания ГКЯ уменьшаются на величину поляризации по сравнению с термодинамической ЭДС, что приводит к уменьшению точности определения активности кислорода в ЖМТ.

Факт возможного присутствия поляризационных эффектов в процессе контроля термодинамической активности кислорода в ЖМТ признаётся многими. Но, до сих пор не проведены экспериментальные исследования в этом направлении.

С целью восполнения этого пробела был разработан и экспериментально опробован ЭДС – метод контроля электродной поляризации датчика кислорода в ЖМТ. В докладе изложены результаты этой разработки, а также экспериментальной проверки предложенного метода на циркуляционном стенде со свинцово-висмутовым теплоносителем.

Приведенная эквивалентная электрическая схема ГКЯ отличалась от обычной схемы ГКЯ наличием дополнительных сопротивлений. Получены расчетные зависимости для определения поляризационных характеристик ячейки. Суть ЭДС – метода контроля электродной поляризации заключалась в определении отклонений рабочих коэффициентов проверки ячейки от контрольных значений с использованием расчетных зависимостей для контрольных омических характеристик датчика и значений поляризационного сопротивления в режимах «Измерение», «Проверка 1», «Проверка 2».

Приводятся расчётные выражения для определения значений поляризации на основании измерений средних значений термодинамической ЭДС и среднего поляризационного сопротивления в режимах «Измерение», «Проверка 1», «Проверка 2».

Экспериментальная часть работы была выполнена с использованием одинаковых опытных образцов ГКЯ типа ДАК – 45 с электродом сравнения на основе висмута, насыщенного кислородом, и поликристаллическим оксидным электролитом 90% мол. ZrO₂ + 10% мол. Y₂O₃.

Изложены результаты проверки ЭДС – метода контроля электродной поляризации трех опытных образцов ГКЯ типа ДАК-45 с заводскими номерами № 219, № 293, № 300 при ресурсных испытаниях на свинцово-висмутовом стенде ЦУ-2М. Показано,

что ионные числа и омические характеристики датчиков, измеренные на контрольной установке ФХТ методом ЭДС до и после испытаний, имели близкие значения.

Датчики были установлены на проточном изотермическом канале стенда с шагом 100 мм. Датчик № 300 являлся контрольным (проверочным), с помощью которого определяли термодинамическую ЭДС разработанным методом, а поляризацию всех датчиков определяли приведенным выражением.

Испытания датчиков проводили с поддержанием активности кислорода на заданном уровне путем подачи газовых смесей в поток свинца – висмута. При этом температура датчиков $T_{\rm A}$ в проточном канале изменялась в пределах 593–783 К, а скорость движения свинца-висмута составляла 0,2–1,0 м/с. Из полученных данных следует, что характер изменения показаний датчиков в зависимости от состава газовых смесей соответствовал теоретическим положениям, а разность показаний на каждом режиме свидетельствовала о наличии поляризации датчиков. Показано, что наибольшая разность показаний составляла 0,058 В на втором режиме. При этом наибольшее значение поляризации достигало 0,096 В на первом датчике.

Анализ экспериментальных результатов показал, что величина электродной поляризации датчиков зависит от уровня активности кислорода, от температуры и скорости движения свинца-висмута.

Кроме того, анализ полученных результатов показал, что относительное отклонение показаний датчика от термодинамической ЭДС может достигать 45 %. Поэтому учет относительного отклонения с помощью контроля электродной поляризации датчика кислорода ЭДС-методом позволяет значительно увеличить точность определения активности кислорода в эвтектическом сплаве свинца и висмута.

На основании полученных результатов сделан вывод о том, что причиной электродной поляризации датчика кислорода в теплоносителе свинец-висмут является наличие оксидных отложений на поверхности твердого электролита датчика со стороны теплоносителя. Необходимы более подробные исследования условий возникновения поляризационных эффектов и методов минимизации их значений.

Механизмы дробления перегретых жидкометаллических капель, погруженных в холодную воду

Зейгарник Ю. А., Ивочкин Ю. П., Кубриков К. Г.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, ivochkin@yandex.ru

Ключевые слова: паровой взрыв, фрагментация, кипение, жидкий металл, импульсы давления, кавитация, звуковые и ударные волны.

В настоящее время нет ясного и полностью непротиворечивого описания процессов при паровом взрыве [1], приводящих к тонкой фрагментации горячих капель, находящихся в объеме охладителя. В литературе можно найти несколько десятков гипотез, посвященных возможному объяснению данного явления, что, по всей видимости, свидетельствует о сложности и недостаточной изученности вопроса. Перечислим вкратце основные, на наш взгляд, гипотезы фрагментации капель.

Наиболее полно проработана и доминирует в научной литературе «гидродинамическая» модель, в которой фрагментация расплава связывается с возникновением при схлопывании паровых полостей холодных водяных струй окружающей жидкости. Эти струи проникают в горячую каплю и взрывным образом вскипают в ней, что приводит к дроблению горячей жидкости. Другое распространенное направление теоретического анализа тонкой фрагментации связано с рассмотрением термических напряжений, возникающих в каплях расплава в процессе их быстрого охлаждения. Предполагается, что в результате разрушения паровой оболочки, расположенной вокруг отдельной капли, происходит интенсивный контакт охладителя с горячей поверхностью. В результате поверхностный слой расплава быстро затвердевает, что сопровождается возникновением в нем растягивающих механических напряжений и сильным всесторонним обжатием жидкого ядра капли твердой оболочкой. Перечисленные процессы инициируют образование трещин в затвердевшем поверхностном слое и выбросы дробящихся струй горячей жидкости в охладитель.

В литературе также представлены гипотезы, связывающие дробление жидкометаллической капли с процессом кавитации – интенсивным ростом парогазовых пузырей в объеме расплава. В деталях механизмы возникновения подобного явления могут различаться. Например, быстрое увеличение количества газовых пузырей и их суммарного объема внутри капли горячей жидкости может быть вызвано резким охлаждением расплава при быстром переходе от пленочного к пузырьковому режиму кипения. В другом случае, взрывной рост газовых пузырей может быть вызван внешним импульсом давления. Подобный так называемый кавитационно-акустической механизм фрагментации состоит в следующем. При вскипании охладителя на поверхности горячей жидкометаллической капли вследствие роста и схлопывания паровых пузырей генерируются высокоинтенсивные звуковые или ударные волны. Указанные волны распространяются, в том числе, и в объеме капли, а их отражение изнутри от ее поверхности приводит к возникновению в расплаве череды импульсов разрежения. Параметры подобных импульсов достаточны для возникновения взрывной кавитации внутри капли горячего теплоносителя и ее фрагментации. Наличие растворенных газов может интенсифицировать этот процесс.

Трудно отдать безусловное предпочтение какой-либо одной из имеющихся теорий тонкой фрагментации расплава – важного и наиболее сложного этапа парового взрыва. К тому же нельзя исключить наложения нескольких эффектов. Авторы полагают, что наиболее приемлемой может оказаться кавитационно-акустическая модель. В этом контексте авторами были проведены дополнительные опыты, направленные на уточнение механизма фрагментации горячих жидкометаллических капель. Были изучены детали таких процессов, как: возникновение в горячей капле или моделирующем ее твердом металлическом теле знакопеременных пульсаций давления; спонтанное воз-

никновение в рассматриваемой системе начального импульса давления достаточно большой амплитуды; соприкосновение охладителя с поверхностью нагретого тела при разрушении паровой оболочки как возможного источника этого начального импульса.

Результаты синхронных измерений импульсов давления (подобные импульсы сгенерированы взрывным разрушением паровой оболочки) как в твердом образце, моделирующем горячую каплю, так и в воде, свидетельствуют в пользу кавитационноакустической теории. Они подтверждают, что акустические волны в твердом теле знакопеременны, а их интенсивность (в том числе при отрицательных значениях) лишь незначительно отличается (по модулю) от интенсивности импульсов давления, измеренной в охладителе. Амплитуда и длительность указанных импульсов составляет ~ 1 МПа и десятки микросекунд, что достаточно для инициирования тонкой фрагментации капли по кавитационно-акустическому механизму. Однако максимальные импульсы давления в охлаждающей жидкости спонтанно возникают при температурах полусферы несколько ниже температуры предельного перегрева воды (около 300 °C при атмосферном давлении). В то же время результаты опытов авторов свидетельствуют о том, что при относительно высоких температурах образца паровая пленка устойчива и датчики не регистрируют импульсы давления, достаточных для фрагментации по кавитационно-акустическому механизму.

Очевидное несоответствие между результатами экспериментов на твердотельных образцах и опытами по фрагментации металлических капель может быть снято проведением дополнительных экспериментов и корректировкой кавитационно-акустической модели фрагментации. С этой целью с помощью кондуктометрической методики авторами были получены дополнительные опытные данные по контакту, которые позволили представить вероятностную качественную схему процесса соприкосновения охладителя с нагретой поверхностью. В условиях толстого парового слоя волны на границе пар-жидкость, как правило, не приводят к какому-либо заметному изменению толщины пленки. По мере остывания образца, сопровождающегося уменьшением толщины паровой оболочки, т.е. при приближении жидкости достаточно близко к горячей стенке, появляется вероятность вскипания воды либо в гребнях волн, либо после кратковременного их соприкосновения с нагретой поверхностью. В обоих случаях подобные эффекты приводят к росту интенсивности колебаний поверхности пленки и распространению локальных возмущений вдоль паровой оболочки. Одновременно с этим наблюдается процесс снижения локальной температуры горячей стенки. В совокупности все эти обстоятельства приводят к относительно длительному контакту горячей стенки с охладителем, его прогреву и последующему взрывному вскипанию, стохастическим образом генерирующим в жидкости импульсы давления разной амплитуды.

Таким образом, результаты проведенных исследований подтверждают, что для низкоплавких материалов (например, олово) возможно протекание спонтанной тонкой фрагментации расплавов по кавитационно-акустическому механизму. Для перегретых образцов с высокой температурой плавления этот процесс также может наблюдаться, но с известной степенью вероятности. Процесс может протекать как под воздействием внешних гидродинамических возмущений (например, звуковых волн, генерируемых при ударе жидкометаллической струи о дно емкости в реальных паровых взрывах), так и по сценарию, связанному с генерацией импульсов давления после контакта горячей и холодной жидкостей на совокупности капель.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 18-08-01497 А.

Список литературы

1. Ефанов А.Д., Загорулько Ю.И., Ремизов О.В., Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Богатырев И.Л. Паровые взрывы: результаты экспериментальных исследований // Теплоэнергетика. – 1997. – № 8. – С. 17–24.

Экспериментальное исследование поведения кориума на границе его раздела с реакторными конструкционными материалами

Загорулько Ю. И., Ганичев С. Н.

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

Ключевые слова: кориум, имитаторы кориума, термитные реакции, конструкционные материалы, гарнисажный слой, термическое взаимодействие, динамические нагрузки, фазовое расслоение, внутриреакторная ловушка кориума.

Цели и задачи исследований, результаты которых изложены в настоящем докладе, заключались в изучении степени износа конструкционных материалов (например, внутриреакторной ловушки кориума) при их первоначальном контакте с расплавом имитаторов кориума; физико-химических свойств гарнисажного слоя, формирующегося на границе раздела высокотемпературного расплава с «холодной» стенкой.

Эксперименты проводились с использование расплава продуктов термитной реакции $Fe_2O_3+2Al \rightarrow Al_2O_3+2Fe$ со стехиометрическим составом исходных компонентов. Начальная температура расплава составляла ~ 3000 К. В качестве исследуемого конструкционного материала использовались образцы из стали 12X18H10T. В состав исходной термитной смеси вводились материалы – маркеры (порошки Мо и Си с медианным размером частиц ~ 30–40 мкм). Начальная температура материалов по условиям экспериментов составляла 293 К. Проведение экспериментов при более высоких температурах ограниченно возможной самоинициации термитной реакции.

Методология экспериментов строилась с учётом возможности экспериментального моделирования всей совокупности процессов, которые контролируют поведение кориума и его воздействие на конструкционные материалы, включая термическое взаимодействие (ТВ) с натрием. В экспериментах данной серии паровая фаза натрия, образующаяся при ТВ кориума с натрием, моделировалась азотом, содержащимся в составе термитных зарядов и в газовой полости экспериментальных участков. Это позволило экспериментально оценить выбросы расплава имитатора кориума из зоны плавления и ударные нагрузки на образцы конструкционных материалов, расположенных над первоначальным уровнем термитных зарядов. Указанные оценки следует рассматривать как достаточно консервативные с точки зрения физического подобия процессов расширения натриевой паровой фазы при ТВ и расширения газа при быстром его разогреве. Временные масштабы активной фазы ТВ и разогрева азота приблизительно одинаковы.

В результате проведенных исследований установлено:

 тепловое расширение азота, содержащегося в составе термитного заряда и имитирующего паровую фазу натрия по своим эффектам (временной интервал, эффекты воздействия на окружающие конструкции) соответствует характеристикам активной фазы термического взаимодействия кориума с натрием;

– формирование волны давления расширяющегося газа приводит к выбросу расплава за пределы экспериментального участка, от 24 до 40 % исходной массы термитного заряда. Осевое перемещение расплава вызывает ударные нагрузки на окружающие конструкции, оцениваемые величиной ~ 5·10⁵ Па;

 – расплав имитатора кориума претерпевает расслоение на металлическую (Fe) и керамическую (Al₂O₃) фазы, пространственно разделённые в соответствии с их плотностью, что подтверждается измерениями химического состава фаз и их плотностью; – гарнисажный слой на поверхности раздела расплава с первоначально холодной стенкой формируется на стадии, следующей за его расслоением. Химический состав пристеночного слоя по основным компонентам соответствует элементному составу фаз с некоторым превышением содержания хрома и никеля;

– износ материалов, включая стенки реакционной камеры (контейнера), и деформация образцов были зарегистрированы только для категорий, подвергаемых ударному воздействию расплава.

Полученная информация может быть использована при составлении сценариев развития процессов во внутриреакторных ловушках кориума в условиях тяжелых аварий с плавлением активной зоны.

О возможных механизмах термического взаимодействия кориума с натрием при тяжелых авариях

Загорулько Ю. И., Ганичев С. Н.

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

Ключевые слова: натрий, кориум, имитаторы, расплавы, тяжелые аварии, термическое взаимодействие, энергетический эффект, гомогенная нуклеация, контактная температура, фазовое расслоение

Результаты исследований энергетических эффектов термического взаимодействия (ТВ) расплавов имитаторов кориума (ZrO₂+Fe, Al₂O₃+Fe) с натрием свидетельствуют о достаточно высоких выходах энергии в виде механической работы расширения паровой фазы натрия и перемещения самого натрия. Оцениваемые экспериментально значения длительности активной фазы ТВ (время достижения пиковых давлений) составляет 5–10 мс, что соответствует временным характеристикам крупномасштабных взаимодействий.

Одним из наиболее правдоподобных механизмов, объясняющих наблюдаемые явления, может рассматриваться термическое взаимодействие натрия с металлической фазой железа, формируемой в результате расслоения исходного расплава имитаторов кориума на металлическую и керамическую фазы, что подтверждается экспериментально. Температура расплава железа (начальная температура ~ 3000 K) в этих условиях существенно превышает температуру его плавления. Температурные условия на границе раздела металлической фазы с натрием удовлетворяют требованиям спонтанного испарения натрия, так как контактная температура превышает температуру спонтанной нуклеации в системе «Fe – Na».

В сценариях тяжелых аварий, например, типа ULOF расплав железа соответствует расплаву стали (конструкционные материалы активной зоны). Можно предполагать, что фазовое расслоение будет иметь место в системе «UO₂ – расплав стали». При этом указанные выше механизм ТВ может быть реализован, по крайне мере, для той части дисперсной металлической фазы, для которой обеспечены условия хорошего смачивания при первоначальном контакте с натрием.

Учет вклада энергетического выхода ТВ в развитие тяжелых аварий на реакторах БН необходим как на их начальной стадии (деградация оболочек ТВЭЛ и перемещение материалов), так и на более поздних стадиях, при анализах процессов, происходящих в ловушках кориума, где ТВ может происходить между натрием и расплавом стали.

В докладе рассматривается гипотетический механизм реализации крупномасштабного ТВ исходя из анализа фазовых превращений в системе «Al₂O₃+Fe».

Исследование кинетики растворения графита в ламинарных потоках натрия

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

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>nganichev@ippe.ru</u>

Ключевые слова: графит, натрий, массообмен, растворение, кинетика, сплавы железо-марганец, равновесные образцы-стандарты, коэффициент скорости растворения.

При моделировании поля термодинамической активности углерода в неизотермическом циркуляционном контуре необходимы количественные оценки кинетики массообмена между взвешенной фазой углерода в потоке натрия, отложениями на стенках контура и его раствором в натрии. В частности, важны оценки локальных коэффициентов скорости растворения углерода в натрии в зависимости от температуры и гидродинамических режимов обтекания растворяемого тела (слой отложений, частицы взвешенной фазы).

В докладе представлены результаты экспериментальных измерений коэффициентов скорости растворения графита в условиях, моделирующих обтекания слоя графита ламинарным потоком натрия. Варьируемыми параметрами являлись температура натрия и длина растворяемого тела (характерный размер) при практически одинаковых расходах натрия через экспериментальный участок.

Исследования проводились на экспериментальном участке, представляющем собой канал диаметром 40 мм с 4 последовательно расположенными элементами, включающими: входную геликоидную шайбу для обеспечения перемешивания натрия; капсулы с графитовыми стержнями диаметром 20 мм, запрессованными в трубчатый элемент, снабженный концевыми сферическими обтекателями и продольным пазом, обеспечивающим контакт натрия с графитом, шириной 10 мм и длиной L (0,1; 0,25; 0,4; 0,5 м в соответствии с номером элемента); кассету РОС (4 пластинчатых образца толщиной 0,2 мм из сплавов Fe-11,6Mg и Fe-20Mg). Варьируемыми параметрами являлись температура натрия и характерный размер элементов растворяемого графита.

При проведении исследований для контроля прироста концентрации углерода в потоке натрия применялся метод равновесных образцов-стандартов (POC) на основе сплава Fe-11,6Mg и Fe-20Mg, для которых характерны высокие коэффициенты равновесного распределения углерода между материалом образцов и натрием.

Анализ экспериментальных данных показал, что они достаточно хорошо (с погрешностью 5–7%) описываются известной корреляцией для ламинарного обтекания пластины ламинарным потоком жидкости. Наибольшая погрешность имела место для элементов графита длиной 0,1 м.

Влияние коррозии охлаждаемой поверхности на теплообмен при кипении недогретых жидкостей

Виноградов М. М., Рязанцев В. А., Канин П. К., Забиров А. Р., Ягов В. В.

НИУ «МЭИ», г. Москва, Zabirov_arslan@gmail.com

Ключевые слова: кипение, закалка, нестационарное охлаждение, твэл, повторный залив, теплообмен.

Исследование взаимодействия между поверхностью, нагретой существенно выше температуры предельного перегрева, и недогретой водой может быть полезным для понимания природы парового взрыва. Это опасное явление наблюдается в различных аварийных ситуациях в металлургии, целлюлозно-бумажной промышленности; также представляет потенциальную опасность при эксплуатации ядерных реакторов (в случае тяжёлых аварий с расплавлением активной зоны). Изучение этого явления привело к открытию интенсивного теплообмена при плёночном кипении недогретой воды. Английские специалисты (Hewitt G.F. и Kenning D.B.R.) в 1986 г. первыми охарактеризовали этот процесс как особый режим теплообмена при кипении, названный «микропузырьковым» кипением (micro-bubble boiling). Этот режим наблюдается при кипении воды, недогретой более чем на 20 К, и характеризуется схлопыванием паровой плёнки при средней температуре охлаждаемой поверхности существенно выше температуры предельного перегрева жидкости. Плотности теплового потока в подобных условиях могут превышать 5 MBт/м² (из экспериментов на металлических сферических образцах), что совершенно не характерно для устойчивого плёночного кипения и является причиной множества заблуждений о природе процесса. Чтобы выявить механизмы и закономерности наступления этого необычного режима кипения, на кафедре ИТФ МЭИ были реализованы эксперименты по охлаждению высокотемпературных шаров из разных материалов (никель, нержавеющая сталь, медь) в различных жидкостях (вода, этанол, изопропанол, перфторгексан, различные бинарные смеси).

Согласно предложенной авторами доклада приближённой полуэмпирической модели, на наступление процесса микро-пузырькового кипения кроме свойств охлаждающей жидкости, влияют свойства поверхности охлаждаемого тела, в частности шероховатость и коэффициент тепловой активности материала тела. Чем ниже коэффициент тепловой активности, при тем бо́льшей температуре поверхности наступит интенсивный режим охлаждения. Таким образом, наличие покрытий (например, оксидных плёнок) на охлаждаемой поверхности может существенно повлиять на скорость охлаждения горячих тел. Описанный эффект может иметь место при повторном заливе АЗ РУ типа ВВЭР.

В докладе представлены новые экспериментальные данные о теплообмене при кипении недогретой воды на поверхности шара из нержавеющей стали и на поверхности прокорродировавшего стального шара.

Обнаружено, что коррозия охлаждаемой поверхности приводит к нарушению сферической симметрии процесса охлаждения и повышению темпа охлаждения. Оксидный слой приводит к повышению температуры поверхности, при которой происходит переход от устойчивого плёночного кипения к интенсивному режиму теплообмена.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 17-79-20402).

СЕКЦИЯ 2.

Исследования процессов гидродинамики и теплообмена в элементах оборудования реакторных установок с ЖМТ

Теплообмен при кипении жидкометаллических теплоносителей в ТВС быстрых реакторов в аварийных режимах

Сорокин А. П., Кузина Ю. А., Иванов Е. Ф.

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

Ключевые слова: быстрый реактор, тепловыделяющая сборка, натриевая полость, эксперимент, расчетное моделирование, кипение, жидкие металлы, аварийные режимы, температура, давление, расход, теплообмен, гидродинамическая устойчивость, картограмма режимов, кризис теплообмена.

Кипению щелочных металлов на протяжении последних трех десятилетий уделялось большое внимание. Изучали теплоотдачу, режимы течения, гидравлическое сопротивление, кризис теплоотдачи, начальный перегрев, механизм процесса кипения, его устойчивость.

Результаты выполненных исследований показывают, что по сравнению с кипением воды процесс кипения жидких металлов имеет существенные особенности:

 в реальных условиях взаимодействие отдельных факторов оказывается настолько сложным, что начальный перегрев для вскипания жидких металлов трудно точно прогнозировать;

 у щелочных металлов образуются пузыри достаточно большого размера на ограниченном числе центров парообразования, основная часть времени цикла образования пузыря приходится на период ожидания;

рост парового пузыря щелочного металла носит взрывообразный характер; скорости роста ~ 10 м/с;

 основные режимы течения двухфазных потоков щелочных металлов те же, что и у обычных теплоносителей: при давлении, близком к атмосферному, преобладает дисперсно-кольцевой режим течения;

 сопротивление трения в двухфазных потоках с подводом тепла ниже, чем в адиабатических потоках, что связано с оттесняющим воздействием потока пара;

 – 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.

Акцент в исследованиях кипения жидких металлов в ТВС быстрых реакторов сделан в сторону анализа переходных и аварийных режимов, вызванных резким увеличением мощности и различными блокировками проходного сечения активной зоны, остановкой циркуляционного насоса (при наличии выбега ротора и без него). Исследования, так называемого, динамического кипения были выполнены в 1970–80 годах в различных странах, как правило, на моделях ТВС, имеющих имитаторы и шаг решетки твэлов, соответствующие натурным размерам, но содержащим меньшее число тепловыделяющих элементов (7–61). Их целью явилось получение информации для отработки расчетных кодов, распространения кипения в ТВС, взаимодействия паровой и газовой фаз при кипении или выбросе газа при разгерметизации оболочки твэлов.

Решение задачи охлаждения твэлов в ТВС активной зоны в аварийных режимах, связанных с отключением циркуляционных насосов при срабатывании аварийной защиты (ULOF), приводит к необходимости изучения проблемы охлаждения твэлов при пониженных расходах теплоносителя или даже опрокидывании циркуляции в ТВС. Имеются лишь ограниченные данные по кипению натрия в пучках для режимов с малыми скоростями течения теплоносителя или естественной конвекции.

В настоящей работе представлены результаты серии экспериментов по кипению натрий-калиевого сплава в моделях одиночной ТВС и системы параллельных ТВС в контурах с естественной циркуляцией, выполненных в период 1995–2005 годы в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». Приведены результаты сравнения данных расчетных и экспериментальных исследований.

Также представлены результаты проведенных в последнее время экспериментальных исследований теплообмена при кипении натрия в модели ТВС с расположенной над активной зоной реактора «натриевой полостью» в режимах с естественной и вынужденной конвекцией. Впервые было показано, что при наличии «натриевой полости» в ТВС, которая предназначена для компенсации положительного натриевого пустотного эффекта реактивности (НПЭР) в аварийных ситуациях с кипением натрия, существует возможность обеспечения продолжительного охлаждения натрием имитаторов твэлов в ТВС. Обсуждаются задачи проведения дальнейших исследований.

Диагностика вихревой структуры потоков теплоносителей на основе использования метода акустических резонансов

Поздеева И. Г., Митрофанова О. В.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, pozdeeva_irina@mail.ru

Ключевые слова: ядерные энергетические установки, теплоносители, вихревые структуры, закрученные потоки, акустика, резонанс, диагностика.

Предлагаемый в данной работе метод акустических измерений разработан с целью выявления опасных эксплуатационных режимов работы ядерных энергетических установок (ЯЭУ), связанных с процессами спонтанного вихреобразования и самопроизвольной закрутки потоков теплоносителей. Этот экспериментальный метод основан на измерении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) звуковых колебаний в закрученной импактной струе и с его помощью может быть выявлена вихревая структура закрученного течения.

В отличие от традиционных методов неразрушающего контроля теплогидравлических параметров ЯЭУ таких как ультразвуковые, радиационные, магнитные, в настоящей работе предлагается использовать новый акустический диагностический метод – метод акустических резонансов, позволяющий регистрировать излучение средой упругих волн, вызванных локальной динамической перестройкой ее структуры и заранее предсказывать появление опасных периодических флуктуаций, частоты которых приближаются к собственным частотам ЯЭУ. Так как перечисленные выше существующие методы виброшумовой диагностики такой возможности не дают, а, следовательно, не могут детектировать в режиме реального времени процесс возникновения и развития нежелательных для конструкций резонансных колебаний, предлагаемый метод может являться эффективным дополнением к существующим диагностическим методам. С точки зрения технического воплощения метод акустических резонансов также имеет неоспоримое преимущество для создания системы мониторинга и диагностики кризисных явлений, обусловленных гидродинамикой потока, т.к. не требует создания громоздких измерительных систем типа источник-приемник или наложения внешнего магнитного поля.

С целью получения информации о характере акустических колебаний, генерируемых закрученной импактной струей при приближении скорости истечения к критическому значению, была разработана методика экспериментальных измерений. Проведены систематические измерения полей давления и АЧХ акустических колебаний, генерируемых импактными закрученными течениями. Подтвержден устойчивый эффект генерации резонансных звуковых колебаний при истечении импактных закрученных струй. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что механизм возникновения звуковых резонансов в импактных закрученных течениях обусловлен генерацией крупномасштабных вихрей. Экспериментально было установлено, что при достижении предельной расходной скорости закрученного потока происходит самопроизвольная перестройка АЧХ акустических колебаний гидромеханической системы.

Перестройка структуры поля течения теплоносителя может быть связана как с эффектами генерации когерентных вихревых структур, так и с фазовыми переходами, сопровождающими несанкционированное вскипание теплоносителя или кавитационные эффекты. Была проведена серия экспериментов по выявлению гидродинамической кавитации в водном теплоносителе. Наличие оптической неоднородности в зоне резкого увеличения проходного сечения канала на срезе сопла указывает на развитие кавитационного режима течения. Расчетные оценки показали, что достижение пороговой скорости истечения струи в зоне пониженного давления приводит к появлению кавитационных пузырьков. Схлопывание этих пузырьков в зоне распада струи сопровождается сильным шумом со сплошным спектром от нескольких сотен Гц до сотен и тысяч Гц.

Проблема изучения особенностей вихревых течений в каналах сложной геометрии связана с тем, что надежность и безопасность работы ЯЭУ существенно зависят от интенсивности вибраций внутрикорпусных устройств. В процессе экспериментальных измерений было выявлено существенное влияние гидродинамики закрученного потока на перераспределение энергии в спектре акустических колебаний, что может приводить к резонансному возбуждению и усилению вибрационных процессов. Было замечено, что при организации закрученного течения в канале генерируемые за счет крупномасштабного вихреобразования низкочастотные колебания при определенном расходе подавляют основные частоты колебаний гидродинамического контура, усиливаясь за счет высокочастотных колебаний контура.

Был исследован эффект саморегулирования акустических колебаний на примере истечения импактного закрученного потока воздуха из вихревой камеры. Данное явление заключается в резонансном усилении акустических колебаний, генерируемых вихревой структурой потока, за счет поглощения энергии собственных колебаний гидромеханической системы. Были рассмотрены три режима истечения: дозвуковой, звуковой докритический и резонансный. Дозвуковой режим возникает при малых значениях расхода воздуха в вихревой камере. При этом режиме наблюдается вращение преграды вокруг оси вихревой камеры, звуковой эффект отсутствует.

Звуковой докритический режим характеризуется достижением предельного расхода теплоносителя через рабочий участок, при этом фиксируется звуковой эффект с несколькими выраженными частотами колебаний. Показано, что в дорезонансном режиме истечения вытекающий поток движется под преградой по сложной замкнутой траектории, образующей фигуру Лиссажу. В этом режиме отсутствуют совпадения частот вихревого течения с собственными частотами гидромеханической системы.

Резонансный (или критический) режим истечения наступает при совпадении частоты вихревого движения с собственной частотой колебаний упругой торцевой поверхности вихревой камеры. Критический режим характеризуется резким усилением амплитуды звуковых колебаний на резонансной частоте, и подавлением колебаний на всех остальных частотах. Было выявлено, что в резонансном режиме истечения поток распадается на отдельные спиральные вихри, частота вращения в которых совпадает с собственной частотой изгибных колебаний торцевой поверхности вихревой камеры.

В специальной серии экспериментов удалось показать, что в области критического перехода, соответствующей частотному диапазону акустических колебаний, генерируемых при образовании системы устойчивых когерентных спирально-вихревых структур, звуковое давление, регистрируемое с помощью АЧХ, возрастает на 2–3 порядка, поэтому при приближении вихревых частот к собственным частотам гидромеханической системы, вероятность детектирования опасного резонансного режима возрастает вследствие резкого увеличения амплитуды сигнала. В этом и состоит суть предлагаемого в данной работе диагностического метода акустических резонансов.

Результаты исследований направлены на разработку теоретических основ и приборного комплекса для обеспечения технологии вихревой диагностики состояния потоков теплоносителей ядерных энергетических установок с ядерными реакторами типа ВВЭР, БН и СВБР.

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» при поддержке гранта РФФИ 16-08-00687-а и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.a03.21.0005).

Моделирование гидродинамики и теплообмена в элементах парогенерирующих систем транспортных ЯЭУ

Митрофанова О. В., Ивлев О. А., Федоринов А. В., Байрамуков А. Ш.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, <u>omitr@yandex.ru</u>

Ключевые слова: ядерные энергетические установки, гидродинамика, теплообмен, интенсификация, моделирование, парогенераторы, сборки витых труб.

Проблема интенсификации процессов конвективного тепломассообмена попрежнему остается ключевой для различных отраслей промышленной и транспортной энергетики. Особую актуальность в наши дни в сфере решения задач освоения Арктики приобретает перспектива создания судовых ядерных энергетических установок повышенной надежности, обладающих более высокими технико-экономическими показателями.

Традиционные способы интенсификации теплообмена, используемые в настоящее время в теплоэнергетических аппаратах, как правило, связаны с закруткой потока, применением оребрения, созданием искусственной шероховатости, установкой завихрителей, диафрагм, шайб и пр. Во многих случаях это может приводить к тому, что теплоотдача возрастает в значительно меньшей степени, чем гидравлическое сопротивление и энергетические затраты на прокачку теплоносителей. Одним из способов повышения теплоэнергетической эффективности теплообменных аппаратов может быть применение каналов и пучков труб сложной геометрии.

В настоящей работе рассматриваются особенности процессов теплообмена и гидродинамики в каналах сложной формы, образованных пучками витых труб различной конструкции. Показано, что механизмами, определяющими особенности поперечного перемешивания потока в пучках витых труб по сравнению с явлениями переноса в круглых трубах, являются усиленный конвективный перенос в масштабе профилированного поперечного сечения канала и организованный перенос в масштабе диаметра пучка, благодаря закрутке потока, генерируемой поверхностью витых труб.

Целью проводимого исследования являлось обоснование возможности повышения термического КПД парогенерирующего блока судовой ЯЭУ. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена на пароперегревательном участке, образованном системой витых труб, осуществлялось с помощью программного комплекса ANSYS.

Логика проведения вычислительных экспериментов заключалась в следующем. Рассматривались две области течения и теплообмена: первая – зона перегретого пара внутри витых труб и вторая – область течения теплоносителя в межтрубном пространстве пучка витых труб. Первая стадия исследований заключалась в выборе оптимальной геометрии профиля витых труб и компоновочной схемы расположения пароперегревательных каналов в самом пучке.

Согласно ранее полученным результатам исследований, проведенных под руководством Г.А. Дрейцера для использования сборок витых труб в воздухо-воздушных теплообменниках, могут быть выбраны компоновочные решения, обеспечивающие закрутку потока не только внутри профилированных витых труб, но и в масштабе всего пучка закрученных труб.

В данной работе вычисления проводились для случаев двухзаходного профиля витых труб (труб овального профиля) и труб четырехзаходного профиля. Расчеты показывают, что наиболее важным геометрическим параметром пучка витых труб является шаг закрутки *s* профиля витой трубы, отнесенный к максимальному размеру профиля d. Параметр s/d в значительной мере определяет интенсивность поля центробежных сил в пучке и особенности процессов теплообмена и перемешивания теплоносителя. Оптимальный относительный шаг закрутки s/d определяется из условия обеспечения максимальной интенсификации этих процессов при приемлемых значениях коэффициентов гидравлического сопротивления пучка.

В результате сравнения данных, полученных при расчетных исследованиях тепломассообмена в витых парогенерирующих каналах овальной и крестообразной формы на пароперегревательном участке, с опытными данными для каналов круглого сечения, которые применяются на объектах, находящихся в эксплуатации, был выявлен эффект значительного увеличения теплопередачи. При этом было установлено, что для исследованного диапазона углов закрутки витых труб величина коэффициента теплоотдачи для перегретого пара при течении в трубах овального профиля систематически превышает значение коэффициента теплоотдачи в витых трубах крестообразного профиля.

Таким образом, основываясь на результатах вычислительных экспериментов, для возможности создания компактных парогенерирующих аппаратов с витыми трубами для транспортной ядерной энергетики была выбрана геометрия плотноупакованного пучка витых труб овального профиля с оптимальным значением угла закрутки профилированных труб.

Целесообразность дальнейшего развития исследований в области расширения возможности применения витых каналов в теплообменных аппаратах с различными средами связана с необходимостью совершенствования теплотехнического оборудования и оптимизации массогабаритных характеристик различных систем транспортных ЯЭУ.

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» при поддержке гранта РФФИ 16-08-00687-а и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ «МИФИ» (Договор No. 02.a03.21.0005).

Особенности формирования температурного поля активной зоны реактора на быстрых нейтронах в процессе кампании

Гордеев С. С.¹, Сорокин А. П.², Денисова Н. А.²

1 – НИЯУ «МИФИ», г. Москва, 2 – АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, gordeevss@bk.ru

Ключевые слова: быстрый реактор, кампания, натрий, активная зона, тепловыделяющая сборка, твэл, оболочка, температура, расход, фактор, геометрические параметры, энерговыделение, формоизменение, стохастические отклонения параметров, межканальное перемешивание, максимальная температура, неравномерность температуры.

Условия работы реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, являющихся системообразующим элементом в концепции двухкомпонентной ядерной энергетики с тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым топливным циклом, характеризуются высокими нейтронными и тепловыми потоками, большим выгоранием, высокой температурой топлива и оболочки. Обеспечение высокой эффективности, надежности, безопасности быстрых реакторов с натриевым охлаждением – важная проблема, связанная с перспективой развития энергетики. Температурный режим работы активной зоны реакторов на быстрых нейтронах, близкий к предельному, воздействие массы факторов выдвигают высокие требования к теплофизическому обоснованию режимов работы активной зоны реактора, включая эксплуатационные и аварийные.

В процессе кампании ТВС активной зоны подвергаются комплексному воздействию различных факторов. Основными факторами, определяющими температурный режим активной зоны в течение кампании, являются распределение геометрических параметров, энерговыделения, расхода теплоносителя, интенсивность межканального и межпакетного обмена, неопределенность в значениях этих параметров и их изменение в процессе эксплуатации реактора. Формоизменение активной зоны быстрых реакторов в процессе кампании носит сложный характер, изменение геометрии может проис-



Факторы и причины, вызывающие формоизменение элементов активной зоны реакторов и эффекты формоизменения

ходить в значительном диапазоне параметров. Наряду с систематическими отклонениями геометрических параметров наблюдаются случайные отклонения параметров. Имеющиеся данные указывает на основные факторы и причины возникновения формоизменения TBC, на эффекты формоизменения, позволяют описать распределение геометрических параметров в формоизмененных TBC.

Значительное влияние на распределение скорости и температуры в ТВС оказывает неоднородность геометрии периферийной области ТВС. Для снижения уровня температуры и выравнивания её неравномерностей необходима оптимизация параметров периферийной зоны (варьирование зазора между периферийными твэлами и чехлом, установка вытеснителей и т.д.). При расчетах в рамках модели наиболее вероятного расположения твэлов в ТВС на начало кампании (статистического пучка) температурные режимы твэлов и чехла ТВС не сильно отличаются от случая модели геометрии раздвинутого пучка. Деформация вытеснителей обусловливает температурные режимы периферийных твэлов, близкие к случаю геометрии компактного пучка.

Формоизменение твэлов и чехла ТВС в процессе кампании может явиться одним из наиболее значительных факторов формирования температурного поля в ТВС в течение кампании. Результаты проведенных исследований показывают, что типичные, в том числе, значительные деформации ТВС в процессе кампании (с учетом локального касания двух твэлов, отдельных твэлов и чехла ТВС) в области центра активной зоны не приводят, как правило, к росту уровня температуры оболочки твэлов свыше 650 °С, максимальной азимутальной неравномерности температуры твэлов свыше 100 °С. Неравномерное энерговыделение твэлов в поперечном сечении ТВС приводит, как правило, к росту уровня максимальной температуры твэлов и максимальной азимутальной неравномерности температуры твэлов. Межпакетная протечка теплоносителя и межпакетный теплообмен обусловливают изменение температурного режима в основном периферийных твэлов, увеличение их максимальной азимутальной неравномерности температуры.

Воздействие всей совокупности факторов приводит к перегреву оболочки твэлов на 10–20 % от среднего подогрева теплоносителя в ТВС для номинальных условий и до 50–100 % от среднего подогрева теплоносителя в ТВС для значительных формоизменений ТВС, что требует проведения термомеханических расчетов при обосновании параметров активной зоны в продолжение всей кампании.

Значительным фактором формирования температурных полей в ТВС является межканальный обмен, эффективно выравнивающий локальные неравномерности температуры теплоносителя в ТВС. Это приводит к снижению максимальной температуры оболочки твэлов и азимутальной неравномерности температуры. Полученные авторами решения уравнений макропереноса массы, импульса и энергии в виде обобщенных зависимостей для распределений скорости и температуры в ТВС, в которых определяющим параметром является интенсивность межканального обмена, могут быть использованы для проведения инженерных расчетов.

Таким образом, теплофизическое обоснование режимов работы TBC активной зоны реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем должно осуществляться с учетом изменения различных параметров, с первую очередь формоизменения TBC в процессе кампании.

Особенности гидродинамики и теплообмена в ТВС активной зоны в быстром реакторе с высоким темпом наработки вторичного топлива

Лубина А.С.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, lubina_as@nrcki.ru

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах; вторичное ядерное топливо; гидродинамика; теплообмен; твэл; проволочное дистанционирование; тепловой поток; профили скоростей; поля температур; турбулентное течение.

Целью исследования является анализ особенностей гидродинамики и теплообмена в ТВС перспективного быстрого натриевого реактора с высоким потенциалом воспроизводства в уран-плутониевом замкнутом топливном цикле. Концепция этого реактора разрабатывалась, исходя из системных требований ядерной энергетики по обеспечению нейтронной достаточности при росте ее мощностей до 100–120 ГВт к 2100 г. Стартовая загрузка делящихся нуклидов в таком реакторе не должна превышать 3–4 т/ГВт(э), а избыточная наработка делящихся нуклидов должна быть не ниже 300 кг/ГВт(э)/год. Выполнение этих требований привело к необходимости использования металлического U-Pu-Zr смешанного топлива и высокого уровня объемного энерговыделения в нем.

В данной работе исследовались проблемы гидродинамики и теплообмена реактора электрической мощностью 1000 МВт с высокой объемной энергонапряженностью (до 2,5 ГВт/м³) в металлическом уран-плутониевом топливе. Объектом исследования является наиболее нагруженная ТВС активной зоны. К особенностям конструкции ТВС данного реактора можно отнести довольно широкий относительный шаг топливной решетки (1,336), 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).

Расчетов гидродинамики и теплообмена для такого типа TBC ранее не проводилось, поэтому использование существующих корреляций и методик расчета, полученных для специфики активных зон реакторов БН, возможно только после проверки их валидности для условий TBC модернизированного реактора. В качестве расчетного инструмента было решено использовать CFD-коды ANSYS CFX и FLUENT. Перед использованием данных кодов для моделирования термогидродинамики теплоносителя в TBC активной зоны быстрого высокобридингового реактора была проведена предварительная верификация используемых в них моделей турбулентности на прямолинейных каналах различной формы: труба, щель, гексагональные ячейки пучков стержней с относительными шагами 1,1–1,4.

После этого моделировалась гидродинамика потока натрия в ячейке твэла с проволочной навивкой вокруг него. Из расчета ячейки определялись характеристики момента импульса, действующего на поток в результате закрутки от проволоки. Далее эти характеристики использовались для расчета течения натрия в модели ½ ТВС реактора.

В данной работе приводятся результаты расчетов по гидродинамике и теплообмену в моделях ячейки и половины ТВС быстрого натриевого реактора. Показаны уровни температур натрия и оболочек твэлов в характерных областях ТВС, а также неравномерности распределений температур по азимуту оболочек центральных, периферийных и угловых твэлов.

Вопросы и предложения по созданию базы экспериментальных данных для валидации программных средств по направлению «Теплогидравлические расчеты АЭС»

Забиров А. Р., Смирнова А. А., Феофилактова Ю. М., Шевченко С. А., Яшников Д. А.

ФБУ «НТЦ ЯРБ», г. Москва, Zabirov_arslan@gmail.com

Ключевые слова: теплогидравлические расчеты, валидация, база данных, АЭС, ВВЭР, РБМК, эксперимент, экспериментальные данные, сохранение знаний.

К настоящему времени в отрасли накоплен значительный объем критически важных знаний в области использования атомной энергии, к числу которых относятся экспериментальные данные, необходимые для валидации программных средств, предназначенных для расчетных анализов безопасности и обоснования проектных и конструкторских решений. Однако, большой массив данных, полученных на отечественных экспериментальных установках, хранится в разрозненном виде в различных предприятиях отрасли, что вызывает трудности с доступом к этим данным со стороны разработчиков программных средств. Вышесказанное обуславливает необходимость создания единой отраслевой базы оцененных экспериментальных данных.

В докладе представлен анализ наилучших практик по ведению и использованию международных и национальных баз экспериментальных данных – NEA Databank (OECD), STRESA (JRC, European Union), NE-KAMS (US DoE), теплофизическая стендовая база атомной энергетики России и Казахстана (Госкорпорация «Росатом»). На основе проведенного анализа сформированы предложения к формату представления отечественных экспериментальных данных в базе экспериментальных данных, которые включают в себя три основных раздела. Первый раздел посвящен описанию общих сведений об экспериментальном стенде, на котором получены экспериментальные данные:

- тип объекта использования атомной энергии;
- тематическая область;
- масштаб экспериментальной установки.

Второй раздел раскрывает правовые сведения, необходимые для корректной и законной работы с экспериментальными данными:

- информация об организации;
- сведения о договорах, в рамках исполнения которых получены данные;
- сведения о правоохранных документах;

Третий раздел включает информацию, необходимую для оценки качества данных, а именно:

- полнота описания характеристик экспериментальной установки;
- описание методики и условий проведения эксперимента;
- оценка неопределенностей результатов измерений.

Кроме того, проанализированы современные нормативные требования, предъявляемые к экспериментальным данным, используемым для верификации и валидации программных средств, применимых при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии, а также требования к измерениям в области использования атомной энергии. В результате предложены критерии оценки качества экспериментальных данных. При составлении перечня экспериментальных данных по направлению «теплогидравлические расчеты», рекомендованных для включения в базу данных о программных средствах и экспериментальных данных были проведены работы по выбору, систематизации и анализу верификационных отчетов программных средств, аттестованных за последние десять лет Ростехнадзором. В результате анализа указанных верификационных отчетов выбирались данные об экспериментах, использовавшихся для верификации программных средств. В ходе работ проведен сбор, обобщение и систематизация информации об экспериментальных установках и экспериментальных данных по направлению «теплогидравлические расчеты».

Всего в контур анализа было включено более 50 экспериментальных стендов, на которых было проведено 108 экспериментов, выполненных с целью исследования процессов и явлений, характерных для РУ типа ВВЭР, РБМК, БН и БРЕСТ. По большей части экспериментов удалось найти исчерпывающую информацию по их описанию. Там, где это было проблематично, выявлены ссылки на первоисточники информации, с использованием которых можно устранить имеющиеся пробелы.

Предполагается, что создание оцененной базы экспериментальных данных позволит сохранять в цифровой форме экспериментальные данные научного наследия отрасли и эффективно планировать новые экспериментальные работы, а также создаст единый механизм обращения с экспериментальными данными, при взаимодействии всех заинтересованных сторон атомной отрасли (Госкорпорации «Росатом» – Ростехнадзор – научно-исследовательские центры – институты РАН – ВУЗы).

Модель подавления турбулентности компланарным магнитным полем при течении жидкого металла в прямоугольном канале

Пятницкая Н. Ю., Свиридов Е. В., Разуванов Н. Г., Мельников И. А. НИУ «МЭИ», г. Москва, PiatnitskyaNY@mpei

Ключевые слова: жидкий металл, термоядерный реактор, ИТЭР, термогравитационная конвекция, активная зона, ртуть, магнитное поле, теплообмен.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований течения жидкого металла в условиях, характерных для каналов теплообменного аппарата перспективного термоядерного реактора (ТЯР) ИТЭР. В рамках работы рассмотрена следующая конфигурация течения: опускное течение в прямоугольном канале в компланарном магнитном поле в условиях двустороннего обогрева. В статье анализируются полученные авторами экспериментальные данные по эволюции пульсаций температуры под действием магнитного поля. По результатам анализа сформулирована экспоненциальная зависимость характеризующая степень подавления турбулентных пульсаций компланарным магнитным полем для плоского канала.

Применение жидкометаллической концепции охлаждения бланкета ТЯР типа ТОКАМАК является одним из наиболее обсуждаемых вопросов в термоядерной энергетике. Для технической реализации такой концепции охлаждения необходимы масштабные экспериментальные исследования, направленные на изучение закономерностей гидродинамики и теплообмена в условиях максимально приближенных к реальным, где жидкометаллический теплоноситель циркулирует при одновременном воздействии магнитного поля и термогравитационной конвекции. В последнее время на базе научно-образовательного центра МЭИ – ОИВТ РАН стало возможным получение экспериментальных данных на крупномасштабных установках, адаптированных под исследование закономерностей МГД-теплообмена с использованием зондовых методов. Наряду с получением опытных данных, которые могли бы быть использованы для валидации CFD кодов, важным направлением исследований является разработка простых алгебраических моделей для инженерных расчетов, не требующих больших вычислительных ресурсов. Для проведения экспериментов используется УНУ «Ртутный МГД-стенд», а в качестве измерительного зонда используется шарнирный зонд.

Исследования проводились на экспериментальном стенде РК-2, расположенном в ОИВТ РАН. В качестве исследуемой МГД конфигурации было выбрано не исследованное ранее опускное и подъемное течение ртути в прямоугольном канале с двухсторонним обогревом в компланарном МП в следующем диапазоне режимных параметров Re = 10000–50000, Ha = 0–800, Gr_q = 10^8 – 10^9 . Опытный участок представляет собой канал прямоугольного сечения размером 17×56 мм (толщина стенки 1,5 мм), расположенный в зазоре между двумя полюсами электромагнита постоянного тока так, что МП направлено вдоль длинной стороны канала. Такая конфигурация МГД-теплообмена соответствует одному из проектов. Для осуществления различных режимов обогрева на длинных сторонах канала смонтирован ленточный двухсекционный нагреватель, обеспечивающий возможность и двустороннего, и одностороннего обогрева.

Для измерения основных характеристик течения в эксперименте использовался шарнирный зонд. Зонд представляет собой рычаг, способный поворачиваться вокруг шарнира «шар по конусу». Основные его части изготавливаются из нержавеющей стали. Более длинное плечо рычага – телескопическая конструкция из трубок – вводится через сильфон в канал рабочего участка навстречу потоку. На его конце устанавливается датчик – микротермопара или датчик скорости. Другое плечо рычага связано с координатным механизмом, позволяющим перемещать датчик по сечению трубы и определять величину перемещения. Поскольку длина стержня зонда (200–400 мм) велика по сравнению с эквивалентным диаметром канала, то можно считать, что при повороте стержня датчик, перемещаясь по радиусу, остается практически в одной плоскости, перпендикулярной оси канала.

На ртутном стенде РК-2 были получены экспериментальные данные по полям температуры, температурам стенки, локальным числам Нуссельта, профилям интенсивности пульсации температур, а также другим статистическим характеристикам пульсаций температуры при подъемном и опускном течении жидкого металла в компланарном магнитном поле в условиях слабого влияния термогравитационной конвекции. Полученные данные позволяют создать модель подавления турбулентности компланарным магнитным полем.

Основная идея модели учета влияния МП на интенсивность теплообмена заключается в корректировке коэффициента турбулентного переноса в зависимости от таких режимных параметров как число Гартмана и число Рейнольдса.

В результате обобщения экспериментальных данных по пульсационным характеристикам потока было получено распределение безразмерной интенсивности температурных пульсаций в зависимости от параметра МГД-взаимодействия N = Ha²/Re, которая отражает степень подавления пульсаций компланарным магнитным полем. Модель подавления турбулентности магнитным полем хорошо согласуется с опытными данными в диапазоне режимных параметров: Gr/Re² = 0-1/4, Ha²/Re = 0-3.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ №17-79-104442.

Экспериментальное исследование полей температуры и коэффициента теплоотдачи при подъемном и опускном течении жидкого металла в канале, имитирующем тепловыделяющую сборку активной зоны ядерного реактора БРЕСТ

Свиридов В. Г., Генин Л. Г., Новиков А. О. НИУ «МЭИ», г. Москва, e-mail: <u>andov92@mail.ru</u>

Ключевые слова: жидкий металл, ядерный реактор, твэл, БРЕСТ, эксперимент, активная зона, ртуть.

В докладе представлено описание эксперимента, посвященного исследованию теплообмена жидкого металла на модели, имитирующей активную зону ядерного реактора БРЕСТ. Описана конструкция установки, опытного участка и представлены первые полученные результаты экспериментов. Опытный участок представляет собой фрагмент топливной сборки реактора БРЕСТ. В эксперименте также исследуется значимость влияния термогравитационной конвекции на теплообмен. Для этого в канал вводится фрагмент, имитирующий дистанционную решетку в реакторе. Этот фрагмент способен перемещаться вдоль по исследуемому каналу и таким образом при проведении эксперимента получают трехмерные поля температур.

Основой проектирования вновь создаваемых атомных и термоядерных реакторов является теплогидравлический расчет активной зоны, выполняемый при помощи машинных кодов на основе действующих теоретических моделей, которые не учитывают влияние термогравитационной конвекции на теплообмен. Наши исследования показывают, что это неверно и наличие термогравитационной конвекции нельзя исключать при расчетах теплообмена жидких металлов. Поэтому было решено инициировать проведение эксперимента для установления значимости влияния термогравитационной конвекции на теплообмен при течении жидких металлов. У большинства металлов высокая температура плавления, вследствие чего более экономично проводить эксперименты на ртути, так как она находится в жидком состоянии при комнатных температурах. Для измерений используется зонд шарнирного типа с микротермопарой.

Для проведения экспериментов используется УНУ «Ртутный МГД-стенд», а в качестве измерительного зонда используется шарнирный зонд.

Канал образован тремя одинаковыми частями трубы, имитирующими твэлы, каждая из которых представляет собой шестую часть целой трубы. Между ними находятся плоские перегородки шириной 11 мм, соединенные с трубами лазерной сваркой. Длина опытного участка составляет 0,87 м.

Обогрев опытного участка осуществляется с помощью электрического нагревателя. Нагреватель выполняется из нихромовой ленты, пропущенной через чулок из стекловолокна. Сечение ленты составляет $6 \times 0,2$ мм. Нагреватель накладывается на часть трубы, сгибаясь на 180° в верхней части трубы. Ленты каждой из трех частей трубы соединены между собой последовательно. Таким образом, длина нагревателя для каждой из частей труб составляет две длины опытного участка. Перед накладкой нагревателя на опытный участок его предварительно покрывают слоем стеклоткани для исключения электрического контакта между нагревателем и металлической стенкой труб. Поверх нагревателя накладываются дополнительно два слоя стеклоткани и еще кусок трубы диаметром 25 мм. Конструкция скрепляется путем обмотки всего опытного участка лентой из стеклоткани. Для определения потерь используются 3 тепломера.

В опытный участок вводится фрагмент, имитирующий дистанционирующую решетку ядерного реактора БРЕСТ. Этот фрагмент способен передвигаться вдоль по се-

чению канала. Измерения проводятся на разном расстоянии от решетки и, таким образом, можно получить трехмерные поля температур.

Экспериментальный стенд оснащен специально созданной автоматизированной системой (АСНИ) на базе аппаратуры National Instruments, и Hewlet tPackard. Исследуемое сечение покрывается координатной сеткой. При подходе к стенке узлы сгущаются, чтобы упростить задачу поиска стенки по излому профиля температуры. Автоматизированная система управления осуществляет последовательное перемещение термопары зонда во все узловые точки координатной сетки. В каждой точке по заданной программе производится следующая последовательность измерений:

- Измерение температуры ртути в течение 15-20 секунд с частотой 1 кГц;

- Получение среднего значения температуры;

- Определение интенсивности температурных пульсаций;

 Измерение среднемассовой температуры ртути на входе и выходе из опытного участка, температуры воздуха и расходомерного узла;

- Измерение напряжения и силы тока на нагревателе;

- Контроль напряжения на тепломерах.

Полученные результаты позволяют определить температуру во всех точках контура исследуемого сечения, то есть, распределение T_c по периметру сечения, необходимое для расчета коэффициентов теплоотдачи. После всех измерений система формирует файл отчета по эксперименту в виде таблицы экспериментальных данных.

В ходе экспериментов были получены опытные данные в виде таблиц для режимов, характеризующихся числами Re = 20000–40000 и $q_c = 30000-40000$ Вт/м². Таблицы с опытными данными очень громоздки, поэтому для наглядности необходимо визуализировать полученные данные. Для этого используется специальный обработчик двухмерных массивов данных, который подготавливает полученную таблицу экспериментальных данных в удобный для изучения вид, а также строит поля температур и температурных пульсаций в канале, графики распределения температуры стенки и температурных пульсаций на стенке по периметру канала и профили температур и температурных пульсаций от стенки до центра потока.

Теплообмен при смешанной конвекции расплава соли в присутствии магнитных полей

Белавина Е. А., Беляев И. А., Бирюков Д. А., Котляр А. В., Листратов Я. И., Рознин И. М., Свиридов В. Г.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, <u>bia@ihed.ras.ru</u> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

Ключевые слова: ядерная и термоядерная энергетика, реактор ТОКАМАК, теплоноситель, смешанной конвекции, имитатор солевых расплавов, поперечное магнитное поле, поле температуры.

Современная энергетика планомерно адаптирует консервативные взгляды на альтернативные теплоносители. В связи с развитием технологического оснащения применение расплавов солей постепенно занимает свою нишу в области высокотемпературных решений. Особый интерес представляет применение расплавов солей в ядерной и термоядерной энергетике, где их использование в качестве рабочих сред позволит реализовать ряд инновационных решений в области обращения с ядерным топливом. Несмотря на значительные достижения в отдельных задачах применения расплавов солей, основные параметры теплоносителя этого класса мало изучены, как в вопросах совместимости материалов, так и в отдельных аспектах теплогидравлических закономерностей. Данная работа посвящена особенностям смешанной конвекции в присутствии сильных магнитных полей, которые являются неизбежными в случае применения теплоносителей в условиях реакторов типа ТОКАМАК.

Исследования гидродинамики и теплопередачи электропроводящих теплоносителей, под воздействием магнитного поля, выполняются в течение многих лет исследовательской группой МЭИ – ОИВТ. Предполагаемые МГД-конфигурации, приближенные к условиям реакторов ТОКАМАК, изучались с использованием ртути в качестве модельной жидкости. Было обнаружено, что в потоке возникают неожиданные режимы течения жидкого металла, сопровождающиеся аномально высокими колебаниями температуры. Исследования изначально планировались с точки зрения изучения возможности существования подобных особенностей при применении расплавов солей.

В настоящее время, даже современными методами математического моделирования физических процессов, такими как DNS (Direct Numercial Simulation) и LES (Large Eddy Simulation), без верификации результатов по экспериментальным данным невозможно обосновать работу теплообменных устройств реакторов токамаков. Поэтому для воссоздания условий, близких к условиям термоядерных установок с магнитным удержанием, установка PK-3 была модернизирована для изучения имитаторов солевых расплавов. В качестве имитатора применяется 30 % водный раствор гидрооксида калия (KOH), что позволяет изучить принципиальные особенности теплогидравлики электропроводных жидкостей с числами Прандтля более единицы.

В представленном исследовании проведены эксперименты по изучению полей температуры при опускном течении имитатора расплава соли в круглой обогреваемой трубе в сильном поперечном магнитном поле (Магнитные поля до 1 Тесла, Числа Гартмана до 14). Рассчитаны коэффициенты теплоотдачи. На основании проведенных экспериментов сделаны выводы о влиянии магнитного поля на теплообмен и гидродинамику расплавов солей.

Теплообмен при смешанной конвекции жидкого металла в присутствии магнитных полей

Бирюков Д. А., Пятницкая Н. Ю., Сардов П. А., Беляев И. А., Свиридов Е. В., Разуванов Н. Г., Свиридов В. Г.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, <u>bia@ihed.ras.ru</u> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

Ключевые слова: реактор ТОКАМАК, поперечное магнитное поле, модельная жидкость, плавучесть, температура, поле температуры, пульсации температур.

Экспериментальные исследования гидродинамики и теплопередачи, под воздействием магнитного поля, выполняются в течение многих лет исследовательской группой МЭИ – ОИВТ. Предполагаемые МГД-конфигурации, близкие к условиям реактора ТОКАМАК, изучались с использованием ртути в качестве модельной жидкости. Такой вид модельной жидкости позволяет минимизировать неопределенность результатов. Собранные данные включают в себя усредненные по времени температурные поля, распределения локальных температур стенки и статистических характеристик пульсаций температуры в потоке. Получение таких данных стало возможным благодаря уникальной технологии микротермопарных погружных зондов.

Недавние экспериментальные данные показали, что совместное воздействие сильного поперечного магнитного поля и плавучести проявляется в ранее неизвестных формах. Было обнаружено, что в потоке возникают неожиданные режимы течения жидкого металла, сопровождающиеся аномально высокими колебаниями температуры. Однако, существовавшие на тот момент экспериментальные возможности не позволяли ответить, будет ли это явление существовать в более сильных магнитных полях, так как подавление аномальных пульсаций температуры в максимально возможном магнитном поле (1 Тесла, число Гартмана до 500) обнаружено не было. Для выполнения это задачи была создана новая экспериментальная установка. Контур PK-3 (HEat transfer Liquid Metal Experimental Facility (HELMEF)) был разработан и введен в эксплуатацию для исследования теплообмена и гидродинамики при ранее неизученных соотношениях параметров потока, таких как числа Рейнольдса, Гартмана и Грасгофа, в которых измеряются температура, скорость и их статистические характеристики. Новые экспериментальные данные были получены и обработаны путем построения температурных полей и полей температурных пульсаций характеристик. Измерения проводились при опускном течении ртути в круглой трубе под воздействием поперечного магнитного поля.

Изученное поперечное сечение расположено в точке $z/d \sim 37$ от начала нагретой зоны экспериментальной секции. Расход и внешний нагрев фиксировались при значениях, обеспечивающих числа Рейнольдса Re = $11 \cdot 10^3$, Грасгофа – Gr = $8,2 \cdot 10^7$ для изучения влияния магнитного поля, реализующего числа Гартмана Ha = 0-1300. Полное подавление пульсаций температуры в любой точке экспериментального сечения при Ha = 1300. Этот результат получен впервые и благоприятен для проектирования технических устройств.

Экспериментальное исследование теплообмена при смешанной МГД-конвекции жидкого металла в наклонном канале

Черныш Д. Ю., Бирюков Д. А., Лучинкин Н. А., Беляев И. А., Разуванов Н. Г.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, bia@ihed.ras.ru

Ключевые слова: термоядерная установка, жидкие металлы, гидродинамика, теплообмен, поперечное магнитное поле, пульсации скорости и температуры.

Применение ЖМ в термоядерных установках, где теплообменные каналы находятся в области сильных МП, сопряжено со значительными трудностями, связанными с обеспечением прокачки теплоносителя при больших сопротивлениях течению. Актуальной инженерной задачей является грамотное расположение каналов теплообменных систем, которое позволит минимизировать негативное воздействие магнитного поля.

Многие годы объединенная команда ОИВТ РАН и НИУ «МЭИ» проводит исследования в области гидродинамики и теплообмена жидких металлов применительно к проблемам энергетики. В ходе предшествующих работ были исследованы различные конфигурации теплообмена в каналах разной геометрии. Был сделан вывод, что во всех исследованных конфигурациях теплообмена ЖМ могут проявляться следующие неблагоприятные эффекты: 1) сильная неоднородность локальных коэффициентов, 2) образование низкочастотных пульсаций скорости и температуры аномально высокой интенсивности. В связи с этим, стало необходимо выявить диапазон «запрещенных» режимных параметров, который в рамках экспериментального исследования характеризуется соотношениями чисел Рейнольдса (Re), Грасгофа (Gr), Гартмана (Ha). Развитие исследовательской программы привело к необходимости проведения экспериментов в более широком диапазоне режимных параметров, не реализуемых на существующих установках (РК-1, РК-2). В связи с этим был создан экспериментальный стенд РК-3 «HELMEF» (HEattransferLiquidMetalExperimentalFacility), с помощью которого стало возможным проводить исследования в ранее недоступных областях режимных параметров, в частности, по числам Грасгофа (Gr) и Гартмана (Ha).

В данной работе описывается экспериментальное исследование теплообмена при опускном течении жидкого металла (ртуть) в круглом канале (трубе) с однородным обогревом для различных углов наклона канала от вертикали при воздействии поперечного магнитного поля и без его влияния. На экспериментальном стенде РК-3 «HELMEF» зондовым методом измерены поля осредненной и пульсационной температуры. Используя эти данные, получены распределения локальных и средних коэффициентов теплоотдачи. Полученные данные были представлены в виде температурных полей, графиков распределения безразмерной температуры на стенке канала и сопоставлены с имеющимися на данный момент данными из других работ.
Исследование теплообмена при подъемном течении жидкого металла в компланарном магнитном поле

Костычев П. В., Разуванов Н. Г., Свиридов В. Г.

НИУ «МЭИ», г. Москва, <u>Kostychev@yandex.ru</u>

Ключевые слова: магнитная гидродинамика, термогравитационная конвекция, теплообмен, измерение скорости и температуры.

Выполнены исследования гидродинамики и теплообмена при подъемном течении жидкого металла (ЖМ) в вертикальном канале прямоугольного поперечного сечения с соотношением сторон ~3/1 в компланарном магнитном поле (МП) при условии одностороннего обогрева. Задача моделирует течение ЖМ в теплообменном канале системы охлаждения жидкометаллического модуля бланкета термоядерного реактора (ТЯР) типа ТОКАМАК. Эксперименты проведены на базе ртутного магнитогидродинамического (МГД) стенда.

Использовались зондовые методы измерений локальных характеристик теплообмена в канале. Применялись два типа термопарных зондов: шарнирный зонд рычажного типа для детальных измерений полей скорости и температуры в поперечном сечении, и продольный зонд для измерений по длине зоны обогрева канала. Для измерения локальной скорости применялся корреляционный метод.

В работе получены профили осредненной скорости и температуры, распределение безразмерной температуры стенки по периметру канала, характеристики температурных пульсаций потока. Представлены распределения осредненной и пульсационной температур стенки по длине канала и построены критериальные зависимости характеристик теплоотдачи.

В исследуемой конфигурации подъемного течения обнаруживается сильное влияние ТГК на осредненные и пульсационные характеристики теплообмена.

При одностороннем обогреве наблюдается сильная неоднородность в распределении температуры стенки, что в условиях модуля бланкета ТЯР приведет к появлению значительных термических напряжений в стенке канала и что необходимо учитывать при проектировании каналов охлаждения ТЯР.

В ряде режимов течения обнаружены эффекты, связанные с ростом интенсивности пульсаций температуры в компланарном магнитном поле. По мнению авторов, под влиянием термогравитационной конвекции (ТГК) происходит формирование и отрыв возле обогреваемой стенки крупномасштабных вихревых структур, оси вращения которых параллельны вектору индукции МП. Эти вихревые образования вызывают пульсации температуры, в ряде режимов превышающей уровень пульсаций турбулентных. Полученные данные по теплообмену необходимо учитывать при проектировании МГД каналов охлаждения ТЯР.

Построены критериальные зависимости характеристик теплоотдачи в координатах Nu/Nu_т (Ra/Re²) и проведено их сопоставление с аналогичными зависимостями, построенными для неметаллических теплоносителей.

Структурные свойства температурных пульсаций в жидких металлах

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

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, osipov@ippe.ru, osipov177@yandex.ru

Ключевые слова: пульсации, температура, корреляции, структурный функции, жидкий металл, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, масштабная инвариантность, фрактал, свинец-висмут, свинец, вейвлет анализ, мультифрактальный анализ.

Сложный характер изменения параметров системы относительно своего среднего значения (пульсации) является фундаментальным свойством многих физических процессов. В определенных случаях пульсационный характер изменения параметров позволяет получить информацию о состоянии наблюдаемой системы. Например, анализ пульсаций нейтронного поля в нейтронно-физических системах (реакторы «нулевой» мощности) позволяет определить кинетические параметры системы (эффективность запаздывающих нейтронов, время жизни мгновенных нейтронов и др.). В энергетических реакторах пульсационный характер свойственен и теплогидродинамическим полям. С практической стороны важным свойством пульсационного поля является корреляция или способность системы «запоминать» возмущения. Память системы является проявлением специфического свойства физической системы – масштабной инвариантности, или иначе говоря, симметрии физических законов относительно масштабных преобразований. Таким образом, если система обладает свойством масштабной инвариантности, то пульсационное поле такой системы состоит из самоподобных возмущений различного масштаба, эволюция которых сопровождается изменением их размеров. Очевидно, что если система обладает свойством масштабной инвариантности, то это может представлять как фундаментальный, так и практический интерес, например, с точки зрения контроля различных параметров системы.

В данной работе исследованы временные структурные свойства пульсаций температуры в тяжелых жидких металлах (свинец, висмут) в статических и динамических режимах. Показано, что в статических условиях пульсации температуры обусловлены конвективным (свободным) движением металла. Определены структурные и корреляционные функции пульсационного поля температуры при свободном и вынужденном движении металла. В эксперименте наблюдается масштабная инвариантность пульсационных полей температуры. В общем случае пульсации температуры в жидком металле характеризуются мультифрактальными свойствами и длинными корреляциями.

О доверительности результатов измерений

Арнольдов М. Н. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, arnoldov@ippe.ru

Ключевые слова: достоверность, свойства веществ, погрешность, жидкие металлы.

Требование к достоверности результатов исследований введено в Положение о прядке защиты диссертаций. Однако содержание этого понятия, как в самом Положении, так и в других источниках (Закон РФ «Об обеспечении единства измерений», международный словарь по метрологии и т.п.) не раскрывается.

Представители естественных наук обычно не раскрывают его содержание, в лучшем случае вскользь замечая, что достоверность – что-то вроде точности. Обсуждая вопрос о достоверности полученных результатов, авторы исследований (диссертационных работ) часто указывают, что их достоверность основывается на использовании апробированных методов исследований, детальной оценке погрешностей измерений, проведении комплекса тестовых и тарировочных опытов, что, конечно, правильно. Хотя надо заметить, что иногда и этого не делается.

Обратимся к опыту исследований теплофизических и физико-химических свойств металлов и металлических сплавов.

На погрешность результатов их измерений влияют многочисленные факторы (температура, давление, состав сплавов и др.). Однако, следует иметь ввиду, что металл или сплав при этих измерениях является частью достаточно сложной системы, включающей в себя кроме того внешнюю атмосферу, в которой находятся исследуемые вещества, элементы экспериментальной установки, взаимодействующие с исследуемыми веществами и пр. Процессы, протекающие в такой системе, могут отразиться на результатах измерения.

Обратимся в качестве примера к литературным материалам, посвящённым измерению теплофизических свойств некоторых металлов и сплавов. Литературные данные существенно отличаются друг от друга. В одной из работ утверждается, что представленные результаты достоверны. Тогда, по-видимому, будет правильно считать, что недостоверны другие многочисленные литературные данные, размещённые на этом графике. Однако основания для такого утверждения не приводятся.

Подробное ознакомление с материалами работы приводит к выводу, что само измерение свойства материала выполнено практически безукоризненно: экспериментальная методика многократное успешно использовалась, проведены тестовые испытания, выполнен тщательный анализ погрешности измерений. Сама методика и техника проведения эксперимента, безусловно, интересны. С учётом этих обстоятельств можно говорить о том, что полученные данные достоверны.

Однако столь же достоверно можно утверждать, что полученные экспериментальные данные относятся лишь к конкретному образцу исследуемого материала, непосредственно находящемуся в данный момент в экспериментальной установке. К сожалению, его состав, содержание примесей, методика технологической обработки материала перед загрузкой в экспериментальную установку не приводятся.

Необходимо отметить, что подобная ситуация встречается во многих работах различных авторов, посвящённых измерению различных свойств и оформленных в виде статьи, доклада или диссертации.

Давно известно, что некоторые свойства металлов и их сплавов, теплофизические, электрические и другие, весьма чувствительны к их составу. Особенно внимательно

нужно относиться к измерению свойств эвтектических сплавов, так как состав эвтектической точки зачастую известен с погрешностью. К сожалению, химический анализ таких металлов и их сплавов обычно не сертифицирован и зачастую мало доступен для экспериментаторов.

Кроме результатов измерений свойств металлических расплавов в работе приведены, в частности, измеренные свойства образцов реакторных сталей. Однако эти результаты относятся лишь к конкретной плавке этих сталей, в которой точное содержание многочисленных легирующих элементов не известно. Ясно, что распространять эти сведения на все образцы этих сталей без дополнительных исследований не корректно.

Представляется, что научная общественность, специалисты-метрологи должны сформулировать отношение к таким исследованиям и их результатам. При этом должны приводиться все сведения, которыми могут располагать авторы подобных исследований, о физико-химическом состоянии исследуемого материала.

О влиянии направления течения жидкометаллического теплоносителя на теплогидравлические характеристики в витом парогенерирующем канале

Грабежная В. А., Михеев А. С.

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

Ключевые слова: витой канал, пучок теплообменных труб, модель парогенератора, гидродинамическая устойчивость, продольное течение, поперечное течение, свинец, вода, пар, пульсации температуры и расхода.

Изучение теплообмена в спирально навитых трубах представляет большой интерес в виду широкого использования подобных каналов в инженерной практике, в частности, в атомной энергетике в виде парогенераторов на исследовательских реакторах и АЭС. Витой парогенератор (ПГ-1) испытывался на установке БОР-60, СССР; в виде плоских змеевиков S-образной формы были выполнены микромодульные парогенераторы АЭС «Феникс» и змеевиковые парогенераторы бухтовой конструкции были на АЭС «Суперфеникс», Франция; парогенераторы АЭС «Энрико Ферми», США.

В проектируемой реакторной установке БРЕСТ-ОД-300 в качестве парогенератора рассматривается витой парогенератор бухтовой компоновки. Преимущества конструкций парогенераторов, выполненных в виде спирально навитых труб, по сравнению с прямотрубными конструкциями очевидны. Это компактность, пониженная металлоемкость, решение вопроса температурных расширений. Витые трубы используются в теплообменном оборудовании не только для того, чтобы увеличить поверхность теплообмена, решить вопрос с термическим расширением, но также и для того, чтобы увеличить коэффициент теплообмена к жидкости, текущей внутри труб.

В 2011–2013 гг. в ГНЦ РФ – ФЭИ на стенде СПРУТ были проведены теплогидравлические испытания модели витого парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 (вариант 2000 г.) с продольным обтеканием свинцом пучка теплообменных труб. Парогенератор представлял собой бухту витых теплообменных труб с углом наклона к горизонту в 8°.

Модель парогенератора состояла из двух идентичных трехтрубных модулей. В качестве диаметра навивки трехтрубного пучка выбран средний диаметр навивки теплопередающих трубок натурного парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300, 1600 мм. Разработчиком модели, ее электрического обогрева, тепловой изоляции и металлоконструкций, связывающих две трехтрубные модели, является ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Программа испытаний модели парогенератора была направлена на изучение теплообмена и теплогидравлической устойчивости парогенерирующих труб при работе одной секции, а также на выявление пульсаций расхода во втором контуре, обусловленных параллельной (совместной) работой двух секций при параметрах частичных и пусковых режимов.

Результаты испытаний модели парогенератора показали сильное влияние давления на характер распределения температуры корпуса. В режимах с высокой входной температурой свинца во всем диапазоне изменения расходов воды на большей поверхности витого участка теплообмен практически отсутствовал. Понижение температуры свинца на входе в витой участок способствовало сокращению зоны с низким теплообменом и понижением температуры пара на выходе из модуля. Увеличение расхода воды также снижало температурную нагрузку парогенерирующей трубы.

Во всем диапазоне изменения режимных параметров не выявлено пульсационных режимов с опрокидыванием циркуляции во втором контуре. Наблюдаемые колебания

расхода питательной воды на входе в модуль парогенератора обусловлены условиями работы модуля и свинцового стенда в целом. При проведении испытаний неустойчивые режимы работы парогенерирующих труб зафиксированы не были.

В экспериментах течение теплоносителей было противоточным для обоих теплоносителей по витому каналу. Теплоотдача со стороны свинцового теплоносителя при продольном омывании теплопередающей трубы меньше, чем в случае поперечного обтекания. Однако были получены проектные значения температуры перегретого пара на выходе из модели.

Несмотря на то, что результаты проведенных испытаний модели парогенератора дали обширную информацию о характере теплообмена в различных зонах парогенерирующего канала, однако недостаточное количество теплопередающих труб в модуле (всего три) не позволяет сделать вывод о гарантии полной гидродинамической устойчивости ПГ РУ БРЕСТ во всем возможном диапазоне эксплуатационных параметров. С другой стороны, в реальной конструкции движение греющего теплоносителя опускное с обтеканием пучка труб, близким к поперечному обтеканию. Геометрические характеристики витого парогенератора варианта 2000 года отличаются от таковых, закладываемых в проект парогенератора настоящей РУ (иные размеры теплопередающей трубы, другие шаги коридорного размещения этих труб, другой угол наклона труб к горизонту). Поэтому недостаточная аргументированность переноса результатов, полученных на трехтрубной модели, на натурный парогенератор послужили основанием для проведения испытаний на многотрубной, полновысотной фрагментной модели уменьшенного диаметра одного ряда трубного пучка модуля штатного парогенератора, разработка и изготовление которого была выполнена в ОАО «ИК «ЗИОМАР».

Несмотря на то, что входная температура воды в коллектора отличалась от температуры насыщения при заданном давлении менее, чем на 5 °C, то есть в опускной ветви парогенерирующей трубы имело место кипение, пульсаций расхода воды на входе в коллектор, которые бы указывали на теплогидравлическую неустойчивость, не говоря об опрокидывании циркуляции, обнаружено не было. При проведении испытаний отсутствовали какие-либо шумы, свойственные неустойчивым режимам работы контура.

Пульсации давления на входе и выходе из коллекторов коррелировали между собой и с пульсациями расхода воды в модель. Не замечено влияния шайбования на характер пульсаций давления. Двойная амплитуда пульсаций давления не превышала 0,45 бар.

Не обнаружено пульсаций температуры воды и пара, соответственно на входе в коллекторы и выходе из коллекторов. Температуры пара в обоих коллекторах совпадали с точностью до одного градуса Цельсия. Отсутствие пульсаций температуры пара косвенно указывает на то, что все девять трубок в коллекторе находятся в одинаковых условиях и разверка расхода воды по парогенерирующим трубкам практически отсутствует.

При высоких температурах свинца температура перегретого пара всегда была близка к входной температуре свинца.

Проведенные испытания показали отсутствие теплогидравлической неустойчивости, как в случае продольного, так и поперечного омывания парогенерирующей трубы жидкометаллическим теплоносителем. При прочих равных параметрах температура пара на выходе парогенерирующей трубы в случае поперечного омывания выше, чем при продольном омывании.

Полученные экспериментальные данные при испытании рассматриваемых моделей в первую очередь необходимы для верификации кодов, позволяющих правильно рассчитывать различные режимы работы парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300.

Экспериментальное и расчётное определение сопротивления на начальном участке канала ячейки твэл

Авдеев Е. Ф., Смирнова В. О., Чан Хонг Фук

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ», г. Обнинск, <u>konstansta@yandex.ru</u>

Ключевые слова: ячейка ТВЭЛ, гидравлический диаметр, относительный шаг решетки ТВЭЛ, начальный участок канала, объемный расход, средняя скорость, напряжение трения, давление торможения, статическое давление, микротрубка.

В докладе представлены результаты экспериментального исследования и расчетные оценки сопротивления начального участка увеличенной модели канала треугольной ячейки ТВЭЛ с плотной упаковкой (x = 1,014). Измерены поля скоростей в пяти сечениях канала в одном из диагональных направлений. Они имеют более заполненный характер у стенки, по сравнению с турбулентным течением в круглых трубах.

По измеренной максимальной скорости вдоль канала найдено длина начального участка, составляющая 36,5 калибров, что значительно короче начальных участков в круглых трубах (длина 50 калибров). Качественное изменение максимальной скорости вдоль оси канала аналогично изменению в круглой трубе. Сначала максимальная скорость увеличивалась по сравнению с входной на 22 %, после чего происходило ее уменьшение и выход на стабилизированные значения.

Потери давления на начальном участке найдены тремя способами:

- непосредственным измерением вдоль канала;
- расчётами через экспериментальные значения напряжения трения на стенке;

– приближенным расчетом турбулентного пограничного слоя, на основе интегрального соотношения Т. Кармана.

В последнем случае найдено другое значение, аналога эмпирического коэффициента Дробленкова, из условия совпадения расчётов и опытов.

Главным результатом работы является доказательство неправомерности расчёта потери давления на начальных участках каналов ячеек ТВЭЛ в предположении стабилизированного течения, так как занижение потерь давления составляет 52 %, по сравнению с действительными.

Особенности процессов при гидроударе в трубопроводе с малым недогревом теплоносителя

Авдеев Е. Ф., Каракуш Джихан

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ», г. Обнинск, <u>e_avdeev@iate.obninsk.ru</u>

Ключевые слова: гидроудар, волна повышенного давления, волна пониженного давления, критическое давление, критическая скорость, кипящий реактор, барабан сепаратор, атмосферный деаэратор, пароводяная смесь, вскипающий теплоноситель.

В докладе рассматривается нестандартная причина возникновения гидроудара, за счет формирования критического давления в месте дополнительного подвода расхода во всасывающий трубопровод насосов с температурой воды 90 °С.

Критическое давление возникает при истечении пароводяной смеси через разуплотнение в клапане на линии расхолаживания кипящего реактора. На входе в клапан параметры воды приняты равными: по недогреву 5 °C, давление 60 бар.

Критическое давление и расход находятся по общепринятой методике. На основе особенностей акустики в двухфазной и однофазной среде, делается неожиданное, но правильное заключение, что гидроудар во всасывающем трубопроводе возбуждается еще до поступления в него пароводяной смеси (пар может сконденсироваться в трубопроводе расхолаживания).

Далее процесс гидроудара пойдет по классическому сценарию, за исключением причины появления волн пониженного давления (задвижки нет). Возникновение волн пониженного давления в докладе обосновывается местом встречи волн нормального восстановления давления, за которыми будет разнонаправленные движения среды. Причем, по интенсивности волна пониженного давления будет даже превосходить пониженные давления при «отрыве» воды от задвижки.

В докладе доказано, что основная причина «запаривания» трубопровода происходит за счет вскипания воды при прохождении волн пониженного давления. Представлены расчеты массового паросодержания при различных значениях давления в волнах пониженного давления. Их значения взяты из экспериментов, проведенных авторами на стенде Ресурсного Центра ИАТЭ НИЯУ «МИФИ», однако (в отличие от экспериментов), для температуры во всасывающем трубопроводе.

Отдельно представлен алгоритм расчета изменения расходов (до подвода и после) при подводе дополнительного расхода под углом 90°.

Последнее имеет принципиальное значение, т. к. только в этом случае половина количества движения подводимого дополнительного расхода идет на торможение потока.

При получении расчетных зависимостей использована теорема изменения количества движения и уравнение Д. Бернулли для потока. Место подвода дополнительного расхода принято как местное сопротивление и учтены неравенство энергий на единицу веса в потоках до и после подвода.

Выполненные методом последовательных приближении, расчеты для трех значений подведенного дополнительного расхода (2,86, 5,72, 8,58 кг/с) показали дефицит расхода до насосов, соответственно – 9,5, 14,9 и 20,5 %, по сравнению с расходом во всасывающем трубопроводе без дополнительного подвода.

В докладе качественно обосновывается также экспериментальный факт увеличения во вскипающем теплоносителе интенсивности гидроудара по сравнению с его интенсивностью в однофазном потоке.

Определение расхода в каналах ячеек ТВЭЛ по измеренной максимальной скорости

Авдеев Е. Ф., Смирнова В. О.

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ», г. Обнинск, <u>e_avdeev@iate.obninsk.ru</u>

Ключевые слова: турбулентное течение, стабилизированный участок, гидравлический диаметр, шаг решетки ТВЭЛ, плотная упаковка ячеек ТВЭЛ, максимальная скорость, средняя скорость, объемный расход, ячейка ТВЭЛ, треугольная решетка.

Авторы доклада не предполагают возможность измерения максимальной скорости в ячейках ТВЭЛ ТВС промышленных или исследовательских реакторов.

Однако, при экспериментальном моделировании с ограниченным числом имитаторов твэлов ТВС, часть расхода будет проходить между чехлом ТВС и телами, которое трудно установить по общему расходу через ТВС. Кроме того, перераспределение расходов в каналах ячеек ТВЭЛ может вызывать возникающие на входе в ТВС вихревые трубки. В этих условиях, для определения коэффициентов сопротивления или теплоотдачи, необходимо как можно более точно определить значения расходов и средней скорости в ячейках ТВЭЛ.

Предложенные зависимости для определения расходов и средней скорости в ячейках ТВЭЛ получены по аналогии связи между средней и максимальной скоростями при турбулентном течении в круглых трубах, которая была разработана на кафедре теплофизики в ИАТЭ НИЯУ «МИФИ».

Поскольку связь между средней и максимальной скоростями включает коэффициент сопротивления трения, теоретически найдено выражение для коэффициента сопротивления трения в каналах ячеек ТВЭЛ с плотной упаковкой, по методике, разработанной в ГНЦ РФ – ФЭИ Ушаковым П.А. в прошлом веке.

Полученная авторами зависимость между средней и измеренной максимальной скоростями имеет вид:

$$V_{\rm cp} = \frac{U_{\rm max}}{1 + A\sqrt{\lambda}},\tag{1}$$

где λ – коэффициент сопротивления трения.

Это выражение рекомендуется для относительного шага треугольной решетки ТВЭЛ x < 1,02. Значение коэффициента A, включающее дефицит средней скорости, получено сравнением формулы (1) с выполненными авторами экспериментами на увеличенной модели канала ячейки ТВЭЛ с плотной упаковкой. Оно оказалось меньше, чем в круглой трубе (A = 1,4425).

Распространение формулы (1) с найденным коэффициентом *A*, на решетки твэл с другими относительными шагами потребует дополнительных экспериментальных подтверждений.

СЕКЦИЯ 3.

Экспериментальные и расчетные исследования в обоснование технологии ЖМТ БР

О возможности исследований отработавших кассет и твэлов реакторов АПЛ с ТЖМТ проектов 705 и 705К для обоснования технологий перспективных ЯЭУ

Забудько А. Н., Бугреев М. И., Иванов К. Д., Николаев С. А., Чернов В. А., Николаев А. Н., Мастеров А. В.

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

Ключевые слова: отработавшие кассеты, отработавшие выемные части, твэлы, реакторы АПЛ, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, коррозия твэлов, материаловедческие исследования твэлов.

При разработке новых реакторных установок с ТЖМТ используется опыт эксплуатации реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем. При этом общепринятым считается, что в части решения вопросов технологии жидкого металла опыт эксплуатации первого поколения установок (АПЛ заказа 645 и наземный прототип стенд 27 ВТ-5) в основном негативный. Это подтверждается не только косвенными данными, но и прямым обследованием активных зон стенда 27 ВТ-5 после завершения эксплуатации, а также обследованием трактов циркуляции теплоносителя. Во многом именно этот опыт используется оппонентами при критике вновь разрабатываемых установок (БРЕСТ, СВБР).

В то же время при эксплуатации установок второго поколения были реализованы принципиально другие условия по обеспечению качества теплоносителя и чистоты первых контуров этих установок, которые позволили кардинально снизить масштаб шлакования первых контуров и исключить связанное с этим изменение их теплогидравлических характеристик.

Кроме того, анализ интенсивности потребления первым контуром кислорода показал, что в процессе эксплуатации на всех установках наблюдалось устойчивое её снижение. В целом, это можно рассматривать как подтверждение достаточности использованных технических решений по обеспечению коррозионной стойкости конструкционных сталей и благоприятные тенденции развития процессов взаимодействия теплоносителя со сталями.

Однако упомянутые выше аргументы являются лишь косвенными признаками успешного решения задач технологии теплоносителя, и не воспринимаются должным образом оппонентами, поскольку не подтверждены количественными результатами соответствующих обследований после завершения эксплуатации установок.

В настоящее время установки проектов 705 и 705К являются единственными промышленными ЯЭУ с ТЖМТ, успешно завершивших эксплуатацию в объёме проектного ресурса. Отработавшие выемные части (ОВЧ) реакторов АПЛ проектов 705 и 705К хранятся в отделении Гремиха СЗЦ «СевРАО» – филиала ФГУП «РосРАО». Для контроля параметров ядерной и радиационной безопасности при хранении ОВЧ внедрена единая система контроля параметров ОВЧ (ЕСК), которая включает в себя систему контроля нейтронного потока, систему аварийной сигнализации о возникновении самоподдерживающейся цепной реакции (САС СЦР), систему температурного контроля и систему контроля наличия и удаления воды в ячейках хранения ОВЧ. За время непрерывной работы с 2008 года ЕСК не зафиксировала отклонений параметров ОВЧ от штатных.

С 2012 года в отделении Гремиха начаты работы по разборке ОВЧ. Согласно принятому регламенту, ОВЧ извлекается из ячейки хранения в ячейку разогрева, а далее – в специальный бак разборки, затем после кантования на 180° помещается на стапель разборки, где производится демонтаж дна ОВЧ, фильтра и нижней твэльной решетки. Далее кассеты извлекаются из ОВЧ и помещаются в контейнер тип 6 для промежуточного хранения, либо сразу помещаются в герметичные пеналы и далее в ТУК-108/1, который обеспечивает защиту топливных кассет от механических и климатических воздействий при хранении и транспортировке кассет, а также обеспечивает биологическую защиту обслуживающего персонала. Далее ТУК-108/1 доставляются на накопительную площадку АО «Атомфлот» (г. Мурманск) на специальном теплоходе «Серебрянка», затем отправляются железнодорожным транспортом на ФГУП «Маяк». Для обоснования этого регламента выполнен цикл расчетов в обоснование ядерной и радиационной безопасности, а также внедрены системы контроля нейтронного потока, САС СЦР и система температурного контроля сплава при разогреве.

К настоящему моменту разобраны 4 ОВЧ проекта 705 и 1 ОВЧ проекта 705К. Разборка выполнена в штатном режиме, без аварийных ситуаций, повреждений оболочек твэлов и выхода активности за пределы твэлов не обнаружены.

Исследования твэлов реакторов с ТЖМТ являются логическим завершением этой эксплуатации и одновременно источником информации для создания расчетных методик массопереноса и их верификации. ГНЦ РФ – ФЭИ и ОКБ «Гидропресс» располагают подробной информацией о режимах и условиях эксплуатации всех реакторных установок, в том числе, включая имевшие место отклонения от нормальных условий и все проводимые технологические мероприятия.

В ходе обследования выбранных для этого кассет и твэлов могут быть определены следующие параметры:

 толщина налёта на оболочке твэлов продуктов коррозии конструкционных материалов и оксидов теплоносителя и её распределение по высоте твэлов;

- химический и фазовый состав отложений;

 изменение толщины защитного покрытия и его других свойств по длине твэла от входа теплоносителя до выхода из АЗ;

- структурный и фазовый состав защитного покрытия;

- сплошность защитного покрытия и возможное наличие коррозионных очагов;

прочность сцепления защитного покрытия с оболочкой твэл, твердость защитного покрытия;

- распределение элементного состава защитного покрытия по его толщине;

распределение элементного состава стали вблизи границы с оксидным покрытием;

 материаловедческие характеристики непосредственно самого материала оболочек твэлов.

Эти результаты с учетом истории эксплуатации ЯЭУ будут использованы для корректировки базовой (полуэмпирической) физико-химической модели роста оксидных пленок, которая абсолютно необходима при последующей верификации расчетных кодов массопереноса в первых контурах реакторных установок с тяжелым теплоносителем.

Значимость и уникальность имеющихся результатов для создания адекватных моделей взаимодействия в системе сталь – теплоноситель состоит не только в длительной и успешной эксплуатации установок с ТЖМТ, но и в том, что они получены при воздействии на материал оболочек твэлов нейтронного потока, который со временем принципиально изменяет свойства сталей, в том числе и диффузионные свойства их компонентов, которые влияют на состав и кинетику формирования оксидных покрытий.

Будут получены экспериментальные данные, которые позволят применительно к РУ нового поколения достичь следующих результатов: подтвердить правильность принятых технических решений по технологии теплоносителя при длительной эксплуатации серии промышленных установок, что существенно усилит позиции разработчиков РУ нового поколения в плане доказательств успешности решения данных вопросов; определить влияние радиационных факторов на поведение сталей в условиях воздействия нейтронного потока, которые необходимо использовать при разработке моделей массопереноса в тяжелом теплоносителе; скорректировать базовую физико-химическую модель роста оксидных пленок, которая абсолютно необходима при последующей верификации расчетных кодов массопереноса в первых контурах реакторных установок с тяжелым теплоносителем.

Повышение информативности контроля термодинамической активности кислорода в расплавах тяжелых жидкометаллических теплоносителей

Иванов К. Д., Ниязов С.-А. С., Чёпоров Р. Ю.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>sniyazov@ippe.ru</u>

Ключевые слова: термодинамическая активность кислорода, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, твердый электролит, водород, диффузионный выход железа, оксидная пленка, парциальное давление, термокачка.

При определении физико-химического состояния тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ) возникает проблема неоднозначной трактовки параметра термодинамической активности (ТДА) кислорода, когда одним и тем же значениям определяемого параметра соответствуют качественно различные состояния теплоносителя.

Общим подходом к повышению информативности контроля ТДА кислорода в плане определения реального физико-химического состояния теплоносителя является создание условий, позволяющих получить отклик в виде соответствующих изменений параметра ТДА кислорода на то или иное целенаправленное воздействие на теплоноситель. Наиболее простым методом получения подобной информации на практике является изменение температуры теплоносителя, в ходе которого происходит перераспределение кислорода между химически активными в данных условиях примесями, которое в свою очередь отражается на характере изменения ТДА кислорода.

Этот прием может использоваться в различных вариантах. В данной работе использованы два способа. В условиях статической установки применялся метод периодического отключения обогрева всего объёма теплоносителя. В условиях неизотермического циркуляционного стенда использовался метод измерения ТДА кислорода в различных температурных зонах.

Определение температурных зависимостей показаний датчиков ТДА кислорода в расплаве свинца-висмута в статической лабораторной установке. Эксперименты по определению температурных зависимостей показаний датчиков ТДА совмещались с испытаниями ряда металлургических сталей AISI-430, 03X18Ю3БТ и ЭИ-417 на предмет их коррозионной стойкости в расплаве свинца-висмута.

Методика расчета коэффициентов температурной зависимости показаний датчика состояла в следующем. На первом этапе проводилось сглаживание исходных зависимостей ЭДС и температуры методом плавающего усреднения по 5 экспериментальным точкам. Из изменений показаний датчика вычитались изменения, не связанные с температурой, после чего найденные значения ΔE представлялись в виде зависимости от температуры, по которой рассчитывались численные значения температурного коэф-фициента.

Определение температурных зависимостей показаний датчиков ТДА кислорода в расплаве свинца-висмута в циркуляционном стенде. В отличие от лабораторной установки, где в ходе изменений температурного режима изменяются температурные условия в месте расположения датчика ТДА кислорода, при работе циркуляционного стенда в неизотермическом режиме температурные условия в местах расположения датчиков, как правило, поддерживаются постоянными. Это исключает влияние изменяющихся температурных условий в электродах сравнения датчиков, позволяя путем сравнения показаний датчиков, расположенных в разных температурных зонах стенда, непосредственно определять температурную зависимость ТДА кислорода в теплоносителе. Эксперименты по определению температурных зависимостей ТДА кислорода проводились в неизотермических режимах работы стенда «TT-2M» при $T_{rop} \approx 540$ °C и $T_{xon} \approx 420$ °C. Для этого использовались три датчика активности кислорода, расположенные на «горячей» стороне стенда и на «холодной» стороне. Изменение физикохимического состояния теплоносителя в ходе экспериментов обеспечивалось путем включения в работу источника металлических примесей (ИМП), расположенного на одном из «горячих» байпасов, и его последующего вывода из работы. При этом в теплоноситель искусственно вводилась примесь железа, и ТДА кислорода в теплоносителе снижалась. При выключении из работы ИМП активность кислорода за счет действия внутренних источников кислорода повышалась.

Выполненные экспериментальные исследования позволили сделать следующие выводы:

– Применительно к проблеме повышения информативности датчиков контроля ТДА кислорода в расплавах тяжелых металлов, связанной с неоднозначной трактовкой результатов измерений этого параметра, экспериментально отрабатывался метод, основанный на определении помимо показаний датчика их температурной зависимости.

Применительно к условиям статической лабораторной установки для определения температурной зависимости показаний датчика ТДА кислорода был применен метод периодического возмущения температурного режима теплоносителя, который использовался в ходе испытаний образцов сталей, проводимых при температуре 650 °C в течение нескольких микрокампаний. Кислородный режим теплоносителя обеспечивался при этом использованием раскислительного действия водорода в начале микрокампании и газообразного кислорода на последующих этапах для поддержания достигнутого уровня ТДА кислорода.

В ходе выполнения этих исследований получены экспериментальные данные по характеру изменения температурной зависимости показаний датчиков ТДА кислорода в зависимости от степени раскисления теплоносителя, которые продемонстрировали существенные отклонения этого параметра, вызванные действием примесей водорода и железа, от расчетных значений для рафинированного от посторенних примесей теплоносителя.

Применительно к условиям работы неизотермического циркуляционного контура для определения температурной зависимости использовался метод анализа показаний двух пар датчиков ТДА кислорода, расположенных в различных температурных зонах контура, на линиях роста и снижения температуры теплоносителя. Кислородный режим теплоносителя в циркуляционном стенде обеспечивался при этом использованием раскислительного действия примеси железа при включении в работу источника металлических примесей и окислительного действия внутренних источников кислорода, которые превалировали при выключении из работы источника металлических примесей.

Получены экспериментальные данные по характеру изменения температурной зависимости показаний датчиков ТДА кислорода, как в случаях доминирования раскисляющего действия источника металлических примесей, так и в случаях доминирования окисляющего действия внутренних источников кислорода.

Показано, что использованные в работе способы определения численных значений температурных зависимостей изменения ТДА кислорода в ТЖМТ позволяют получать дополнительную информацию о физико-химическом состоянии теплоносителя, которое является функцией содержания в теплоносителе химически активных примесей.

Установлено, что влияние примеси железа на состояние теплоносителя характеризуется наличием области относительной нечувствительности температурной зависимости ТДА кислорода при высокой термодинамической активности кислорода, в то время как влияние примеси водорода в этой области достаточно высоко.

Влияние примеси урана и тория в ТЖМТ и конструкционных материалах активной зоны на содержание газообразных продуктов деления в защитном газе и источник запаздывающих нейтронов в теплоносителе

Гончар Н. И.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>nigon@ippe.ru</u>

Ключевые слова: реакторная установка на быстрых нейтронах, тяжёлый жидкометаллический теплоноситель, контроль герметичности оболочек твэлов, поверхностное загрязнение оболочек твэлов топливом, содержание природного урана и тория в теплоносителе, продукты деления, запаздывающие нейтроны.

Оперативный контроль герметичности оболочек твэлов РУ с ТЖМТ осуществляют измерением активности газообразных продуктов деления в защитном газе первого контура и определением содержания запаздывающих нейтронов в теплоносителе. При условии герметичности всех твэлов источником продуктов деления (ПД) в теплоносителе являются поверхностное загрязнение оболочек твэлов топливом и примесь природного урана и тория в конструкционных материалах активной зоны и в ЖМТ.

Создаваемая этими источниками активность рабочих сред первого контура условно называется фоновой. Разгерметизация твэла создаёт дополнительный источник газообразных и летучих ПД в теплоносителе, а значительное повреждение оболочки, сопровождающееся прямым контактом теплоносителя с топливом и называемое открытой поверхностью, обеспечивает дополнительный выход предшественников запаздывающих нейтронов.

Фоновая активность рабочих сред первого контура и фоновый источник ПД в теплоносителе являются отправными параметрами для контроля герметичности оболочек твэлов и определяют порог диагностирования разгерметизации твэла и возникновения открытой поверхности топлива. РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем (CBT) первого поколения имели промежуточный спектр нейтронов. Для них основным фоновым источником ПД в теплоносителе было деление ²³⁵U в поверхностном загрязнении оболочек. Переход к быстрому спектру нейтронов увеличивает вклад примеси природного урана и тория за счёт деления ²³⁸U и ²³³U, накапливающегося в результате активации ²³²Th. На примере перспективной энергетической РУ с CBT и быстрым спектром нейтронов выполнены оценки фоновой активности ГПД в защитном газе первого контура и фонового источника запаздывающих нейтронов в теплоносителе и оценено влияние их составляющих.

Учёт примеси тория и накопление ²³³U, а также выгорания делящихся атомов в источниках фонового выхода продуктов деления показал, что фоновая активность ПД в рабочих средах первого контура и фоновый источник запаздывающих нейтронов в теплоносителе будут убывать по ходу кампании. Относительное убывание прямо зависит от плотности поверхностного загрязнения топливом оболочек твэлов. При минимальной плотности основной вклад вносит деление содержащегося в теплоносителе ²³⁸U. Во всех рассмотренных случаях вклады от примеси природного урана в CBT и от поверхностного загрязнения оболочек близки по значению. Вклад от примеси тория существенно меньше.

При весовой доле урана в теплоносителе, соответствующей данным $\Phi \Theta H$, фоновый источник запаздывающих нейтронов соответствует от 10 до 15 см² открытой поверхности топлива. Следует иметь в виду, что данные $\Phi \Theta H$ о содержании в CBT урана

были получены для теплоносителя, при изготовлении которого использовали особо чистые свинец и висмут. Фоновый источник запаздывающих нейтронов в теплоносителе определяет пороговые величины диагностирования открытой поверхности топлива. Весовая доля природного урана в ТЖМТ будет зависеть от технологии его изготовления и её значение может иметь существенный разброс, поэтому для повышения достоверности диагностирования состояния активной зоны конкретной РУ следует заранее определить содержание природного урана в ТЖМТ.

Численное моделирование процессов кристаллизации в жидких металлах

Варсеев Е. В.¹, Алексеев В. В.², Коновалов М. А.²,

1 – Техническая Академия Росатома, г. Обнинск, 2 – АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>EVVarseev@rosatomtech.ru</u>

Ключевые слова: быстрые реакторы, тепло- и массоперенос, теплоноситель, примеси, численное моделирование, расчетный модуль, SFD коды.

Жидкие металлы рассматриваются в качестве теплоносителей в реакторах нового поколения. Так как для безопасной эксплуатации ЯЭУ требуется поддержание концентрации примесей в теплоносителе на безопасном уровне, разработан ряд мер по очистке теплоносителя. Поэтому анализ безопасности реакторов с жидкометаллическими теплоносителями должен проводиться с учетом результатов расчета процессов массопереноса примесей в контуре ЯЭУ.

Возможность расчета массопереноса появилась в первую очередь в кодах улучшенной оценки. Так, например, код СОКРАТ-БН обладает возможностями по моделированию переноса и поведения радиоактивных продуктов деления в щелочных жидких металлах.

Для расчетов элементов оборудования и частей контура реактора сегодня широко используются трехмерные коды вычислительной гидродинамики (CFD коды). Добавление функционала для расчета массопереноса в такие коды и использование их совместно с кодами улучшенной оценки может значительным образом повысить эффективность расчетного анализа безопасности атомных станций.

В данной работе рассматривается применение открытого CFD кода для расчёта удержания примеси в устройствах очистки с учётом переноса взвешенной фазы, что является актуальной задачей как для реакторов с водяным теплоносителем, так и для реакторов с жидкометаллическим охлаждением. Для этого использовался расчетный модуль, моделирующий двухфазную жидкость «теплоноситель – взвесь» на основе модели MULES (анл. Multi-dimensional Universal Limiter with Explicit Solution).

Кроме того, в работе рассматривается предыдущий опыт разработки расчетного модуля, в котором массоперенос примесей основан на модели движения пассивного скаляра. Длительный процесс валидации и верификации расчётного модуля, его совершенствование с точки зрения численного алгоритма до сих пор учитывали присутствие только одной примеси в натрии – кислорода. В работе предлагается усовершенствованная версия решателя для расчёта тепло- и массопереноса в натриевом теплоносителе, учитывающая одновременное присутствие как кислорода, так и водорода. Полученные результаты расчетов могут быть использованы для анализа работы устройств очистки натрия от примесей.

Расчет равновесного состояния системы натрий-кислород-водород

Алексеев В. В., Борисов В. В., Перевозников С. В.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>alexeev@ippe.ru</u>

Ключевые слова: натрий, кислород, водород, концентрация, компоненты реакции, вода, насыщение, щелочь, температура, равновесная система.

В натриевой технологии исследование системы натрий – кислород – водород имеет большое практическое значение. Особенно это касается определения равновесного состава компонентов системы. В частности, с целью повышения безопасности парогенераторов натрий – вода необходимо проводить непрерывные измерения содержания примесей в натрии второго контура. При этом изменения состава примесей лежат в диапазоне предельно малых концентраций и должны быть заранее просчитаны с использованием расчетных методов. К области повышенных концентраций кислорода и водорода в натрии относятся процессы в холодных ловушках, которые моделируются с использованием данных о равновесном состоянии системы. Авторами доклада разработана методика расчета равновесного состояния системы натрий-кислород-водород, образующейся при поступлении воды в натрий.

Установившееся распределение концентраций образовавшихся компонентов указанных реакций в натрии отвечает равновесному состоянию реакции NaOH + 2 Na = Na₂O + NaH. В реальных системах концентрации трех компонентов, а именно NaOH, Na₂O и NaH, существенно малы по сравнению с концентрацией самого натрия, который в данном случае может рассматриваться в качестве растворителя.

Для случая, когда весь образующийся водород взаимодействует с окружающим натрием, записано стехиометрическое уравнение для установления материального баланса между исходными реагентами и компонентами результирующей реакции в образующейся неравновесной системе, которое позволяет связать концентрацию воды в натрии с начальной неравновесной концентрацией образующихся компонентов реакции.

Составлена система уравнений, решение которой позволяет рассчитать равновесные значения концентраций щелочи, оксида натрия и гидрида натрия в натрии. Выполнены расчеты равновесных концентраций этих компонентов от концентрации воды при различных температурах натрия. Рассматривается диапазон концентраций до несколько тыс. млн⁻¹ воды в натрии. Здесь возможно насыщение натрия только по компоненте гидрид натрия. При 400 °С насыщение начинается с концентрации ~1600 млн⁻¹ воды в натрии, при 300 °С – с концентрации ~220 млн⁻¹ воды в натрии. По оксиду натрия и щелочи насыщение не достигается.

Как следует из расчетов, при малых концентрациях воды в натрии температура натрия практически не влияет на распределение компонентов реакции. Влияние температуры начинает заметно проявляться при концентрации воды в натрии более 100 млн⁻¹. С увеличением концентрации воды в натрии при температуре 300°С преобладающими компонентами становятся щелочь и оксид натрия, в то же время при температуре 500°С преобладающими компонентами являются щелочь и гидрид натрия. Для изменения равновесной концентрации щелочи характерно то, что при малой концентрации воды в натрии ее величина существенно ниже концентрации других компонент, а при увеличении концентрации воды концентрация щелочи превосходит концентрации других компонент как при 300°С, так и при 500°С.

Выполнено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на стенде Протва-2. Концентрация водорода в натрии ниже расчетной, поскольку в ходе эксперимента при взаимодействии воды с натрием водород частично выносился в защитный газ.

Оценки в обоснование геттерной очистки натрия от кислорода

Сорокин А. П., Алексеев В. В., Коновалов М. А., Торбенкова И. Ю.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>alexeev@ippe.ru</u>

Ключевые слова: горячие ловушки, системы очистки, примеси, мощность, производительность, емкость, «скоростная очистка».

Опыт эксплуатации реакторных установок с натриевым теплоносителем позволил перейти к разработке перспективных энергетических установок большой мощности. Одна из важнейших задач – повышение их безопасности и экономичности, в рамках которой принято решение расположить системы очистки первого контура в баке реактора. Вследствие ограниченности пространства для расположения систем очистки возникают специфические требования к ее характеристикам.

Из-за наличия недостатков встроенных систем очистки с холодными ловушками и с учетом того, что основной примесью в натрии первого контура является кислород, предложено использовать горячие ловушки (ГЛ). В этой связи возник вопрос о методиках определения характеристик ГЛ, работающих в следующих режимах: для очистки натрия на номинальных параметрах; для очистки натрия в стояночных режимах с подогревом, при работе на номинальных параметрах без подогрева; для очистки натрия в режиме «скоростной очистки» при выходе на номинальные параметры.

В предлагаемом докладе рассмотрены методики определения характеристик ГЛ, работающих в этих режимах работы. Показано, что ГЛ с необходимой производительностью и емкостью для работы во всех режимах эксплуатации РУ потребует большие затраты энергии для подогрева натрия в режимах выхода на мощность и выхода на номинальные параметры после аварийного загрязнения, конструкция ловушки усложнится и размещение ее в баке реактора станет невозможным.

Следовательно, использование подогрева не позволит решить проблемы с длительностью очистки в режимах выхода на мощность и выхода на номинальные параметры после аномального загрязнения. Поэтому проведены предварительные оценки оптимизации режимов эксплуатации ГЛ, позволяющей осуществить переход из стояночного режима с высоким содержанием кислорода (25 млн⁻¹) на номинальный режим без дополнительного подогрева натрия на входе в ловушку встроенным нагревателем. Предложенный авторами, режим «скоростной очистки» позволит сократить время очистки по сравнению со штатным режимом очистки с ~940 до ~160 ч при выходе на мощность после ПНР, с ~630 до ~250 ч при выходе на мощность после аномального загрязнения.

Анализ подходов к моделированию физико-химических процессов в контурах ядерных реакторов с ТЖМТ

Легких А. Ю., Лаврова О. В.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>alegkikh@ippe.ru</u>

Ключевые слова: ядерный реактор, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, примеси, кислород, железо, массоперенос, окисление стали, модель, физико-химические процессы, расчеты.

Процессы коррозии и массопереноса оказывают значительное влияние на ресурс работы, работоспособность основных узлов и безопасность ядерных реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. При обосновании безопасности ядерных реакторов с помощью проектных кодов необходимо моделировать физико-химические процессы в контуре циркуляции теплоносителя, включая взаимодействие примесей в объеме теплоносителя и окисление поверхностей конструкционных сталей. Моделирование физико-химических процессов позволяет решить следующие основные задачи:

 выполнить расчетное обоснование возможности создания условий в первом контуре конкретной конструкции ядерного реактора, при которых обеспечивается коррозионная стойкость конструкционных сталей (главным образом барьера безопасности – оболочек ТВЭЛов);

 выполнить расчетное обоснование отсутствия в условиях работы конкретной конструкции ядерного реактора образования шлаковых отложений на поверхностях активной зоны и теплообменного оборудования, способных привести к аварийным ситуациям;

 выполнить расчетное обоснование требуемых характеристик оборудования системы технологии тяжелого теплоносителя (массообменные аппараты, фильтры);

 выполнить расчетное обоснование мест размещения датчиков контроля растворенного кислорода (нормируемой примеси в тяжелом теплоносителе);

 провести расчетный анализ переходных процессов для определения параметров управления системы технологии теплоносителя;

– выполнить расчетный анализ возможных отклонений от норм кислородного режима при исходных событиях, постулируемых в проекте.

Для обеспечения возможности расчетного моделирования необходимы модели физико-химических процессов в теплоносителе и на поверхностях сталей, которые можно использовать в проектных кодах.

В докладе выполнен анализ подходов к описанию физико-химических процессов в теплоносителе и на поверхностях конструкционных сталей в контурах циркуляции ядерных реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

Кинетики процесса удаления водорода с помощью гранулированного оксида свинца в бескислородной газовой среде

Скобеев Д. А., Легких А. Ю.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>dskobeev@ippe.ru</u>

Ключевые слова: водород, дожигатель, ядерный реактор, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, газовая система, инертный газ, водородная безопасность, метод удаления водорода, кинетика, оксид свинца.

Одной из задач при обеспечении безопасности ядерных реакторов нового поколения с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) является необходимость удаления водорода из газовой системы реактора.

Основными источниками поступления водорода в газовую систему реактора с ТЖМТ являются технологические мероприятия по водородной очистке первого контура и взаимодействие ТЖМТ с водяным паром при течах парогенератора.

Одной из главных причин необходимости удаления водорода из защитного газа реактора с ТЖМТ является водородная безопасность. При запроектной аварии с разгерметизацией первого контура существует вероятность попадания в контур газообразного кислорода воздуха и образования «гремучей смеси».

В разрабатываемых реакторах с ТЖМТ в качестве защитного газа применяется безкислородная газовая среда (аргон, гелий, азот), что делает невозможным использование существующих устройств удаления водорода, применяемых на действующих АЭС.

Традиционным способом уменьшения концентрации водорода в инертном защитном газе в исследовательских стендах и реакторах с ТЖМТ атомных подводных лодок является многократная замена газа или вакуумирование газовой системы с последующим её заполнением инертным газом. В разрабатываемых реакторах с ТЖМТ такой способ уменьшения концентрации водорода является нецелесообразным в связи с большими объемами защитного газа (до сотен кубометров) и нормами радиационной безопасности.

Перспективным методом удаления водорода в реакторах с ТЖМТ является процесс удаления (дожигания) водорода оксидами металлов.

В настоящей работе описан предлагаемый метод удаления водорода оксидами металлов и представлены методики и результаты исследований кинетики процесса удаления водорода с помощью гранулированного оксида свинца, позволяющие сделать вывод о перспективах его использования в качестве наполнителя специальных устройств – дожигателей водорода.

Расчетная модель взаимодействия примесей железа и кислорода в тяжелых жидкометаллических теплоносителях

Осипов А. А., Иванов К. Д., Ниязов С.-А. С.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>sniyazov@ippe.ru</u>

Ключевые слова: примеси железа, расчетная модель, активность кислорода, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, оксидная пленка, парциальное давление, кислород, свинец-висмут, свинец, константа равновесия.

В настоящее время, рассматривая процессы окислительного взаимодействия тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) на основе свинца с конструкционными сталями, подавляющее большинство исследователей вполне обоснованно учитывают влияние примеси кислорода. Это проявляется, в том числе, и в виде указания в качестве одного из определяющих условий обеспечения коррозионной стойкости сталей поддержание того или иного кислородного режима теплоносителя. В подавляющих случаях в качестве такого условия используется количественное содержание в теплоносителе примеси кислорода.

Исторически, при освоении свинцово-висмутового теплоносителя, это содержание определялось путем восстановления водородом при температуре 550 °C пробы жидкометаллического расплава с измерением количества образовавшихся паров воды.

В последующем, после разработки датчиков термодинамической активности (ТДА) этой примеси и их широкого внедрения в качестве основного инструментария для определения кислородного режима теплоносителя, первый метод утратил практическое значение. При этом понятие концентрации (или содержания) примеси кислорода по-прежнему достаточно часто продолжает использоваться на практике при описании результатов экспериментов в ТЖМТ.

Однако, теперь это не экспериментально определяемый параметр, а результат численного пересчета измеряемых значений ТДА кислорода. Правила пересчета в настоящее время строго определены только для теплоносителей, рафинированных от остальных, кроме кислорода, примесей, а также (менее строго) и для условий, в которых влиянием остальных примесей можно пренебречь.

Наиболее практически значимой примесью является примесь железа как основной компонент сталей, попадающий в теплоноситель. В этом плане актуальной является задача количественного учета влияния данной примеси на ТДА кислорода.

Попытки такого учета предпринимались ранее в ряде работ. В данных работах связь термодинамических активностей кислорода и железа выражалась через реакцию образования стехиометрического магнетита, которую в расплавах тяжелых металлов на основе свинца обычно выражают в виде: $4PbO + 3Fe = Fe_3O_4 + 4Pb$.

Константа равновесия данной реакции, которую можно записать через активности

соответствующих компонентов в виде $K_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = \frac{a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \cdot a_{\text{Pb}}^4}{a_{\text{PbO}}^4 \cdot a_{\text{Fe}}^3}$, определяет связь между

входящими в уравнение реакции параметрами. Вместе с уравнением, отражающим закон сохранения вещества, это позволяет описывать характер поведения ТДА кислорода в присутствии примеси железа, что и использовалось в цитируемых выше работах.

Однако протекание данной реакции в объёме жидкометаллического расплава представляется крайне маловероятной из кинетических соображений. К тому же имеются данные о том, что в газовой фазе над магнетитом присутствуют пары железа, кислород в атомарной и молекулярной форме, а также пары монооксида железа FeO, но отсутствуют более сложные оксидные соединения. Исходя из сказанного, процессы формирования в ТЖМТ более сложных оксидных соединений с участием примеси железа следует рассматривать как вторичные относительно реакции образования в жид-кометаллических расплавах монооксида железа.

Кроме того, в расчетной модели, которая должна учитывать весь рабочий диапазон изменения ТДА кислорода в реакторных установках, необходимо учесть отличия составов образующихся оксидов от стехиометрического магнетита.

В настоящей работе обоснованы и предложены конкретные подходы к решению задачи математического описания взаимодействия примесей железа и кислорода в ТЖМТ, которые направлены на преодоление указанных выше недостатков в существующих моделях. Выполнены численные расчеты параметров, характеризующих результаты взаимодействия кислорода и железа в свинцово-висмутовом теплоносителе, которые сопоставлены с экспериментальными данными. Получено удовлетворительное совпадение.

Неразрушающая методика измерений теплофизических свойств твэлов с плотным топливом

Стручалин П. Г., Круглов А. Б., Круглов В. Б., Харитонов В. С.

НИЯУ «МИФИ», г. Москва, pstruchalin@mail.ru

Ключевые слова: неразрушающая методика, теплопроводность плотного ядерного топлива, термическое сопротивление, реакторы на быстрых нейтронах.

Скорость протекания физических и химических процессов в тепловыделяющих элементах в значительной степени зависит от температуры. При анализе безопасности и ресурса работы твэлов с перспективными видами топлива требуется информация о распределении в них температуры и ее изменении с выгоранием.

Наибольшее влияние на максимальную температуру в твэле оказывают теплопроводность топлива и термическое сопротивление между топливом и оболочкой. Опыт эксплуатации твэлов с оксидными видами топлива показывает, что данные теплофизические свойства меняются в процессе выгорания. Теплопроводность топлива зависит от пористости, макро- и микродефектов структуры, стехиометрии, глубины выгорания. Поэтому рассчитать теплопроводность топлива с приемлемой для практических целей точностью крайне сложно.

Область контакта топлива и оболочки меняется в процессе работы твэла. На начальном этапе топливо и оболочка разделены газовым зазором. При длительной работе на мощности происходит распухание топлива, за счет чего диаметр топлива увеличивается до внутреннего диаметра оболочки твэла. В этом случае контакт между топливом и оболочкой состоит из пятен непосредственного контакта и областей, в которых топливо и оболочка разделены газовыми зазорами. Площадь контакта первого типа существенно меньше, чем второго.

В большинстве встречающихся на практике случаев детальная геометрия контакта между топливом и оболочкой неизвестна. Кроме того, часто, в процессе работы твэла, меняются действующие в области контакта нагрузки, температуры, упруго-прочностные свойства материалов, что также приводит к изменению площади непосредственного контакта тел. Таким образом, разработать упрощенную геометрическую модель контакта и на ее основе рассчитать термическое сопротивление между топливом и оболочкой твэла не представляется возможным.

Из сказанного следует, что расчёт поля температуры в тепловыделяющем элементе с необходимой точностью возможен лишь при наличии экспериментальных данных по его теплофизическим свойствам, а также методик их получения.

В настоящей работе представлены результаты создания неразрушающей методики определения теплопроводности топлива и термического сопротивления между топливом и оболочкой. Методика основана на анализе термограмм поверхности оболочки твэла при воздействии на нее импульсом лазера. С помощью разработанной лабораторной установки проведены измерения на макетах тепловыделяющих элементов и продемонстрирована ее работоспособность.

Методика исследования термического сопротивления контакта жидкого металла и теплопередающей поверхности

Стручалин П. Г., Круглов А. Б., Круглов В. Б., Харитонов В. С.

НИЯУ «МИФИ», г. Москва, pstruchalin@mail.ru

Ключевые слова: контактное термическое сопротивление, жидкометаллический подслой, теплопроводящий подслой, свинец, жидкие металлы, реакторы на быстрых нейтронах.

Особенностью разрабатываемого нитридного ядерного топлива для реакторов на быстрых нейтронах является интенсивное газовыделение при температурах свыше 1200 °C. Добиться снижения рабочей температуры топлива при сохранении в нем высокого уровня энерговыделения возможно за счет создания жидкометаллического подслоя между топливом и оболочкой твэла.

Рассмотрим область контакта топлива, жидкого металла и внутренней поверхности оболочки. Стационарный тепловой поток плотностью q создает в жидкометаллическом подслое перепад температур, определяемый выражением (1):

$$\Delta T = q \cdot r_{\rm T},\tag{1}$$

в котором $r_{\rm T} = r_{\rm c} + 2 \cdot r_{\rm K}$ – суммарное термическое сопротивление области между поверхностью топлива и внутренней поверхностью оболочки; $r_{\rm c}$ – термическое сопротивление жидкого подслоя; $r_{\rm K}$ – термическое сопротивление контакта жидкого металла с поверхностью топлива и оболочки. Термическое сопротивление подслоя рассчитывается через его толщину $\Delta_{\rm M}$ и его теплопроводность жидкого металла $\lambda_{\rm M}$ как $r_{\rm c} = \Delta_{\rm M}/\lambda_{\rm M}$. Термическое сопротивление контакта топлива и оболочки. Термическое сопротивление подслоя рассчитывается через его толщину $\Delta_{\rm M}$ и его теплопроводность жидкого металла $\lambda_{\rm M}$ как $r_{\rm c} = \Delta_{\rm M}/\lambda_{\rm M}$. Термическое сопротивление контакта жидкого металла и поверхностей топлива и оболочки гк зависит от шероховатости поверхностей, поверхностных слоев окислов, газовых прослоек между жидким металлом и контактирующими с ним поверхностями. Таким образом, данная составляющая суммарного термического сопротивления жидкометаллического слоя может изменяться с течением времени из-за процессов химического го взаимодействия на поверхностях контакта, изменения относительной площади контакта через газовые прослойки из-за выходов газообразных продуктов деления.

Сопоставим термическое сопротивление слоя свинца с термическим сопротивлением его контакта и конструкционной стали, рассматривая два предельных случая – контакт расплава только через окисный слой, либо только через газовый зазор, ширина которого равна характерному размеру шероховатости поверхности стали.

Для свинца при температуре 600 °C $\lambda_{\rm M} = 20$ Вт/(м K), тогда при толщине слоя $\Delta_{\rm M} = 0,2$ мм, получим термическое сопротивление слоя свинца $r_{\rm c} = 10^{-5}$ (м²·K)/Вт. Для окисного слоя толщиной 10 мкм и теплопроводностью 1 Вт/(м·K) получим контактное термическое сопротивление, равное $r_{\rm K \ MH} = 1 \cdot 10^{-5}$ (м²·K)/Вт. Если же контакт осуществляется через газовый зазор шириной 1 мкм, заполненный гелием или аргоном, то при такой величине зазора термическое сопротивление газовой прослойки определяется аккомодацией молекул газа на стенках и составляет $r_{\rm K \ Make} = 2 \cdot 10^{-4}$ (м²·K)/Вт.

Полученные данные показывают, что основной вклад в перепад температуры в области между топливом и оболочкой оказывает контактное термическое сопротивление между свинцом и поверхностями топлива и оболочки *r*_к.

Целью данной работы являлось проведение исследования термического сопротивления контакта свинца и его сплавов $r_{\rm k}$ с конструкционными сталями 12X18H10T и ЭП-823. В результате исследования установлено, что контактное термическое сопротивление между расплавом жидкого свинца и поверхностями топлива и оболочки является определяющим в термическом сопротивлении области между топливом и оболочкой и оно увеличивается с увеличением времени существования контакта.

СЕКЦИЯ 4.

Исследования гидродинамики и теплообмена в обоснование повышения эффективности и безопасности водоохлаждаемых реакторов

Водоохлаждаемые реакторные установки со спектральным регулированием реактивности

Махин В. М., Махин И. В.

ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, makhin@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: реактивность, спектр нейтронов.

Рассматриваются водоохлаждаемые реакторные установки со спектральным регулированием запаса реактивности. Изложены возможные способы спектрального регулирования, в том числе используемые на практике (ABWR).

Основные задачи при создании водоохлаждаемой реакторной установки со спектральным регулированием следующие:

- снижение расхода естественного урана в открытом топливном цикле;

– эффективное применение нейтронов путем отказа от борного регулирования в процессе кампании;

 снижение жидких радиоактивных отходов как следствие отказа от борного регулирования;

 способность работы в замкнутом топливном цикле с загрузкой активной зоны MOX топливом с повышенным коэффициентом воспроизводства (КВ ~ 0,7–0,8, вместо 0,3–0,4 для действующих ВВЭР).

Моделирование теплообменных процессов в вертикальных каналах, охлаждаемых водой СКД

Николаева А. В., Чуркин А. Н.

ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, churkin@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: вода, СКД, СFD, реакторная установка, IAPWS-IF97, IAPWS-95, теплообмен, вертикальный канал.

В связи с явными преимуществами реакторы на сверхкритическом давлении (СКД) рассматриваются GIF в качестве одной из возможных концепций реакторов четвертого поколения. Однако, для реакторов этого типа существует ряд нерешенных проблем, затрудняющих развитие данной технологии. Одна из таких проблем – сложность моделирования теплогидравлических процессов в области критических и псевдокритических параметров воды СКД. Процессы в рассматриваемой области малопрогнозируемы с применением существующих моделей. В частности, имеются проблемы при моделировании процессов в области близкой к псевдокритическим параметрам. Это связано с резким изменением свойств жидкости в пристеночной области вблизи псевдокритической температуры.

В рамках GIF в качестве возможного пути решения проблемы рассматривается применение CFD кодов. Однако, далеко не все CFD коды позволяют удовлетворительно описать изменение теплофизических свойств воды вблизи критической и псевдокритических точек.

В рамках настоящего исследования разработана методика задания теплофизических свойств воды СКД в CFD кодах на основе стандартов IAPWS-IF97 и IAPWS-95, а также проведено ее тестирование и программная реализация в коде star-ccm+. Программная реализация методики осуществлялась на основе JDK 1.3 (Java). Разработанное ПО позволяет формировать исходные данные о теплофизических свойствах воды СКД в табличной и полиномиальной форме. ПО отчуждаемо от разработчика и оснащено пользовательским интерфейсом. Применение графических интерфейсов снижает вероятность возникновения пользовательских ошибок при использовании разработанного ПО и общие временные затраты на разработку моделей каналов, охлаждаемых водой СКД.

С применением разработанной методики реализована CFD модель канала, охлаждаемого водой СКД (труба круглого сечения). На основе результатов валидации модели авторами даны рекомендации по выбору параметров CFD модели (топология и размерность сеточной модели, модель турбулентности, источник данных о теплофизических свойствах воды СКД, величина турбулентного числа Прандтля). Проведенные в соответствии с верификационные исследования показали, что разработанная модель позволяет прогнозировать в режиме нормального теплообмена изменение целевых параметров объекта исследования с погрешностью 0,4–10,0 %. Погрешность моделирования рассматриваемых параметров укладывается в погрешность экспериментальных данных, характерную для измерения параметров теплообмена в жидкостях СКД.

Разработанная модель позволяет качественно определить наличие режимов ухудшенного теплообмена в канале. Однако, для применения модели с целью определения значений основных теплогидравлических параметров в режимах ухудшенного теплообмена в РУ СКД модель должна быть доработана на последующих этапах исследования.

Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя во входном участке ТВС

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

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, <u>a.a.dobrov@yandex.ru</u>

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, вычислительная гидродинамика, хвостовик, моделирование, CFD-программа

В настоящее время в России ведется строительство атомного ледокола нового поколения с более высокими технико-экономическими показателями. В техническом задании на разработку ледокола выставлено требование по использованию в активной зоне топлива, удовлетворяющего условию нераспространения. В таких условиях, для обеспечения требуемых ресурсных характеристик, в проекте вместо канальной активной зоны серийных атомных ледоколов с высоким обогащением будет использована активная зона кассетного типа с металлокерамическим топливом повышенной ураноемкости.

Реакторная установка при номинальных режимах эксплуатации может работать на тех уровнях мощности, для которых обеспечивается достаточное охлаждение «самых горячих» участков тепловыделяющих сборок (ТВС). Поэтому теплогидравлический расчет активной зоны имеет одно из определяющих значений при проектировании реактора.

Конструктивные особенности ТВС кассетной активной зоны обусловили необходимость определения отдельных важных гидравлических характеристик, в частности распределения расхода теплоносителя по ячейкам ТВС на входе в твэльный пучок, т. к. эти данные являются входным граничным условием для проведения теплогидравлического расчета.

Повышение требований к качеству и уровню обоснования технических решений, используемых при проектировании ядерных энергетических установок, а также ограничение стоимости и сроков НИР при выборе оптимальных конструкций, приводит к необходимости совершенствования программных средств, применяемых для моделирования физических процессов.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований локальных гидродинамических характеристик теплоносителя в модели входного участка ТВС, проводимых на аэродинамическом стенде ФТ-50 НГТУ им. Р.Е. Алексеева, а также результаты математического моделирования, выполненного с использованием программ вычислительной гидродинамики.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации в рамках научного проекта МК-2398.2018.8

Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-КВАДРАТ реактора PWR

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

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, <u>nevid000@mail.ru</u>

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

В АО «ОКБМ Африкантов» разработана конструкция ТВС-КВАДРАТ для активной зоны реакторов PWR, конкурентоспособная с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности. В частности, в ТВС-КВАДРАТ использованы апробированные и зарекомендовавшие себя в ТВС для реакторов ВВЭР конструкторские решения.

Одним из таких решений является применение оригинальных перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР), предназначенных для интенсификации процессов тепло- и массопереноса в активной зоне реактора PWR. Особое внимание следует уделить конструкции ПДР, а именно: геометрии и расположению дефлекторов, а также выбору угла отгиба их относительно осевого направления движения потока теплоносителя. Следовательно, варианты исполнения перемешивающих решеток для ТВС-КВАДРАТ требуют поиска оптимального конструктивного решения с точки зрения таких показателей, как эффективность перемешивания потока, гидравлические потери и запас до кризиса теплоотдачи.

Обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора во многом базируется на теплогидравлическом расчете, что в свою очередь обязывает к большой информативности и высокой достоверности значений локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя. Для решения данной научнотехнической задачи необходимо исследовать условия течения теплоносителя и выявить закономерности формирования потока в характерных ячейках ТВС. Поэтому исследования распределения гидродинамических характеристик потока в характерных областях ТВС-КВАДРАТ за различными типами перемешивающих дистанционирующих решеток является актуальной задачей, решение которой необходимо при обосновании теплотехническую надежность активной зоны реактора PWR.

Для изучения особенностей течения потока теплоносителя в ЯЭУ в НГТУ им. Р.Е. Алексеева функционирует аэродинамический экспериментальный стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель, расходомерное устройство, измерительный комплекс.

Исследования локальной гидродинамики в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR проводились на 49-стержневой модели фрагмента ТВС-КВАДРАТ, выполненной в полном подобии натурной ТВС-КВАДРАТ с коэффициентом геометрического подобия Kr = 4,2. Модель имеет длину 3 м и состоит из: квадратного чехла, цилиндрических твэл-имитаторов с описанным диаметром d = 40 мм и исследуемых поясов ПДР.

Пояса ПДР состоят из взаимно перпендикулярных рядов пластин и восьмигранных ячеек, выполняющих функцию дистанционирования твэлов. Верхние кромки пластин, в местах их пересечения, снабжены дефлекторами различного конструктивного исполнения.

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя за ПДР заключались в измерении модуля и направления вектора скорости в исследуемой точке пучка стержней модели. В качестве характерных ячеек для определения влияния различных типов дефлекторов ПДР на течение потока теплоносителя была выбрана регулярная ячейка. Для получений полной картины трехмерного течения теплоносителя за дефлекторами ПДР ячейка была разделена на зоны измерения, в каждой из которых вектор скорости определялся для 11 сечений по длине модели.

Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока позволил детализировать картину течения теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками с различными вариантами конструкции дефлекторов, а также выбрать дефлектор оптимального конструктивного исполнения.

Накопленная база данных по течению теплоносителя в ТВС-Квадрат легла в основу инженерного обоснования конструкций активных зон реакторов PWR. Рекомендации по выбору оптимального варианта конструкции перешивающих дистанционирующих решеток учитывались конструкторами АО «ОКБМ Африкантов» при создании вводимых в эксплуатацию новейших ТВС-КВАДРАТ.

Результаты экспериментальных исследований используются для верификации CFD-кодов как зарубежной, так и отечественной разработки, а также программ детального поячеечного расчета активных зон с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации в рамках научного проекта МК-2398.2018.8.

Исследование гидродинамических характеристик потока теплоносителя в активной зоне реактора универсального атомного ледокола нового поколения

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

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, <u>nevid000@mail.ru</u>

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, теплоноситель, локальная гидродинамика, гидравлическое сопротивление.

В России успешно эксплуатируется атомный ледокольный флот, обеспечивающий стабильное функционирование арктической транспортной системы. Для обновления парка ледоколов в настоящее время ведется строительство атомного ледокола нового поколения с более высокими технико-экономическими показателями.

Активная зона ядерного реактора универсального атомного включает в себя набор шестигранных чехловых тепловыделяющих сборок с цилиндрическими стержнями, шаг расположения которых обеспечивается посредством пластинчатых дистанционирующих решеток. Конструктивные особенности ТВС кассетной активной зоны по сравнению с традиционными решениями канальных активных зон атомных ледоколов и транспортных реакторов обусловили необходимость экспериментального уточнения отдельных важных гидравлических характеристик, в частности коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) дроссельных шайб в зависимость от числа Рейнольдса и угла поворота дисков, а также распределение расхода теплоносителя по ячейкам ТВС на входе в твэльный пучок.

Экспериментальный стенд для исследования локальной гидродинамики теплоносителя в входном участке представляет собой аэродинамический разомкнутый контур в состав которого входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель, измерительный комплекс. Экспериментальная модель состоит из входного участка и фрагмента активной части ТВС до первой дистанционирующей решетки. Размеры всех конструктивных элементов модели ТВС выполнены в полном геометрическом подобии с натурным изделием.

Основные результаты экспериментальных исследований состоят в следующем:

- спроектирована и изготовлена экспериментальная модель входного участка ТВС;

– доработан аэродинамический стенд для исследований локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в модели входного участка TBC;

– разработаны методики проведения экспериментальных исследований, сбора и обработки экспериментальных данных;

– получен массив экспериментальных данных в виде зависимостей коэффициента гидравлического сопротивления дроссельной шайбы от чисел Рейнольдса и от угла поворота, а также данные о распределении осевой скорости по ячейкам ЭМ на входе в твэльный пучок.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы данных для:

 проверки регламентированных в справочной литературе формул для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления;

 верификации и усовершенствования программ поячейкового расчета активных зон реакторов;

– адаптации современных трехмерных CFD-программ к расчетам локальных гидродинамических характеристик теплоносителя в ТВС ядерных реакторах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации в рамках научного проекта МК-2398.2018.8

Экспериментальные исследования процессов турбулентного смешения в основном оборудовании ЯЭУ

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

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, <u>a_v_ryazanov@rambler.ru</u>

Ключевые слова: ядерный реактор, процессы смешения, теплоноситель, пространственная кондуктометрия, вычислительная гидродинамика, CFD-код.

При эксплуатации реакторной установки в стационарном режиме возможно возникновение ситуаций, при которых происходит отклонение параметров теплоносителя от номинальных значений. Для ядерных реакторных установок характерны процессы турбулентного смешения потоков теплоносителя в больших объёмах, что приводит к изменению свойств части потока теплоносителя как на входе в активную зону, так и во всём реакторе. Существенная теплогидравлическая неравномерность свойств потока теплоносителя в реакторе наблюдается как при регулировании мощности (ввод жидкого поглотителя), так и в аварийных ситуациях (аварийное расхолаживание, работа с отключением части парогенераторов). Такие явления нуждаются в детальном изучении при помощи CFD-кодов, которые должны проходить процедуру верификации на основе использования представительных экспериментальных данных.

В научно-исследовательской лаборатории «Реакторная гидродинамика» кафедры «Атомные тепловые станции» НГТУ им. Р.Е. Алексеева введён в эксплуатацию крупномасштабный исследовательский стенд для изучения смешения потоков в модели водо-водяного реактора с целью детального изучения процессов локального отклонения параметров. Стенд выполнен по схеме, позволяющей организовать замкнутые и разомкнутые режимы пролива экспериментальных моделей различной конструкции и размеров. Оборудование стенда позволяет создать режимы ламинарного и турбулентного течения при различной температуре, расходах и концентрации примесей в потоке теплоносителя. Моделирование может осуществляться при следующих параметрах потоков теплоносителя: давление до 2 МПа, температура – до 180°С, расходы – до 200 м³/ч, суммарная мощность потребителей стенда – 1 МВт эл., внешний диаметр экспериментальной модели – до 1,5 м.

Экспериментальные измерения основывались на методе пространственной кондуктометрии. Изменяя два параметра – вязкость и скорость теплоносителя, удалось провести исследования в диапазоне чисел Рейнольдса от 10000 до 40000. В ходе обработки данных эксперимента выявлено наличие закрутки потока при движении по кольцевому зазору экспериментальной модели на угол порядка 180° (при взгляде на экспериментальную модель сверху – поворот происходит по часовой стрелке). Анализ первичных результатов продемонстрировал возможности выявления и регистрации перемешивания трассера в потоке теплоносителя на входе и выходе активной зоны модели реактора. Полученные экспериментальные данные позволили провести анализ применимости метода пространственной кондуктометрии в характерной геометрии водоводяного реактора. Применяемый метод демонстрирует перспективность в качестве вихреразрешающего метода измерений, что представляет ценность с точки зрения верификации.

В дальнейшем планируется расширять матрицу экспериментальных режимов, проводимых на стенде исследования смешения потоков, путём увеличения чисел Рейнольдса, при больших расходах теплоносителя и температурах через модель, при условиях, моделирующих различные переходные режимы работы водо-водяных реакторных установок. Для увеличения количества экспериментальных данных будут применены новые экспериментальные модели, которые позволят варьировать ещё одной составляющей числа Рейнольдса – гидравлическим диаметром.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации в рамках научного проекта МК-2398.2018.8

Исследование теплообмена и гидродинамики в водо- и воздухоохлаждаемых теплообменниках систем безопасности АЭС с водоохлаждаемыми реакторами

Балунов Б. Ф., Лычаков В. Д., Щеглов А. А., Матяш А. С., Старухина К. С. ОАО «НПО «ЦКТИ», г. Санкт-Петербург, <u>vitalvl@vandex.ru</u>

Ключевые слова: система пассивного отвода тепла; система аварийного расхолаживания; естественная циркуляция; конденсация; парогазовая смесь; паровоздушная смесь; рециркуляционная охлаждающая установка; оребренная труба.

На комплексном стенде ОАО «НПО ЦКТИ», начиная с 1988 г., проводятся исследования работоспособности и эффективности систем пассивного отвода тепла (СПОТ) и расхолаживания первого контура АЭС с водоохлаждаемыми реакторами. Рассматриваются водо- и воздухоохлаждаемые системы. Исследования проводятся на крупномасштабных и полновысотных моделях контуров естественной циркуляции (ЕЦ) этих систем. 40-метровая высота стенда способствует приближению к натурным высотам контуров ЕЦ. Успешно прошли обоснование работоспособности и высокой эффективности СПОТ реакторных установок проектов НП-88; НП-500; АЭС-2006 для ЛАЭС-2, КЛТ-40С. Показана высокая эффективность рециркуляционных охлаждающих установок (РОУ) в снижении аварийного давления паровоздушной смеси, используемых при нормальных условиях эксплуатации для охлаждения воздуха, в т. ч. под защитной оболочкой.

Наряду с получением материала по динамике параметров аварийных теплогидравлических процессов, необходимого для верификации используемых для обоснования безопасности АЭС расчетных кодов, в проводимых исследованиях на крупномасштабных моделях отдельных узлов системы и натурных образцах (в основном теплообменниках: натурный модуль системы аварийного расхолаживания РУ КЛТ-40С; 8 РОУ с расходом воздуха от 4500 до 60000 м³/ч), в стационарных условиях подтверждались нормативные расчётные рекомендации, в основном, разработанные на основе лабораторных экспериментов, с возможным расширением пределов их применения или предлагались новые замыкающие соотношения для расчёта интенсивности отдельных теплогидравлических процессов.

Так на основе экспериментов с 16-трубной моделью теплообменника аварийного расхолаживания (ТОАР) проекта АЭС-2006 для ЛАЭС-2, были получено сохранение с расчётными рекомендациями пропорциональности изменения коэффициентов теплоотдачи при конденсации «чистого» пара (α_{k}) с изменением давления и расхода этого пара. Однако численное соответствие было получено при снижении в два раза значения коэффициента в нормативном соотношении: Nu = $A \operatorname{Re}_{\Pi\Pi}^{m} \operatorname{Pr}^{\prime n} (\rho' / \rho'')^{s}$. Приведённое связано с неравномерностью распределения расхода пара по отдельным трубкам ТОАР, вследствие неравномерности распределения статического давления по длине парораспределительного коллектора ТОАР при относительно низком перепаде давления на его трубках. Устранение несоответствия между расчётными и экспериментальными значениями α_{κ} получено при ликвидации изменения сечения паропровода на входе в парораспределительный коллектор ТОАР и снижении динамического напора парового потока на входе до 1 кПа (или ниже). Показана допустимость снижения неравномерности перепада давления по трубкам ТОАР путём установки шайб диаметром 6-7 мм на входе пара в каждую трубку. Подобное мероприятие для повышения производительности аппарата было проведено в середине 1980-х годов на сепараторе-пароперегревателе типа СПП-750 Игналинской АЭС и дало положительный результат, диаметр шайб составлял 1–3 мм. Приведённое, вероятно, полезно и для теплообменников (ТО) воздухоохлаждаемых

СПОТ, где перепад давления на трубках значительно ниже.

При наличии в контуре ЕЦ паровоздушной смеси, она через 1–2 часа испытаний давала стационарное распределение воздуха в ТОАР и расположенном под ним конденсатопроводе. Все эксперименты проведены при наличии в ТОАР лишь паровоздушной смеси и пристенной плёнки конденсата, то есть его уровень располагался под ТОАР в конденсатопроводе. В верхней части труб ТОАР паровой поток полностью вытеснял воздух в расположенную ниже часть труб. Граничное сечение труб между этими зонами вне зависимости от давления характеризовалась средним значением приведённой скорости пара через него: $w_z = 1.6 \pm 0.4$ м/с. Ниже зоны чистого пара располагалась зона паровоздушной смеси со снижением её температуры к нижнему торцу ТОАР. На основе результатов стационарных экспериментов выделены экспериментальные значения диффузионного коэффициента теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси (α_{cM}), которые сопоставлены с расчётными значениями ($\alpha_{cM,D}$), полученными на основе аналогии интенсивности процессов тепло- и массопереноса. Рассматриваемый процесс интенсифицирует повышенная плотность (массовая скорость) поперечного потока пара к внутренней поверхности пленки конденсата. В качестве безразмерного аргумента (C) в функции $\alpha_{cM}/\alpha_{cM} = f(C)$ выбрано отношение массовых скоростей поперечного и продольного потоков пара в зоне пароводяной смеси.

Для воздухоохлаждаемого СПОТ характерна низкая скорость воздуха (около 5 м/с), соответствующий ей низкий коэффициент теплоотдачи и допустимость применения внешне поперечно оребрённых труб (ОТ) с высоким коэффициентом оребрения (ϕ) при сохранении высокого значения коэффициента эффективности ребра (E_p).

В настоящее время имеются три нормативных документа по расчёту теплоотдачи к газовому потоку от поверхности таких труб: 1) РД 24.035.05-89 (НПО ЦКТИ, 1991 г); 2) РБ-040-09; (ГНЦ РФ – ФЭИ и НТЦ ЯРБ, 2009 г.); 3) Тепловой расчет котельных агрегатов; (НПО ЦКТИ, 1998 г.). Для проверки корректности расчётов по этим документам и возможного расширения пределов их применения было испытано 9 натурных теплообменных аппаратов (ТА), поставляемых на АЭС и 9 сборок ОТ различной конструкции. Испытанные ТА и сборки имели различные геометрические характеристики, материалы труб и ребер, методы осуществления контакта между ними.

Сопоставление показало, что в РБ-040-09 изложена устаревшая методика 1982 г. Методики [1, 3] по структуре одинаковы и отличаются методом определения характерного размера и соотношениями для расчёта числа Nu. Из сопоставления с результатами испытаний некоторое предпочтение отдаётся методике, изложенной в РД 24.035.05-89. Проведенные испытания позволили расширить диапазон применения этого соотношения на область пониженных значений до чисел Re равных 3200.

При испытаниях двух POУ рассматривался и режим нарушения условий нормальной эксплуатации, когда относительная влажность воздуха в гермообъёме достигает 100 %, а его температура 75 °С и выше. Для этого случая применена основанная на диффузионной модели методика расчёта теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси на внешней поверхности ОТ при допущении наличия 100 % относительной влажности потока как на входе в TO, так и на выходе из него. Корректность такого допущения обосновывалась наличием теплового баланса между теплообменивающими средами (охлаждаемый влажный воздух и нагреваемая вода).

Наличие конденсации пара из паровоздушной смеси повысило в 4 раза тепловую мощность РОУ по сравнению с её проектным режимом без конденсации пара. Двадцатикратное увеличение мощности РОУ было получено при имитации аварийного режима: конденсация насыщенного пара атмосферного давления на внешней поверхности оребренных труб РОУ при остановке вентилятора и сохранении расхода охлаждающей воды. В этом режиме РОУ может вносить существенный вклад в снижение аварийного давления под защитной оболочкой. Однако, при этом рассматривается уже активная система, и практически исчезает необходимость внешнего оребрения труб за счёт резкого снижения коэффициента эффективности ребра (до $E_p < 0,1$).

Измерение эффективности очистки воздуха систем вентиляции АЭС йодидными фильтрами с использованием фреона

Ягодкин И. В., Посаженников А. М.

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

Ключевые слова: радиационная безопасность, вентиляционная система, фильтрационное оборудование, аэрозольные фильтры, сорбер, йодный фильтр-сорбер.

Фильтрационное оборудование (аэрозольные фильтры и сорберы) в вентсистемах АЭС является последним барьером в обеспечении радиационной безопасности окружающей среды от распространения радиоактивности с АЭС.

Вот почему фильтрационному оборудованию, как за рубежом, так и в нашей стране уделяется огромное внимание. В связи с этим были разработаны Федеральные нормы «Правила устройства и эксплуатации систем вентиляции, важных для безопасности атомных станций» – НП-036-02, которые были введены в действие 10 апреля 2003 года. Последующая редакция этих Норм – НП-036-05 была введена в действие с 1 мая 2006 г. взамен НП-036-02.

Однако до сих пор на АЭС эти федеральные нормы в полной мере не выполняются.

В соответствии с требованиями НП-036-05 должны быть проведены приемочные испытания йодных фильтров-сорберов, после их монтажа в вентсистему, на эффективность очистки для контроля герметичности, целостности йодных фильтров-сорберов и проверки работоспособности системы и готовности их выполнять функции очистки вентиляционного воздуха от различных форм радиоактивного йода.

Измерение эффективности йодного фильтра-сорбера проводится в качестве последнего испытания фильтрационного оборудования после его монтажа перед вводом его в эксплуатацию.

Герметичность йодного фильтра-сорбера на месте в вентсистеме можно проверить одним из двух способов:

- фреоном или другим альтернативным газом;

– радиоактивным метилйодидом.

Фреон или радиоактивный метилйодид подаются в очищаемый воздух в воздуховод перед входом в сорбер.

Второй способ требует применения радиоактивных изотопов. Персонал должен быть специально подготовленным, иметь лицензию на соответствующие работы, чтобы обеспечить требуемое качество выполнения испытаний. Поэтому наиболее часто применяемым является первый способ – проверка смонтированного в вентсистему йодного фильтра-сорбера с использованием фреона.

В испытаниях фреон подается в воздух в воздуховод на входе в фильтр-сорбер при номинальном расходе воздуха. При этом должны быть обеспечены условия для хорошего перемешивания воздуха. Концентрация фреона в воздухе на входе и выходе йодного фильтра-сорбера измеряется с помощью газового хроматографа с захватэлектронным детектором.

Проскок фреона в сорбере оценивается по формуле:

$$P = (N_{\rm Bbix}/N_{\rm Bx}) \cdot 100 \%, \tag{1}$$

где P – проскок фреона, %; $N_{\text{вых}}$ (г/м³) – концентрация фреона в воздушном потоке на выходе из сорбера; $N_{\text{вх}}$ (г/м³) – концентрация фреона в воздушном потоке на входе в сорбер.
Эффективность очистки воздуха в сорбере от фреона рассчитывается по формуле:

$$E = [(N_{\rm BX} - N_{\rm Bbix})/N_{\rm BX}] \ 100 \ \%, \tag{2}$$

Испытания фильтров-сорберов, смонтированных в вентсистему, считаются удовлетворительными, если полученные значения эффективности по измеренным данным удовлетворяют условию:

 $E_{измер. фреон} \ge E_{задан. фреон},$

где $E_{\text{измер. фреон}}$ – величина эффективности очистки воздуха в сорбере от фреона; $E_{\text{задан. фреон}}$ – величина, определенная в специальных лабораторных стендовых испытаниях.

Поэтому *Е*_{задан. фреон} определяется в лабораторных стендовых испытаниях путем измерения эффективности поглощения фреона слоем сорбента той же марки, что и в сорбере. Испытания в лаборатории по поглощению фреона слоем сорбента проводится при параметрах, соответствующих параметрам эксплуатации йодного фильтра-сорбера в вентсистеме АЭС.

Исследования по определению эффективности поглощения фреона слоем сорбента проводится параллельно с исследованием поглощения радиоактивного метилйодида на аналогичном слое сорбента при одинаковых условиях проведения исследований, что и на фреоне.

Величина $E_{3адан. фреон}$ выбирается из условия: $E_{измер. фреон}$ измеренное на фреоне равно $E_{измер. метилйодид}$ измеренное по радиоактивному метилйодиду при проектной величине, равной 99,0 %.

Сопоставление поглощающей способности йодидных фильтров-сорбентов по радиоактивному метилйодиду и фреону

Ягодкин И. В., Посаженников А. М., Саутин С. А., Исаев А. Ю.

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

Ключевые слова: радиационная безопасность, радиоактивный йод, вентиляционная система, фильтрационное оборудование, аэрозольные фильтры, сорбер, йодный фильтр-сорбер.

Фильтрационное оборудование (аэрозольные фильтры и сорберы) в вентсистемах АЭС является последним барьером в обеспечении радиационной безопасности окружающей среды от распространения радиоактивности с АЭС.

Одним из продуктов деления, представляющих высокую экологическую опасность и которому уделяется огромное внимание, является радиоактивный йод. Именно, по выбросу радиоактивного йода в окружающую среду в настоящее время принята международная классификация аварий на объектах атомной промышленности.

Для локализации радиоактивного йода, находящегося в различных химических формах, из газовой среды в России и в мировой практике широко используются противойодные фильтры-сорберы, снаряженные сорбентами на основе активированных углей.

В соответствии с требованиями НП-036-05 «Правила устройства и эксплуатации систем вентиляции, важных для безопасности атомных станций» после монтажа или реконструкции элементов систем вентиляции должны быть проведены приемочные испытания.

В процессе проведения приемочных испытаний должны быть определены, при проектном расходе фильтруемого воздуха, аэродинамическое сопротивление и эффективность очистки воздуха от йода в органической форме.

Такая проверка йодного фильтра-сорбера проводится в качестве последнего испытания фильтрационного оборудования после монтажа перед вводом его в эксплуатацию.

Испытания противойодных фильтров-сорберов с помощью радиоактивного метилйодида является достаточно сложной, проблематичной задачей. В мировой практике (США, Италия) для этих испытаний используют тестовый газ-фреон. В связи с этим в России в 2015 году разработана Методика измерения эффективности очистки вентиляционного воздуха систем вентиляции, важных для безопасности АЭС йодными фильтрами-сорберами, с использованием фреона.

Фреон или радиоактивный метилйодид подаются в очищаемый воздух в воздуховод перед входом в сорбер.

Испытания фильтров-сорберов считаются удовлетворительными, если полученные значения эффективности по измеренным данным по фреону удовлетворяют условию:

$E_{\text{измер. фреон}} \ge E_{\text{задан. фреон}}$,

где $E_{измер. фреон}$ – величина эффективности очистки воздуха от фреона сорбером смонтированном в вентсистему;

 $E_{3адан. фреон}$ – величина, определенная в специальных лабораторных стендовых испытаниях путем измерения эффективности поглощения фреона слоем сорбента той же марки, что и в сорбере.

Испытания в лаборатории по поглощению фреона слоем сорбента проводится при параметрах, соответствующих параметрам эксплуатации йодного фильтра-сорбера в вентсистеме АЭС.

Исследования по определению эффективности поглощения фреона слоем сорбента проводится параллельно с исследованием поглощения радиоактивного метилйодида на аналогичном слое сорбента при одинаковых условиях проведения исследований, что и на фреоне.

Величина $E_{3адан. фреон}$ выбирается из условия: $E_{измер. фреон}$ измеренное на фреоне равно $E_{измер. метилйодид}$ измеренное по радиоактивному метилйодиду при проектной величине, равной 99,0 %.

Разработаны методики стендовых испытаний российского сорбента марки ВСК-5ИК и проведены испытания по измерению его поглощающей способности по отношению к радиоактивному метилйодиду и фреону.

На основе сопоставления результатов испытаний по измерению поглощающей способности сорбента ВСК-5ИК радиоактивного метилйодида и фреона в одинаковых условиях разработаны рекомендации по применению фреона для испытаний йодных фильтров-сорберов после их монтажа в вентсистемах АЭС.

Экспериментальные исследования прочности тепловыделяющих сборок реакторов с водой под давлением

Макаров В. В., Селезнёв А. В., Афанасьев А. В., Матвиенко И. В.

ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, makarov@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: прочность, тепловыделяющая сборка, реактор ВВЭР, эксперимент, исследование, обоснование.

Представлено описание комплексного подхода к обоснованию прочности, целостности ТВС, основанного на анализе результатов нескольких циклов экспериментальных дореакторных испытаний (статических, термомеханических, ударных, вибрационных, сейсмических и др.). В работе представлены подходы, методики испытаний и экспериментальные результаты, полученные в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» за, более чем, 20 лет исследований в области прочности всех разработанных конструкций ТВС. Показана необходимость всестороннего анализа прочности при улучшениях конструкции ТВС.

Проблема термомеханической устойчивости возникла почти 30 лет назад у всех производителей топлива при переходе на более глубокие выгорания, и выразилась в неполном введении поглощающих стержней ОРСУЗ в направляющие каналы (HK) изза искривления TBC. В рамках мероприятий для решения проблемы были разработаны методики, и выполнены следующие дореакторные испытания необлучённого топлива: статические механические испытания TBC на поперечный изгиб и определение изгибной жесткости TBC; испытания TBC на поперечный изгиб и определение изгибной жесткости TBC; испытания TBC на продольное сжатие и определение критической силы потери устойчивости TBC; испытания TBC на термомеханические циклические воздействия с имитацией режимов «пуск – останов» и маневрирования 20 % мощности; испытания TBC на чистый изгиб с определением чувствительности прогиба TBC к температурному перекосу по противоположным граням TBC; измерение влияния кривизны TBC на силы трения и время падения ОРСУЗ; испытания на прочность при падении утяжелённого ОРСУЗ; испытания образцов узла «твэл – фрагмент ДР» на трение с определением коэффициентов трения.

Проблема одиночных и массовых нарушений вибропрочности в виде фретингкоррозии оболочек и негерметичности твэлов ТВС при гидродинамических нагрузках эпизодически возникала у всех производителей топлива с момента зарождения атомной энергетики. До недавнего времени она была особенно актуальна для реакторов PWR. В АО ОКБ «Гидропресс» выполнялись следующие работы: определение характеристик собственных и вынужденных колебаний ТВС и твэлов; испытания фрагментов ТВС на гидродинамическую вибрацию и фреттинг-износ с оценкой запаса вибропрочности оболочек твэлов в контакте с дистанционирующими решётками; испытания материалов ТВС на износ с оценкой коэффициентов износа материалов ТВС в условиях штатного воднохимического режима (ВХР).

Сейсмические воздействия приводят к множественным горизонтальным соударениям ТВС друг с другом, динамическим искривлениям ТВС, НК и замедлению времени падения ОРСУЗ. Для решения задач по оценке прочности и измерения времени падения ОРСУЗ при землетрясениях были выполнены: определение модальных характеристик ТВС при сейсмическом (кинематическом) возбуждении колебаний опор ТВС с большими амплитудами; исследование процесса удара ТВС о выгородку в потоке воды при МРЗ 7 баллов; сейсмические испытания ТВС в составе канала регулирования реактивности на сейсмостойкость при МРЗ 7 баллов с определением динамической характеристики и времени падения ОРСУЗ. При аварийных воздействиях для оценки прочности TBC, которая регламентируется нормативными документами, были: определены силы, действующих на модель TBC при моделировании максимальной проектной аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода; проведены испытания TBC на падение с высоты при нарушении транспортно-технологических операций (TTO) с получением результатов динамического деформирования TBC для верификации ПО LS DYNA; проведены испытания TBC на термомеханические нагрузки при МПА до температуры 650 °C. Результаты испытаний используются в тематическом отчёте по механическим испытаниям тепловыделяющей сборки для доказательства недостижения предельных состояний TBC и твэлов в проектах всех строящихся АЭС; обладают научной новизной, сохраняют актуальность, использованы для верификации нескольких расчётных кодов.

Исследование локальных полей скоростей в ТВС

Зайцев Д. В., Чуркин А. Н., Ульяновский Д. В., Сергеев С. Г., Томковид Б. Г., Волков С. Е.

ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, churkin@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: перемешивающая решетка, дистанционирующая решетка, коэффициент гидравлического сопротивления, аэродинамическая модель ТВС ВВЭР, перепад давления, поле скорости.

В настоящем докладе представлены результаты экспериментальных исследований локальных параметров течения теплоносителя в периферийных ячейках модели тепловыделяющей сборки (TBC) с перемешивающими решетками (ПР) и без них.

Использование ПР в ТВС позволяет интенсифицировать теплообмен между теплоносителем и твэлами, улучшить перемешивание теплоносителя по сечению ТВС и тем самым увеличить запас до кризиса теплоотдачи.

Однако, при использовании ПР, в которых отсутствуют ячейки вокруг твэлов последнего ряда, имеет место перераспределение теплоносителя: увеличение расхода по периферии ТВС и уменьшение расхода в центральной части.

Исследования проводились на модели ТВС, представляющей собой полномасштабный в поперечном сечении необогреваемый фрагмент пучка твэлов, основные геометрические параметры которого в поперечном сечении эквивалентны пучку ТВС-2М. Работа выполнялась на малом контуре аэродинамического стенда ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Модель ТВС, помещенная в прозрачный шестигранный чехол (канал), устанавливалась на успокоительную камеру стенда, через которую вентилятором подавался воздух.

Поля скоростей исследовались с помощью лазерной доплеровской измерительной системы, изменение статического давления по высоте модели TBC – с помощью перемещаемых зондов отбора давления.

Измерения выполнялись при двух внутренних размерах «под ключ» шестигранного чехла модели ТВС: 237 и 245 мм. Для каждого варианта чехла измерения проводились при двух величинах расхода воздуха через модель: 1000 и 2000 м³/ч.

Полученные распределения (поля) скоростей в ряде периферийных ячеек по высоте модели ТВС в зоне установки перемешивающих решеток показывают, что формирование максимального расхода воздуха по периферийным ячейкам модели ТВС происходит на расстоянии от 55 до 75 мм выше ПР «Вихрь» или ПР «Прогонка», где среднее значение скорости потока по сечению периферийной ячейки максимально.

Наибольшее увеличение относительного расхода на периферии модели ТВС с ПР наблюдается при размере чехла «под ключ» 245 мм и расходе воздуха через модель 1000 м³/ч. Для этого случая расход на периферии модели увеличивается менее чем на 3 %. При этом с увеличением расхода воздуха через модель до 2000 м³/ч наблюдается тенденция к снижению относительного расхода воздуха на периферии модели ТВС при любой её конфигурации (с ПР или без ПР).

Таким образом, на основании результатов измерений, можно сделать вывод, что перераспределение расходов между центральной частью пучка и периферией, происходящее за счет установки ПР, пренебрежимо мало.

Результаты экспериментальных исследований смесительных свойств и гидравлических сопротивлений перемешивающих решёток на установке «ТРАССЕР»

Перепелица Н. И.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>nikip@ippe.ru</u>

Ключевые слова: реактор ВВЭР, тепловыделяющая сборка (ТВС), перемешивающая решётка (ПР), трассер-краситель, концентрация красителя, межъячейковое перемешивание потока воды.

Повышение мощности тепловыделяющих сборок (ТВС) реактора ВВЭР в основном связано с совершенствованием их конструкций и, в частности, использованием промежуточных смесительных решёток (ПСР) или перемешивающих решёток (ПР) и дистанционирующих смесительных решёток (ДСР). С их помощью осуществляется перемешивание теплоносителя между ячейками ТВС и его турбулизация в ячейках. Это способствует выравниванию температур по ячейкам, а, следовательно, и повышению критической мощности на ~ 10–15 %.

Совершенствованием конструкций ПСР и ДСР для ТВС ВВЭР занимается целый ряд организаций: ОАО «ОКБМ Африкантов», АО «ОКБ Гидропресс», АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», РНЦ «Курчатовский институт», ПАО «МСЗ», ПАО «НЗХК» и др. ОАО «ОКБМ Африкантов» для получения высокой интенсивности межъячейкового массообмена в ТВСА и ТВСА-АЛЬФА предложено использовать два типа ПР, отличающиеся между собой схемами расположения дефлекторов: закрутка вокруг твэла и порядная прогонка. Дефлекторами являются лопатки, сформированные на верхних кромках образующих решётку полос в области их пересечения и отогнутые в межстержневые ячейки.

Эффективность применения этих ПР нуждается в гидродинамическом и теплофизическом обосновании. Одним из этих этапов может служить оценка степени турбулизации и интенсивности межъячейкового перемешивания теплоносителя различными ПР с помощью трассерного метода. Он основан на анализе распределения по сечению канала с многостержневой сборкой подаваемого в поток теплоносителя некоторого трассера. В ГНЦ РФ – ФЭИ такой метод осуществляется с помощью установки «ТРАССЕР». Дополнительно к исследованиям перемешивания проводятся опыты по измерению перепада давления на исследуемой ПР.

Установка ТРАССЕР представляет собой небольшой циркуляционный контур, в котором располагается прозрачный канал с укороченной моделью ТВС, оснащённой двумя дистанционирующими решётками и исследуемой ПР. Моделью ТВС является сборка из девятнадцати необогреваемых стержней с наружным диаметром 9,1 мм и длиной 1,3 м, расположенных по треугольной упаковке с шагом 12,75 мм. В качестве исследуемой ПР использовались ленточная перемешивающая решётка – ЛПР, изготовленная согласно техническому решению: Патент № 2581620, Россия, G21c 3/322, Структура пластинчатой решётки для тепловыделяющей сборки, заявл. 17.03.2015, опубл. 20.04.2016.

Для оценки эффективности ЛПР проводились также опыты со сборками, оснащённых двумя выше указанными ПР, предложенными ОКБМ Африкантов. В данной работе эти ПР в зависимости от характера воздействия лопаток на поток воды обозначены: РСВ (решётка смесительная, вращательная) и РСП (решётка смесительная, прогоночная). Основным отличием ЛПР от РСВ и РСП является использование для перемешивания потока в каждой ячейке двух лопаток вместо одной лопатки. В поток воды перед исследуемой ПР подавался трассер-краситель «метиленовый голубой» $C_{16}H_{18}N_3SC$. Отбор проб воды осуществлялся с помощью вертикально расположенных в верхней части канала четырнадцати трубочек, имеющих внутренний диаметр около 1,5 мм. Для определения концентрации красителя (*C*) в исследуемых ячей-ках сборки использовался фотоэлектрический концентрационный колориметр. По степени изменения распределения *C* по ходу потока определялся коэффициент перемешивания (*K*). Он рассчитывался по адаптированной к данной задаче программе ОКБ «Гидропресс» ПУЧОК-1000. Под коэффициентом *K* подразумевается отношение средней пульсационной поперечной скорости к аксиальной скорости.

В результате проведенных опытов выявлено, что при определенном взаимном расположении двух лопаток в ЛПР можно осуществить более эффективное межъячей-ковое перемешивание потока воды в канале по сравнению с использованием СРП при их практически одинаковых величинах их коэффициентов гидравлического сопротивления. При этом наличие в ячейках двух опирающихся друг на друга лопаток вместо одной является более устойчивой структурой к их возможной деформации из-за образования внешнего воздействия.

Экспериментальное исследование теплофизических процессов при работе пассивных систем безопасности ВВЭР

Морозов А. В., Калякин Д. С.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>sas@ippe.ru</u>

Ключевые слова: ВВЭР, аварийный режим, пассивные системы, крупномасштабные стенды, гидроемкости, система пассивного отвода тепла, парогенератор.

В Российской Федерации организациями Госкорпорации «Росатом» разработан проект атомной электростанции с водо-водяным реактором – «АЭС-2006» с реакторной установкой ВВЭР-1200. Главная особенность проекта – использование дополнительных пассивных систем безопасности в сочетании с традиционными активными системами. Площадкой для сооружения головных блоков в серии «АЭС-2006» является вторая очередь Нововоронежской АЭС.

Пассивные системы охлаждения активной зоны данных проектов ВВЭР включают в себя систему залива активной зоны из гидроемкостей первой ступени (ГЕ-1), дополнительную пассивную систему залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени (ГЕ-2), а также систему пассивного отвода тепла (СПОТ).

В системе ГЕ-2 реализовано четырёхступенчатое профилирование расходной характеристики, которое обеспечивается использованием коллектора, позволяющего осуществлять пассивное изменение расхода, основанное на идее последовательного прекращения истечения по сливной линии, оказавшейся выше уровня воды в баке. Дополнительной функцией системы ГЕ-2 является автоматическое пассивное удаление неконденсирующихся газов из трубчатки парогенератора, что способствует улучшению теплообмена и обеспечивает более длительную работу ПГ в конденсационном режиме.

Система пассивного отвода тепла предназначена для длительного отвода остаточных тепловыделений от активной зоны реактора, при авариях с потерей всех источников переменного тока, как при плотном первом контуре, так и при возникновении течей в первом или во втором контурах. В случае течи в первом контуре система работает совместно с гидроемкостями второй ступени. Система состоит из четырех независимых каналов, по одному на каждый парогенератор реакторной установки.

При авариях с разрывом главного циркуляционного трубопровода СПОТ обеспечивает перевод горизонтальных парогенераторов в режим конденсации пара первого контура, поступающего в трубчатку ПГ из реактора, тем самым обеспечивая подпитку активной зоны. В результате конденсации происходит нагрев воды второго контура до температуры насыщения с образованием пара. За счет естественной циркуляции в паро-конденсатном тракте СПОТ пар поступает в воздушные теплообменники, установленные на наружной поверхности защитной оболочки. Пар конденсируется, отдавая тепло окружающему воздуху, а образовавшийся конденсат поступает обратно в ПГ.

Для обоснования проектных функций и работоспособности пассивных систем охлаждения активной зоны РУ ВВЭР, сооружаемой на площадке НВО АЭС-2, в ГНЦ РФ – ФЭИ было организовано проведение широкомасштабной программы экспериментальных исследований. В ходе ее реализации на полновысотном стенде была обоснована работоспособность системы пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени, исследована работа парогенератора ВВЭР в аварийном конденсационном режиме, изучено влияние неконденсирующихся газов, генерируемых в первом контуре реакторной установки и газов, поступающих за счет массообменных процессов из защитной оболочки через сечение разгерметизации на эффективность теплоотвода от реактора при запроектных авариях. Основные результаты проведенных работ представлены в докладе.

Особенности моделирования и расчета систем безопасности АЭС

Леденева О. М.

АО «Атомпроект», г. Санкт-Петербург, <u>OMLedeneva@atomproekt.com</u>

Ключевые слова: АЭС, системы безопасности, численное моделирование.

Вступление. В работе рассмотрен вопрос обоснования технологических решений при проектировании систем безопасности атомных станций на примере теплогидравлических расчетов систем охлаждения топливного бассейна и пассивного отвода тепла через парогенераторы (СПОТ ПГ) АЭС «Эль – Дабаа». Представлены результаты численного моделирования систем в расчетных кодах (РК) КОРТЕС и КОРСАР. Проведён анализ возможности выполнения системами заявленных в проекте функций.

Цель работы. Оценка работоспособности систем безопасности АЭС «Эль – Дабаа», проверка технологических решений компоновки оборудования станции с помощью расчетных кодов.

Примененные методы. В ходе расчета были созданы нодализационные схемы рассматриваемых систем с учетом реальных трассировок трубопроводов и характеристик оборудования. Проводился анализ работы систем на различных режимах работы. По результатам расчета были получены графические зависимости изменения параметров системы в точках контроля и сделаны соответствующие выводы.

Основные результаты. Параметром оценки работоспособности являлось условие выполнения своих основных функций каждой системы.

Анализ результатов расчета модели системы охлаждения топливного бассейна и пассивного отвода тепла через парогенераторы показал, что ни один из расчетных параметров не превышал проектно-допустимые значения.

Выводы. Расчетное обоснование, выполненное по РК КОРСАР и РК КОРТЕС, позволяет сделать заключение, что конструкция и работоспособность систем обеспечивает выполнение необходимых функций, расчётные параметры лежат в рабочем диапазоне оборудования и согласуются с проектными параметрами, следовательно, модели систем готовы к комплексной проверке в составе виртуального энергоблока (ВЭБ) АЭС «Эль – Дабаа».

Экспериментальные исследование процессов теплообмена в пучке воздухоохлаждаемых труб с поперечным оребрением в пассивной системе безопасности АЭС с ВВЭР

Сахипгареев А. Р., Морозов А. В.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>asakhipgareev@ippe.ru</u>

Ключевые слова: теплообмен, оребренные трубки, конденсация, неконденсирующиеся газы, парогазовая смесь, парогенератор, ВВЭР, аварийный режим.

В современной атомной энергетике есть ряд основных задач, требующих особого внимания. Одной из таких задач является недопущение расплавления активной зоны (АЗ) при работе на мощности. Обеспечение непрерывного отвода тепла от тепловыделяющих элементов при этом осуществляется за счет вынужденной циркуляции теплоносителя. В случае возникновения аварийной ситуации на атомной электростанции (АЭС) в работу включаются системы безопасности (СБ), которые отводят тепло от АЗ путем вынужденной циркуляции с помощью аварийных насосов. Эти системы принято называть активными. Помимо таких систем, существуют пассивные СБ, принцип действия которых основан на естественных законах природы. Они обеспечивают непрерывный отвод тепла от активной зоны в том случае, когда активные системы безопасности, по каким-либо причинам не могут включиться в работу (например, в случае аварии связанной с полным обесточиванием АЭС (режим «black-out»)).

В отечественном проекте «АЭС-2006» с реакторной установке ВВЭР-1200 используются следующие пассивные системы: система пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени (система ГЕ-2), система пассивного отвода тепла (СПОТ) от парогенератора (ПГ), а также пассивная система фильтрации.

Во время работы СПОТ и системы ГЕ-2, происходит снижение давления во втором контуре. Когда его величина станет ниже давления первого контура, ПГ перейдет в режим конденсации пара, поступающего из активной зоны. На длительность эффективной работы пассивных систем может повлиять генерация в АЗ неконденсирующихся газов. Поступая в трубный пучок парогенератора, работающего в конденсационном режиме, неконденсирующиеся газы могут ухудшить теплообмен от первого контура, тем самым вызвать снижение эффективности работы СПОТ. В течение первых 24 часов после начала аварии неконденсирующиеся газы самопроизвольно отводятся в объем гидроемкостей работающей системы ГЕ-2. После окончания истечения теплоносителя из этих емкостей отток газов прекращается. Это приведет к снижению конденсационной мощности парогенератора, что в конечном итоге может вызвать расплавление активной зоны.

Для решения возникшей проблемы в перспективных проектах АЭС с ВВЭР рассматриваются различные концепций пассивных систем безопасности. Так, например, в проекте «ВВЭР-ТОИ» предполагается с использованием гидроемкостей третьей ступени. Наряду с этой концепцией, проектантом рассматривается система удаления газов, основанная на техническом решении, позволяющем отводить парогазовую смесь (ПГС) из трубного пучка парогенератора в специальные теплообменники, размещенные в межоболочечном пространстве (МОП) защитной оболочки АЭС. Данные теплообменные аппараты подключается параллельно к гидроемкости второй ступени и образует с ней контур естественной циркуляции, в котором происходит движение ПГС. Работа устройства должна обеспечить отвод парогазовой смеси из трубного пучка парогенератора, обеспечивая работоспособность СПОТ. Пар из ПГС конденсируется, отдавая тепло воздуху в МОП, а неконденсирующиеся газы накапливаются в объеме гидроемкости. Так как тепло отводится к воздуху, движущемуся снизу-вверх в объеме межтрубного пространства, то для повышения эффективности теплообмена предполагается использовать трубный пучок с продольным оребрением.

Проведенный анализ публикаций показал, отсутствие работ по исследованию работы воздухоохлаждаемых оребренных теплообменников с продольным оребрением в системах с естественной циркуляцией сред в диапазоне параметров характерных для первого контура РУ через сутки после начала аварии. Из всего вышеизложенного следует необходимость проведения экспериментальных исследований на трубных пучках с продольным оребрением, применительно к условиям работы пассивных систем безопасности АЭС с ВВЭР.

Для исследования процессов теплообмена в пучке воздухоохлаждаемых труб с поперечным оребрением в пассивной системе безопасности АЭС с ВВЭР в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» была создана экспериментальная установка с рабочим участком «Устройство удаления газов» (УУГ). В состав стенда входят: модель воздухоохдаждаемого оребренного теплообменника с 14-ю теплообменными трубками; парогенератор объёмом 300 л с внутренним регулируемым электрическим нагревателем мощностью 12 кВт; накопительный бак пара объёмом 48 л; модель гидроемкости системы ГЕ-2 объёмом ~650 л; две мерные емкости, каждая объемом 14 л; конденсатор системы поддержания давления; технологические линии с арматурой; система подачи газов. Мерные емкости предназначены для сбора конденсата, образующегося в модели ГЕ-2 и в рабочем участке. Материал трубок – Ст 20, общая длина теплообменной трубки – 4000 мм, диаметр 16 мм, что соответствует параметрам трубки предполагаемого натурного устройства удаления газов. Длина оребренного участка ~ 3000 мм, число ребер – 5, высота ребра – 16 мм, толщина – 1 мм. Рабочий участок окружен металлическим разборным кожухом, с помощью которого моделируется МОП защитной оболочки АЭС.

На установке были проведены исследования, цель которых заключалась в определении влияния оказываемого отводом неконденсирующихся газов из коллектора УУГ на процессы теплообмена в вертикальных оребренных воздухоохлаждаемых трубках. В тексте доклада представлены полученные результаты экспериментов.

Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при расчетном моделировании аварийных процессов в реакторной установке ВВЭР нового поколения во время совместной работы пассивных систем безопасности (система ГЕ-2, СПОТ), с учетом работы устройства удаления неконденсирующихся газов.

Экспериментальное исследование влияния неконденсирующихся газов на процессы конденсации пара в трубчатке модели парогенератора ВВЭР

Шлепкин А. С., Морозов А. В.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>alekstqel@mail.ru</u>

Ключевые слова: теплообмен, оребренные трубки, конденсация, неконденсирующиеся газы, парогазовая смесь, парогенератор, ВВЭР, аварийный режим.

В настоящее время одним из недостатков концепции безопасности предыдущих поколений реакторов является зависимость защитных систем атомных электростанций (АЭС) от подачи электроэнергии. В связи с этим, для повышения надежности АЭС нового поколения во многих перспективных зарубежных и отечественных проектах реакторных установок (РУ) предусматривается наличие дополнительных пассивных систем безопасности (ПСБ), способных обеспечить отвод остаточных тепловыделений от активной зоны реактора в случае потери всех источников электроснабжения.

В РУ ВВЭР-1200, сооруженной на площадке НВ АЭС, такими системами являются система пассивного залива активной зоны из гидроёмкостей второй ступени (ГЕ-2) и система пассивного отвода тепла (СПОТ). Задача СПОТ заключается в переводе горизонтального парогенератора (ПГ) в режим конденсации пара первого контура, поступающего в трубчатку ПГ из реактора, тем самым обеспечивая длительную подпитку активной зоны, как при плотном первом контуре, так и при возникновении течей в первом или во втором контурах. В результате конденсации в трубчатке ПГ пара первого контура происходит нагрев воды второго контура до температуры насыщения с получением пара. За счёт естественной циркуляции в паро-конденсатном тракте СПОТ пар поступает в воздушные теплообменники, установленные на наружной поверхности защитной оболочки. Пар конденсируется, отдавая тепло окружающему воздуху, и конденсат поступает обратно в межтрубное пространство ПГ. Таким образом, эффективность теплоотвода от активной зоны в аварийном режиме зависит от мощности парогенератора. Кроме того, чем интенсивнее парогенераторы будут конденсировать пар, тем меньше его будет поступать из реакторной установки в защитную оболочку, что обеспечит не превышение допустимого значения давления в контейнменте.

Исследование тепломассообменных процессов, происходящих в модели парогенератора ВВЭР при работе пассивных систем безопасности, было проведено на стенде «ГЕ2М-ПГ», сооруженном в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».

В ходе анализа экспериментальных данных были выявлены сложные обратные связи между накоплением неконденсирующихся газов, изменением мощности теплообменников СПОТ и эффективностью теплопередачи между первым и вторым контурами. Оказалось, что на производительность системы пассивного отвода тепла оказывает влияние не только совокупная масса поступивших в ПГ неконденсирующихся газов, но и скорость их накопления. В результате была разработана методика, позволяющая качественно оценить эффективность теплообменных процессов в трубчатке парогенератора для различных условий протекания аварийного процесса.

Кроме того, были получены полуэмпирические формулы, позволяющие рассчитать изменение следующих параметров: перепада температур между контурами, конденсационной мощности парогенератора и коэффициента теплопередачи в аварийном режиме при отсутствии отвода парогазовой смеси из холодного коллектора. Полученные результаты можно использовать для верификации расчетных кодов, используемых для расчетного моделирования аварийных процессов в реакторной установке BBЭP-1200.

Проблемы описания динамики концентрации раствора борной кислоты в аварийных режимах

Шмаль И. И.

АО «АСЭ»/АО «Атомэнергопроект», г. Москва, shmal_ii@aep.ru

Ключевые слова: концентрация раствора, предельная концентрация, кристаллизация, растворение, выпаривание, твердая и жидкая фаза, устройство локализации расплава.

Выполнен ряд работ, посвященных динамике концентрации раствора борной кислоты в объеме, в сообщающихся сосудах с тепло- и массообменом. Точечные модели, но выбор и обоснование принимаемых конструкторских решений требует их использования за неимением лучшего. Для более сложных работ необходим соответствующий экспериментальный материал, но последний в течение последних почти тридцати лет не появляются в нашей отрасли.

Разработана модель для слоистых структур растворов при условии линейного увеличения температуры по высоте столба. Последняя дала объяснение экспериментально отмеченному факту: наступлению кристаллизации одновременно по всей высоте в подъемном сосуде. Причина – противное решение порождает неустойчивое решение, то есть жидкость с меньшей плотностью находится в нижних слоях сосуда и вызывает перемешивание раствора.

Представлена новая модель для описания процессов в устройстве локализации расплава. Расчетный объем состоит из трех компонентов. Выделение объема внутри корпуса устройства локализации расплава потребовало решение технологических задач: критические времена для обеспечения подачи воды в корпус устройства для предотвращения кристаллизации, препятствующей отводу тепла от верхней образующей расплава внутри корпуса.

Описание модели. Опускной участок есть бак-приямок (из него раствор борной кислоты поступает в зазор между внутренней стенкой шахты реактора и наружной стенкой устройства локализации расплава). Подъемный участок состоит из двух компонентов, где подводится тепло и происходит испарение воды: зазор между внутренней стенкой шахты реактора и наружной стенкой устройства локализации расплава, а также объем внутри корпуса устройства локализации расплава. Сообщение между двумя последними компонентами происходит через клапан подачи воды. В двух последних компонентах производится теплоподвод, т.е. происходит образование пара; именно этим вызвано увеличение концентрация раствора борной кислоты.

Сравнение с ранее полученными результатами. Описание подъемного участка одним объемом не показало возникновения твердой фазы в корпусе устройства локализации расплава.

Использование двух объемов при описании зазора и объема над зеркалом расплава показало, что примерно через 37,5 часов внутри корпуса устройства достигается предельная концентрация раствора борной кислоты, и начинается кристаллизация.

По окончании трех суток внутри корпуса образуется объем твердой фазы, равный 5,85 м³, данному объему соответствует «слой» кристаллической структуры, равный 0,21 м.

Какова структура твердой фазы? Большинство экспериментов (30-летней давности) прогнозировали возникновение взвеси: в подобных случаях, то есть сохранение теплоотвода от поверхности кориума в устройстве. Косвенное подтверждение – наличие раствора кислоты в корпусе, толщина слоя которого составляет около 0,9 м. Отсутствие экспериментального материала для апробации расчетных моделей и программ приводят к тому, что решение проектировщик принимает консервативное решение: подача воды для снижения концентрации раствора борной кислоты внутри корпуса устройства локализации должна начинаться не позднее первых двух суток с момента попадания кориума в устройство.

Снижение концентрации раствора борной кислоты, растворение твердой фазы возможно лишь при подаче чистой воды либо раствора борной кислоты в корпус устройства локализации. Так расход генерируемого пара с зеркала расплава составляет около 3–3,5 кг/с, то соответствующий расход подаваемой жидкости с малой концентрацией борной кислоты должен превышать указанную цифру.

Основные результаты. Разрабатываемые методики и программное обеспечение используются при выборе и обосновании технологических решений для устройства локализации расплава.

Выполнение расчетов динамики концентрации при функционировании устройства локализации расплава с описанием подъемной части одним объемом не выявило факта появления твердой фазы в корпусе устройства локализации.

Дискретное описание подъемной части (два объема) позволило уточнить динамику процессов внутри корпуса устройства локализации. Определены времена достижения предельной концентрации – 37,5 часов. Далее происходит появления твердой фазы внутри корпуса устройства локализации, выяснена динамика массы кристаллических образований.

Результаты используются разработке технологических режимов эксплуатации устройства локализации расплава, при назначении места и момента времени подачи чистой жидкости.

Влияние концентрации раствора борной кислоты в дополнительной системе залива активной зоны на процессы массопереноса в РУ ВВЭР в случае аварии

Питык А. В., Морозов А. В., Рагулин С. В., Сахипгареев А. Р., Шлепкин А. С. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>asakhipgareev@ippe.ru</u>

Ключевые слова: ВВЭР, аварийный режим, парогенератор, гидроемкости, борная кислота, теплообмен, кипение, кристаллизация, капельный унос.

В рамках концепции безопасности проекта «ВВЭР-ТОИ» особое внимание уделяется вопросам, связанным с накоплением и кристаллизацией борной кислоты в активной зоне при запроектных авариях с разрывом главного циркуляционного контура и потерей всех источников переменного тока в течение 72 ч. Как известно, обеспечение автономности реактора при аварийном процессе обусловливается функционированием пассивных систем безопасности (ПСБ), которые обеспечивают охлаждение активной зоны (АЗ) за счет последовательной подачи в реактор раствора борной кислоты с концентрацией 16 г/кг из гидроёмкостей первой (ГЕ-1), второй (ГЕ-2) и третьей ступеней (ГЕ-3). Помимо этого необходимо учитывать поступление в реактор конденсата из парогенераторов трех неаварийных петель.

Активная зона в это время находится в состоянии кипения, соответственно, учитывая малую концентрацию кислоты в паровой фазе, возможно увеличение количества борной кислоты в теплоносителе активной зоны и достижение условий её кристаллизации. Возможность кристаллизации борной кислоты в активной зоне ядерных реакторов в аварийной ситуации подтверждается расчетными и экспериментальными исследованиями как отечественных, так и зарубежных исследователей. Предельная концентрация раствора борной кислоты, соответствующая началу появления твердой фазы, зависит от температуры: повышение температуры приводит к резкому увеличению предельной концентрации (растворимости) раствора борной кислоты, снижение – к её уменьшению.

Одним из рассматриваемых способов снижения риска кристаллизации борной кислоты является уменьшение концентрации кислоты в системе ГЕ-3. Соответственно, актуальной представляется задача установления значения концентрации H₃BO₃, при котором не будет происходить превышение предельной концентрации борной кислоты в активной зоне при аварийном процессе.

Для оценки возможности кристаллизации H₃BO в активной зоне BBЭP был проведен расчет накопления борной кислоты в реакторе в аварийном режиме. При проведении расчета были сделаны следующие консервативные допущения: давление в реакторной установке принято постоянным и равным 0,3 МПа, борная кислота рассматривается как единственная форма накопления бора, капельный унос борной кислоты отсутствует.

Проведенная расчетная оценка показала существенное превышение предельной концентрации борной кислоты в активной зоне BBЭР через ~ 43 часа после начала аварии. Данный процесс может вызвать ее кристаллизацию в объеме активной зоны. Как показано в расчете, одним из вариантов решения данной проблемы является снижение концентрации борной кислоты в системе ГЕ-3 до 8 г/кг. В ходе проведения расчетного анализа было установлено, что в настоящий момент существует неопределенность в имеющихся зависимостях для вычисления влажности пара и паросодержания среды на выходе из активной зоне BBЭР в случае аварии. Для устранения имеющихся неопределенноста Н₃BO₃ при параметрах, характерных для аварийных режимов АЭС с BBЭР.

Исследование газо-водной смеси в полости гильзы кластерного регулирующего органа

Салахова А. А., Белозеров В. И., Милинчук В. К.

ИАТЭ НИЯУ «МИФИ», г. Обнинск, <u>AASalahova@yandex.ru</u>

Ключевые слова: реактор РБМК-1000, кластерный регулирующий орган (КРО), система управления и защиты (СУЗ), тепловыделяющий элемент (твэл), поглощающий элемент (пэл), алюминий, алюминиевые сплавы САВ-1 и АСД-4, вода, водород, жидкое натриевое и калиевое стекло, кристаллогидраты метасиликата натрия, известь.

В проекте технического устройства для постоянного отвода газо-водной среды из полости гильзы кластерного регулирующего органа (КРО) в трап бассейна выдержки реактора РБМК-1000 предусмотрена возможность установки датчика контроля с целью мониторинга состава газо-водной смеси в полости гильзы КРО. При перемещении в КРО поглощающих элементов происходит их трение со стенками продольных каналов, которые изготовлены из сплава алюминия марки САВ-1. При механическом воздействии оксидная пленки на поверхности канала частично или полностью удаляется, и сплав переходит в состояние без защитного оксидного слоя. Целью работы является получение экспериментальных данных о взаимодействии алюминиевых сплавов марок САВ-1 и АСД-4 с водной средой гильзы КРО при наличии в воде химических соединений, которые удаляют пассивирующий оксидный слой Al₂O₃ с поверхности металла. В качестве химических активаторов сплавов исследованы кремнийсодержащие соединения (жидкое натриевое стекло, жидкое калиевое стекло, кристаллогидраты метасиликата натрия) и известь. Реакции алюминиевых сплавов в водных растворах с жидким натриевым и калиевым стеклом протекают в эндотермическом режиме, а в водных растворах кристаллогидрата метасиликата натрия и извести – в экзотермическом. Выходы водорода для сплавов САВ-1 и АСД-4 при 60°С составляют ~ 0,6 л на 1 г прореагировавшего металла. Образующийся при взаимодействии алюминиевого сплава САВ-1 с водой водород входит в состав газо-водной смеси в полости гильзы КРО. Поэтому образование водорода необходимо учитывать при проведении мониторинга газо-водной смеси гильзы КРО реактора РБМК-1000.

СЕКЦИЯ 5.

Расчетные модели, коды и результаты численного моделирования

Расчет теплогидравлических систем АЭС с применением графического редактора математических моделей

Каргин Т. Ю., Кремнев И. С.

AO «Атомпроект», г. Санкт-Петербург, <u>TYUKargin@atomproekt.com</u>

Ключевые слова: АЭС, системы безопасности, численное моделирование, графический интерфейс, верификация проектных решений, теплогидравлический расчетный код, КОРТЕС, КОРСАР, виртуальный энергоблок.

При проведении работ по обоснованию проектных решений и анализу безопасности АЭС применяются расчетные коды, позволяющие проводить расчеты технологических систем с учетом АСУТП для следующих задач:

– подтверждение технических и технологических решений по системам и оборудованию энергоблока;

– отработка алгоритмов управления оборудованием и системами АЭС в составе проекта систем контроля и управления;

 моделирование сложных комплексных сценариев аварийных ситуаций с целью определения мероприятий для их предотвращения и локализации.

В докладе будет рассмотрен процесс математического моделирования технологических систем с использованием графических редакторов математических моделей (ГРМ) расчетных кодов КОРТЕС и КОРСАР, используемых в АО «Атомпроект». ГРМ представляет собой библиотеки элементов и модулей интеграции расчетных кодов, реализованные в среде программного комплекса SimInTech.

При моделировании без ГРМ модели технологических систем создаются в виде входного текстового файла специального формата (определяется расчетным кодом). При непосредственной работе с входными файлами инженер-расчетчик сталкивается со следующими недостатками подхода:

 входные файлы громоздки и не дают наглядного представления о структуре технологической схемы;

- отсутствует первичная проверка на ошибки;

– нет возможности анализировать параметры системы или воздействовать на них (например, управлять задвижками, насосами и др.) в режиме «on-line»;

– организация взаимодействия нескольких расчетов в режиме «on-line» – отдельная непростая задача;

- появление труднодиагностируемых ошибок вследствие человеческого фактора;

– большие временные затраты не только на разработку модели, но и при внесении изменений.

ГРМ позволил решить вышеперечисленные проблемы. Подключение расчетных кодов к единой системе автоматически позволяет проводить связные расчеты широкого спектра. Графическая среда дает возможность быстро редактировать модели, анализировать параметры моделируемой системы в режиме «on-line», управлять разными элементами (задвижки, насосы и др.).

Графические интерфейсы в значительной мере упрощают процесс создания и отладки схем, имеют гибкую настройку элементов, возможность многократного использования моделей в качестве примитивов для дальнейшего применения.

Расчетные технологии. Формулировка механизма движения жидкости для нестационарного анализа в дискретном времени

Щербаков С. И.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>scher@obninsk.com</u>

Ключевые слова: численное моделирование, нестационарные течения, циркуляция скорости, граничные источники возмущений, уравнения транспорта, обратная связь.

1. **Цель работы** – совершенствование расчетных численных схем динамики текущей среды для увеличения быстродействия при решении нестационарных задач в дискретном времени. Это достигается формулировкой описания процессов в текущей сплошной среде, на основе схемы экстраполяции изменений векторного поля на конечном временном интервале.

2. Суть формулировки. По сплошной текущей среде перемещаются (или локализованы) первичные возмущения (ПВ) – ротор скорости, дивергенция скорости и определяемые внешними условиями скорости. Эти возмущения мгновенно и во всей области порождают вторичные возмущения – поля изменений скорости (ПИС) трех возможных конфигураций (О, Ж, Ф – поля). В результате изменяются скорости на границах, в том числе вверх по течению. Это приводит к изменению на границах значений ПВ. Через некоторое время, в результате транспорта изменяется пространственное распределение ПВ и, соответственно, скорости. Возникает обратная связь, и процесс течения становится нестационарным.

3. Для полноты этой модели динамики жидкости, рассматривается формирование на границах ПВ от ПИС и транспортные уравнения для ПВ.

4. Деформация поля скорости на непроницаемых границах. ПИС во всей области от локализованного источника является безвихревым везде, кроме области соответствующего ПВ [1]. Поля от множества источников независимы и суммируются. Поэтому, искажения поля скорости на непроницаемых участках, могут быть рассмотрены для ПИС одиночного ПВ. Вдали от возмущения $V = \nabla \sigma_1$.

5. Искажение поля скорости со стороны непроницаемой границы может быть описано добавлением деформационного поля. Это деформационное поле генерируется задаваемыми на поверхности границы векторами, равными нормальным компонентам недеформированного поля скорости со знаком минус. То есть, деформационное поле – это поле Ф-типа и определяется решением уравнения

$$\delta V = -V_n + \nabla \sigma_2; \qquad \nabla^2 \sigma_2 = \nabla (V_n); \qquad V_n = (\nabla \sigma_1)_n.$$

Деформированное ПИС равно сумме $W = -V_n + \nabla \sigma_2 + \nabla \sigma_1$.

В результате, течение происходит вдоль непроницаемой границы. Самой границы как бы нет.

6. Свойства деформированного поля скорости: дивергенция равна нулю по определению, ротор скорости: $\nabla \times W = -\nabla \times V_n$.

Ротор скорости может быть выражен через компоненту скорости вдоль границы V_p.

 $V_p + V_n = (\nabla \sigma_1)_p + (\nabla \sigma_1)_n = \nabla \sigma_1$ и $\nabla \times W = \nabla \times V_p$.

7. Таким образом, в деформированном границей поле скорости, возникает циркуляция скорости – поле перестает быть безвихревым. Эта циркуляция существует до тех пор, пока существует ПВ. Ротор скорости привязан к определенному месту границы, не зависит от течения. Это *источник* циркуляции, непрерывно ее генерирующий в текущей жидкости за счет ограничения скорости на непроницаемой границе.

8. Циркуляция на границе вычисляется по полю скорости так же, как и внутри области течения. Можно принять, что граница включена в область расчета, является жидкой, но заторможенной внешними силами. Момент этих сил и рождает ротор скорости. В рассмотрении трения не участвовало, генерация циркуляции скорости происходит и в идеальной жидкости.

9. Транспортные уравнения для ротора скорости. Для расчета течения жидкости в модели совокупности частиц используется уравнение Навье-Стокса. Действуя на это уравнение оператором ротор, получим уравнение для вихря. В принципе, этого достаточно.

10. Однако желательно иметь уравнеие переноса в консервативной форме, в форме закона сохранения. Сохраняющейся величиной при течении является, связанная с вихрем, циркуляция скорости (теорема Томсона), перемещающаяся вместе с жидкостью. Это скаляр ωS , объемная плотность циркуляции $\Omega = \omega/L$, где S и L – сечение и длина элемента.

11.Используя функцию маркера $d\phi/dt = 0$, перемещающегося с жидкостью и имеющего по длине *L* разные значения, можно получить уравнение сохранения циркуляции:

$$\Omega = \omega \nabla \varphi; \qquad \partial \Omega / \partial t + \nabla (V \Omega) = v \nabla \varphi \nabla^2 \varpi + \nabla \varphi (\nabla \rho \times \nabla P) / \rho^2.$$

Идеально схема подходит для двумерной постановки с произвольными локальными размерами проточной части (градиент этой функции $\nabla \phi \approx 1/L$). Использование этого уравнения позволяет совместить в расчетной области участки с различной геометрией и модельным представлением. Уравнение используется в двумерном коде TURBOFLOW.

12. Уравнения для дивергенции скорости. Дивергенция поля скорости связана с изменением плотности текущей среды. То есть, дивергенция скорости должна вычисляться из уравнения сохранения массы:

 $\partial \rho / \partial t + \nabla (\rho V) = \rho Q; \quad \partial \rho / \partial t + V \nabla \rho = -\rho \nabla V + \rho Q; \quad \nabla V = -d\rho / \rho dt + Q.$

13. В текущей среде существует много сохраняющихся величин. Это тепловая энергия, циркуляция скорости, количество какого-либо компонента. Каждое из них может быть записано в этой форме. Однако, есть существенное отличие – плотности энергии, циркуляции, концентрации компонент являются *определяемыми* величинами, зависящими от поля скорости. Плотность среды вычисляется по температуре, концентрации компонент, и в уравнении сохранения массы является *определяющей* величиной. По этому уравнению рассчитывается дивергенция скорости, а не плотность среды.

14. Обтекание внутренних непроницаемых участков. На таких участках, как и на границах, происходит деформация ПИС, и возникают локальные источники циркуляции. Кроме того, обтекание сопровождается разделением и слиянием потока с заранее неизвестными пропорциями. Можно принять, что непроницаемый участок включен в область расчета, является жидким, но заторможенным внешними силами. Тогда, для расчета разделения потока, нужно проинтегрировать уравнение переноса циркуляции по объему участка.

15. Получим уравнение для циркуляции вокруг непроницаемого участка (присоединенный вихрь Жуковского) как баланс входящих и выходящих потоков вихря с поверхности. Интенсивность циркуляции зависит от формы участка и направления набегающего потока, так как локальные вихри пропорциональны кривизне поверхности и разнонаправленно связаны с циркуляцией. Другая особенность – циркуляция устанавливается не мгновенно, это временной процесс (постоянная времени порядка отношение длины участка к скорости потока). Возможны обратные связи для локальных вихрей через циркуляцию вокруг участка и, соответственно, пульсации интенсивности циркуляции и т. п.

16. *Начальные условия и развитие течения.* В начале движения из состояния покоя, после первого толчка, поле скорости равно ПСИ от источника, локализованного вне области и, является безвихревым. Подтверждается экспериментальными данными.

17. Начальное ПСИ порождает источники циркуляции на ограничивающих поверхностях. Из этих источников, циркуляция выносится приграничным течением. Перемещение циркуляции порождает ПИС. В результате приграничное течение искривляется и отрывается от непроницаемой поверхности. Одновременно изменяются источники циркуляции на ограничивающих поверхностях. Процесс может закончиться установлением стационарного течения или иметь периодический характер.

18. Вынос циркуляции с непроницаемой границы в пространство визуализируется при кратковременном пропускании потока, ограниченного по сечению. В пространстве остается движущийся вихрь, например, кольцо с дымом или «гриб» ядерного взрыва.

19. В чем необходимость нестационарных исследований течений. Рассматриваемые нестационарные течения вызваны существованием обратной связи для циркуляции скорости между потоком и непроницаемыми границами. Это фундаментальное свойство движения жидкости и основа его правильного моделирования.

20. В таких течениях возникают масштабные перемещения потоков, образуются замкнутые области с изменяющимся объемом и местоположением. Возникает интенсивное перемешивание путем перемещения объемов жидкости. Последствия не могут быть оценены по осредненному стационарному течению. Поэтому любую задачу течения, вначале, целесообразно исследовать как нестационарную.

Расчетные технологии. Вычислительные схемы для улучшения моделирования тепломассопереноса в дискретном времени

Щербаков С. И.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>scher@obninsk.com</u>

Ключевые слова: численный расчет, дискретная область, уменьшение ошибок, сеточное перемешивание, явные схемы, перенос тепла, фазовый переход.

1. Цель работы – совершенствование численных схем расчета текущей среды для повышения качества получаемых результатов. Рассматриваются три алгоритма – для снижения эффекта сеточного перемешивания, для обеспечения устойчивости явных схем, для одновременного расчета кипения и подогрева. Алгоритмы используются в коде Turboflow [1].

2. Алгоритм уменьшения эффекта сеточного перемешивания. Для численного анализа течений применятся дискретизация расчетной области – разбиение на множество соприкасающихся по граням ячеек. Скорости, как правило, задаются через компоненты, нормальные к граням.

3. Значение переносимого потоком параметра в ячейке одно по всему объему ячейки. Поэтому потоки, входящие в ячейку через соседние непараллельные грани, перемешиваются. Эффективный коэффициент перемешивания (теплопроводности, диффузии, вязкости) достигает огромных значений $\sim V^*d$ (произведение скорости и размера ячейки) и сильно зависит от направления течения. Это явление – «сеточное» перемешивание – уменьшает неравномерность распределений в расчете, что не соответствует действительности.

4. Для снижения «сеточного» перемешивания предлагается следующая технология. Для каждой расчетной ячейки вычисляется интенсивность перемешивания. В ячейках, расположенных ниже по течению, добавляются комплементарные источники, восстанавливающие значения функций до перемешивания (алгоритм КИНТ).

5. Алгоритм поясняется для двумерного случая (ячейки с четырьмя гранями). Для ячейки с номером 22, входящие расходы W_{21} и V_{12} , выходящие V_{22} и W_{22} . Вычисляем коэффициенты:

$$x = V_{12} / (V_{12} + W_{21}), \quad y = W_{22} / (V_{22} + W_{22}),$$

$$q = koef \cdot \min\{x(1-y), \qquad y(1-x)\} \cdot (V_{22} + W_{22}).$$

6. В ячейках 32 и 23, расположенных ниже по течению, куда попадают потоки V_{22} и W_{22} , добавляются источники (в сумме равные нулю) для уравнения переноса функции *F*:

$$Q_{32} = q \cdot (F_{21} - F_{12}), \quad Q_{23} = -Q_{32}.$$

7. Этот алгоритм в двумерном случае (для ячеек с четырьмя гранями) применяется только для ячеек, имеющих по два входящих и два выходящих расхода через соседние грани.

8. Коэффициент пропорциональности *koef* задается. Оптимальное значение по опыту 0,5, предельное 1,0. Эффект от использования описанного алгоритма демонстрируется расчетом температурного поля в наклонном канале при несовпадении вектора скорости и осей сетки.

9. Алгоритм улучшения сходимости явных схем. Для численных расчетов пространственных задач переноса используются системы разностных уравнений. Существуют явные и неявные схемы решения этих уравнений – расчет последовательных приближений (или расчет по времени). Для явных схем, новое приближение функции в каждом расчетном узле вычисляется по известным значениям предыдущего приближения в соседних узлах. Для неявных схем значения функций в соседних узлах берутся из последующего приближения, вся совокупность значений для узлов определяется в одном процессе и самосогласованна.

10. Явные схемы обладают недостаточной устойчивостью из-за несогласованности значений нового приближения в соседних узлах. К сожалению, создать полностью неявные схемы нельзя, большая часть схем расчета является смешанной.

11. Пример смешанной схемы – решение системы уравнений многомерной задачи методом одномерной прогонки, применяемой многократно в различных направлениях вдоль параллельных линий узлов в каждом напрвлении. Дополнительно присутствует взаимодействие объектов, расположенных в разных частях расчетной области (например, передача тепла между контурами теплообменника).

12. Разностные уравнения для прогонки в двумерной сеточной области (столбце 2) и взаимодействии с удаленной ячейкой *nm*, имеют вид (функции *F*' относятся к новому приближению):

$$c_{22}(F_{22} - F_{22}) = b_{21}F_{21} + b_{22}F_{23} - (b_{21} + b_{22} + a_{21} + a_{22} + k)F_{22}^{3} + a_{12}F_{12} + a_{22}F_{32} + kF_{nm} + \dots$$

При решении, может случиться так, что значение F'_{22} приблизится к F_{nm} . или F_{32} или F_{12} . Затем, когда прогонка будет выполняться для столбца 1 или 3 или n, соответствующие значения F следующего шага приблизятся к F_{22} . Может случиться, что разности F_{22} и F_{nm} или F_{32} или F_{12} изменят знак, что недопустимо.

13. Этот недостаток устраняется заменой в уравнении прогонки для столбца 2:

$$k(F_{22} - F_{nm})$$
 Ha $2k(F_{22} - (F_{22} + F_{nm})/2)$

и заменой в уравнении прогонки для столбца *n*:

$$k(F_{nm} - F_{22})$$
 Ha $2k(F_{22} - (F_{nm} + F_{22})/2)$.

14. Такая замена соответствует вводу промежуточной точки и среднего значения функции для двух взаимодействующих узлов. При решении значения в узлах приближаются к этому среднему. Устраняет возможность изменения знака разности F_{22} и F_{nm} (или F_{32} , или F_{12}) в следующем приближении, процесс сходимости становится апериодическим.

15. Расчет переноса тепла с учетом фазовых переходов. Численный расчет переноса тепла в текущей смеси зависит от состава и наличия фазовых переходов между компонентами.

16. Если во всей расчетной области, температура смеси ниже или выше температуры фазового перехода T_s , то температурное поле, рассчитывается по уравнению для однофазной среды. Если температура двухфазного потока всюду равна температуре фазового перехода T_s , то тепло передается только при генерации или конденсации пара. Перенос тепла происходит с движением компонент. Количество передаваемого тепла определяется градиентом температуры внутри стенки.

17. В реальности температура в разных частях области разная, и выше, и ниже температуры фазового перехода, течение компонент неравномерное. Могут одновременно происходить разные процессы – перенос тепла за счет градиента температуры, конденсация пара в холодную жидкость, кипение, на поверхности. Все эти процессы для расчета требуют разных уравнений и схем, что усложняет алгоритм и ведет к ошибкам.

18. Предлагается единая схема расчета для всех процессов переноса тепла, в том числе, при температурах вблизи фазовых переходов. Используется уравнение переноса тепла для однокомпонентной среды с дополнительным источником тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V\nabla(T) = a\nabla^2 T + \frac{q}{\rho C}.$$

Источник тепла q – это тепло выделяемое или поглощаемое при изменении концентрации компонент в узле при фазовом переходе. Температура T всех компонент в одном узле считается одинаковой, теплоемкость C рассчитывается по локальному составу смеси, между стенкой и смесью задается коэффициент теплоотдачи.

19. На каждом шаге расчета проверяются условия. Если температура смеси ниже T_s и конденсирующаяся компонента $\phi > 0$, то происходит конденсация и выделение тепла q:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{(T - T_s)}{\tau} \cdot \frac{C}{r}, \qquad q = -\frac{\partial \varphi}{\partial t} \rho r.$$

Если температура выше T_S и испаряющаяся компонента $\phi > 0$, то происходит испарение и поглощение тепла:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{(T - T_s)}{\tau} \cdot \frac{C}{r}, \qquad q = \frac{\partial \phi}{\partial t} \rho r.$$

20. Демонстрируются результаты расчета переноса тепла испарением и конденсацией в термосифоне. Особенности получаемых результатов по этому алгоритму – повышении температуры в зоне кипения выше T_s и понижение в зоне конденсации ниже T_s . Эффект пропорционален постоянной времени τ . Вторая особенность – необходимость увеличения коэффициента теплоотдачи от стенки к смеси при повышении температуры стенки выше T_s , иначе либо температура стенки сильно изменится, либо интенсивность процесса уменьшится.

Расчетный код COREMELT3D для расчета аварийных и переходных процессов в быстрых реакторах с натриевым теплоносителем

Волков А. В.¹, Моряков А. В.², Раскач К. Ф.¹, Соломонова Н. В.¹, Чернухина Ю. В.¹

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, volkov@ippe.ru;
– НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Ключевые слова: код, модуль, теплогидравлика, нейтроника, связные расчеты, модель, верификация, кипение натрия, переходной режим, расхолаживание, тяжелая авария, реактор.

Связные расчёты по коду COREMELT2D, состоящего из 2D модуля многокомпонентной в *r-z* геометрии и диффузионного нейтронно-физического модуляRADAR3D, показали возможность расхолаживания реактора типа БН-1200 в условиях тяжёлой запроектной аварии ULOF, в которой постулируется отказ не только аварийной защиты, но и всех ПАЗ. Аналогичные результаты получены для тестовой модели реактора мощностью 1500 МВт конструктивно похожей на реактор БН-1200 по кодам SIMMER-III (EDF, Франция) и COREMELT2D (ФЭИ, Россия). Расчеты показывают, что в течение продолжительного времени реализуется режим устойчивого кипения натрия без плавления активной зоны.

С точки зрения теплогидравлики в расчётах активная зона моделировалась в r-z геометрии, ТВС представлялись кольцами, включающими в себя от двух до десятков ТВС, отличающихся мощностью и местоположением. Такая модель снижает точность описания энерговыделения и искажает реальную картину течения теплоносителя в верхней камере на выходе из активной зоны, особенно в условиях кипения натрия для больших реакторов типа БН-1200.

Для устранения указанных недостатков разрабатывается трёхмерная версия кода COREMELT3D, предназначенная для связных расчетов нейтронно-физических и теплогидравлических нестационарных процессов в быстром реакторе с учётом кипения натрия. Код включает:

− 3D модуль двухфазной теплогидравлики в *r*−*z*−φ или *x*−*y*−*z* геометрии;

– два 3D нейтронно-физических модуля: диффузионный RADAR3D и новый транспортный модуль LUCKY.

Планируется включение в состав кода модуля термомеханики твэл на основе кода ДРАКОН, а также соединение с кодами РОПАС и АЛФА-М, моделирующими распространения радиоактивных продуктов в первом контуре и по помещениям атомной станции.

Предполагаемая область применения кода – это аварии с кипением теплоносителя, с попаданием в активную зону инородных веществ (масла, газа); переходные режимы, приводящие к несимметричной работе петель теплообмена и появлению азимутальной несимметрии в температурных полях активной зоны, к изменению подогрева теплоносителя в активной зоне реактора, связанные с перемещением органов СУЗ (определение локальных изменений температур в окрестностях органов СУЗ), а также режимы расхолаживания реактора.

Для верификации 3D версии теплогидравлики используется верификационная матрица экспериментов по кипению натрия двухмерной версии кода COREMELT2D. В настоящее время выполнены расчёты экспериментов:

- стационарное кипение в трубе (JRC Ispra, Италия);

- нестационарное кипение в 37-стержневом пучке (KNS-37, Германия).

Разработана тестовая трёхмерная модель реактора мощностью 1500 МВт для кросс-верификации с кодом SIMMER-Ш.

Моделирование теплообмена при продольном течении в пучках труб с искусственной шероховатостью

Душенков С. Б., Прокопьев А. Ю.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Prokopyev_AY@nrcki.ru

Ключевые слова: интенсификация теплообмена, шероховатая поверхность, коэффициент теплоотдачи, верификация, трубный пучок, продольное обтекание, поперечное оребрение, искусственная шероховатость.

Цель исследования – определение параметров теплообмена при продольном обтекании пучка труб с интенсификаторами в виде шероховатых поверхностей.

Верификация расчетной методики выполнена по экспериментальным данным, полученным при течении воды в кольцевых и прямоугольных каналах с искусственной шероховатостью.

Исследовано влияние изменения температуры воды на входе, шага, высоты, ширины и различных видов форм элементов шероховатости на теплообмен и необратимые потери давления при обтекании пучка труб с шахматным расположением.

Показано, что разная форма и шаг между элементами шероховатости с точки зрения теплообмена оптимальны для разных режимов течения теплоносителя. Так, при Re > 2000 целесообразно использование элементов шероховатости с более плотным шагом, при малых скоростях теплообмен лучше при более разряженном расположении элементов. При Re > 2500 поверхность с ребрами в виде шипов в форме ромба обладает наилучшей теплопередающей способностью.

Результаты работы могут быть использованы при расчетах теплогидравлических процессов в теплообменном оборудовании.

134

О возможности совместного применения матричного метода и аппарата обобщенных степеней Берса для математического моделирования процесса теплопереноса в объектах, обладающих цилиндрической симметрией

Гладышев Ю. А.¹, Калманович В. В.¹, Серегина Е. В.², Степович М. А.¹

1 – Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, г. Калуга;

2 – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, г. Калуга, v572264@yandex.ru

Ключевые слова: математическое моделирование, матричный метод, обобщенные степени Берса, тепломассоперенос, цилиндрическая симметрия.

Ранее для математического моделирования явлений тепломассопереноса в однородной или многослойной среде нами предложено использовать так называемая модель независимых источников, в которой искомое распределение диффундирующего вещества или тепла в объёме материала находится как суперпозиция от точечных источников, имеющихся в каждом микрообъеме конденсированного вещества. Математически это отвечает наличию в правой части дифференциального уравнения тепломассопереноса дельта-функции. Интегрирование полученных распределений от каждого из микрообъёмов позволяет найти искомое распределение диффундирующего вещества или тепла в объёме материала. Расчеты проводились как для однородного материала, так и для двух- и трехслойных планарных полупроводниковых структур. Однако на практике количество слоев может быть существенно больше, к тому же их параметры могут иметь различные значения в различных точках материала, а для ряда задач необходимо проведение подобных расчётов для объектов с иной геометрической структурой. Ранее показано, что для математического моделирования явлений тепломассопереноса в многослойной планарной среде с произвольным числом слоёв может быть использован разработанный нами матричный метод, использующий аппарат обобщенных степеней Берса. В настоящей работе рассмотрены некоторые возможности совместного применения матричного метода и аппарата обобщенных степеней Берса для математического моделирования процесса теплопереноса для трехмерных осесимметричных задач. Одними из таких объектов для приложений разработанного метода являются тепловыделяющие элементы активной зоны ядерного реактора.

Для моделирования процесса теплопереноса в объектах, обладающих цилиндрической симметрией, предлагается использовать матричный метод, сводящийся к последовательному умножению функциональных матриц, компоненты которых в каждой точке определяются физическими и геометрическими параметрами текущего слоя. Общность использования метода достигается применением аппарата обобщенных степеней Берса. Полученные результаты показали, что такой подход может позволить сравнительно несложно проводить расчёты в случае объектов, обладающих цилиндрической симметрией, в т. ч. и при наличии зависимостей параметров материалов от координат. Возможности использования такого подхода для аналитического построения решений для неоднородного стационарного уравнения задачи тепломассопереноса рассмотрены нами для решения задачи Коши и первой краевой задачи. Этот же подход можно использовать и для построения решений нестационарной задачи тепломассопереноса в многослойной неоднородной среде методом Фурье.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-03-00515).

Подходы для моделирования тяжелых аварий в реакторных установках на быстрых нейтронах в модуле SAFR/V1 кода ЕВКЛИД/V2

Чухно В. И.¹, Усов Э. В.¹, Бутов А. А.¹, Прибатурин Н. А.¹, Мосунова Н. А.²

 Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН Новосибирский филиал, г. Новосибирск, cool.proff@gmail.com

2 – Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, г. Москва

Ключевые слова: реакторная установка на быстрых нейтронах, жидкометаллический теплоноситель, тяжелая авария, твэл, перемещение расплава, унос расплава, осаждение расплава, поле температур, интенсивность теплообмена, изменение проходного сечения канала.

При разработке проектов реакторных установок, одним из наиболее важных этапов, является обоснование их безопасности. Ввиду сложности проведения экспериментов на реальных реакторных установках единственным подходом остается численное моделирование процессов, протекающий во время аварии. По этой причине для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями актуальным является разработка интегральных кодов нового поколения. Одним из таких кодов является созданный в ИБРАЭ РАН код ЕВКЛИД/V2.

Текущая версия кода ЕВКЛИД/V2 позволяет моделировать поведение реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями в стационарных и переходных режимах работы, а также при различных проектных авариях, путем проведения связанных нейтронно-физических, термомеханических и теплогидравлических расчётов. Стоит отметить, что модульная структура ЕВКЛИД/V2 позволяет увеличивать количество независимых модулей, что расширяет спектр моделируемых процессов и явлений.

При моделировании тяжелой аварии в составе кода EBKЛИД/V2 взаимодействуют термомеханический модуль БЕРКУТ, тяжелоаварийный модуль SAFR/V1 и теплогидравлический модуль HYDRA-IBRAE/LM, а также нейтронно-физический модуль DN3D. Расчетные сетки каждого из модулей согласованы друг с другом, что позволяет реализовать механизм обмена между модулями, в рамках интерфейсных возможностей кода EBKЛИД/V2.

На начальном этапе развития тяжелой аварии, тепловая задача рассчитывается термомеханическим модулем БЕРКУТ. На каждом расчетном шаге модуль БЕРКУТ обменивается данными с теплогидравлическим модулем HYDRA-IBRAE/LM. Модуль БЕРКУТ передает в HYDRA-IBRAE/LM данные о температурах поверхности твэлов. Теплогидравлический кодHYDRA-IBRAE/LMпередает в БЕРКУТ данные о температуре теплоносителя и коэффициенте теплообмена, между теплоносителем и стенками твэлов. При начале плавления активной зоны, модуль БЕРКУТ передает информацию о состоянии твэлов в тяжелоаварийный модуль SAFR/V1 и дальнейший расчет производится модулем SAFR/V1.

Модуль SAFR/V1 позволяет рассчитывать плавление твэла и застывание образовавшегося расплава, а также перемещения расплава по поверхности тепловыделяющего элемента. Перемещение расплава моделируется в одномерной постановке. Рассматриваются режимы стекания: пленочное и сплошное стекание. Учитывается тепловое и механическое взаимодействие с теплоносителем, информация о котором поступает из кода HYDRA-IBRAE/LM. На каждом расчетном шаге модуль SAFR/V1 передает в HYDRA-IBRAE/LM данные о температуре стенки твэла, данные о скорости и толщине пленки расплава, а также информацию о доле расплава, которая уносится с поверхности твэла в поток теплоносителя. На основе полученных данных HYDRA-IBRAE/LM рассчитывает изменение проходного сечения гидравлического канала и изменение скорости теплоносителя. Далее модуль HYDRA-IBRAE/LM возвращает в SAFR/V1 данные о коэффициентах теплообмена и трения между стенкой твэла и потоком теплоносителя, скорости и температуре теплоносителя, а также данные о доле расплава в теплоносителе.

В результате уноса расплава с поверхности твэла, часть расплава остается в потоке теплоносителя. Дальнейшее перемещение расплава в потоке теплоносителя и теплообмен расплава с теплоносителем моделируется с помощью уравнений многокомпонентной модели, реализованной в модуле HYDRA-IBRAE/LM. В результате движения расплава в потоке теплоносителя, часть расплава может осаждаться на твэлах, пэлах и чехлах TBC, приводя к их дальнейшему разрушению.

Расчёт экспериментов по плавлению топлива из диоксида урана кодом ЕВКЛИД/V2 с модулем SAFR/V1

Бутов А. А., Климонов И. А., Кудашов И. Г., Прибатурин Н. А., Усов Э. В., Чухно В. И.

ФГБУН ИБРАЭ РАН Новосибирский филиал, г. Новосибирск, ilya.klimonov@gmail.com

Ключевые слова: EBKЛИД/V2, SAFR/V1, Direct Electrical Heating, High-Ramp-Rate experiments, Annular Core Research Reactor.

Для обоснования безопасности перспективных установок с жидкометаллическим теплоносителем требуется система расчётных кодов, позволяющая моделировать реакторное оборудование и установку в комплексе, например, моделирование тяжелых запроектных аварий типа ULOF и UTOP, возникающих при отказе защитных систем и протекающих с плавлением оборудования активной зоны.

В рамках частного проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» в ИБРАЭ РАН разрабатывается код SAFR/V1, который входит в состав универсального интегрального кода ЕВКЛИД/V2 и позволяет рассчитывать разрушение одиночного твэла, вследствие его плавления в активной зоне и перемещение образовавшегося расплава оболочки и топлива под действием сил тяжести, сил трения с газовым потоком и трения со стенкой.

В рамках верификации кода проведены расчёты экспериментов, проводимые на экспериментальной установке «Direct Electrical Heating» (DEH) в Аргонской национальной лаборатории и эксперименты с быстрым ростом энергии «High-Ramp-Rate experiments» (HRRE) на исследовательском реакторе «Annular Core Research Reactor» в национальной лаборатории Сэндиа.

В эксперименте на установке DEH стержень из таблеток с диоксидом урана зафиксирован между двумя электродами. Обогрев таблеток осуществлялся электрическим током. Зона обогрева была ограничена чехлом из кварцевого стекла, в зазоре между стеклом и таблетками для охлаждения поверхности таблеток продувался гелий. В экспериментах измерялось количество расплавленного вещества таблеток.

В эксперименте с быстрым ростом энергии HRRE использовался стержень из пяти таблеток с диоксидом урана. Стержень был закреплён сверху и снизу обеднённым диоксидом урана и находился в контейнере с газом и зеркалами, которые передавали изображение стержня через окно из расплавленного кварца в верхней части контейнера. Сам контейнер во время эксперимента находился в исследовательском реакторе. В эксперименте измерялась температура поверхности топлива при повышении мощности реактора.

Были проведены расчёты указанных выше экспериментов с использованием кода ЕВКЛИД/V2 в составе модуля SAFR/V1. Получено хорошее совпадение расчёта с экспериментальными данными. Для эксперимента на установке DEH погрешность определения доли расплава составила 5 %, а погрешность определения времени наступления плавления составила 0,2 секунды. Для эксперимента HRR средняя погрешность определения температуры составила 38,9 К.

Расчетное исследование вибрации труб экспериментальной модели прямоточного парогенератора с использованием CFD-кода

Носенко А. П., Волков В. Ю., Скибин А. П., Макаров В. В., Афанасьев А. В.

ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, makarov@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: АЭС, парогенератор, трубный пучок, теплообменные трубы, течь, резонансная вибрация, вибропрочность, баффтинг, вихревое возбуждение, гидроупругая нестабильность, расчетные методы, CFD-модель.

Парогенератор является одним из наиболее ответственных элементов АЭС, от надежности которого зависит безаварийная работа станций. Одним из наиболее важных составляющих парогенератора является трубный пучок, так как теплообменная труба является естественной границей между контурами ЯЭУ. Выход из строя теплообменных труб является основной причиной течей теплоносителя. Течи ведут к выход у радиоактивности во второй контур (реакторы BBЭР, PWR и др.) или приводят к возникновению химической реакции между водой и натрием.

Одной из основных причин выхода из строя теплообменных труб является повышенная вибрация, приводящая к их износу в узлах контакта с дистанционирующими решетками или многоцикловое усталостное разрушение теплообменных труб. При этом вибрация обусловлена совместным влиянием большого количества физических процессов. Наиболее значимыми факторами среди них являются пространственное распределение жидкости в межтрубном пространстве, а также механизм возбуждения, реализуемый в данном диапазоне параметров.

Для оценки вибропрочности трубного пучка необходимо определение частот и амплитуд колебаний теплообменных труб. Наиболее опасными с точки зрения возникновения резонансной вибрации являются участки теплообменных труб, где максимальна поперечная компонента скорости теплоносителя. Такие участки, как правило, и будут определять вибропрочность всего трубного пучка парогенератора.

Для обеспечения вибропрочности теплообменных труб современных парогенераторов на стадии проектирования необходима оптимизация конструкции трубного пучка, а также входной зоны ПГ с оценкой максимальных уровней вибрации теплообменных труб. Задача определения наиболее опасных амплитуд и частот колебаний может быть решена либо при помощи проведения экспериментальных исследований различных вариантов конструкций парогенератора, либо путем расчетных исследований. Одним из главных недостатков экспериментального метода является необходимость создания нескольких экспериментальных моделей с соблюдением геометрического подобия штатному парогенератору, а также большого объема экспериментальных исследований этих моделей. Поэтому, для оптимизации конструкции трубного пучка, целесообразно применять расчетные методы определения вибрационных характеристик теплообменных труб.

При поперечном обтекании в межтрубном пространстве теплообменных труб выделяют несколько основных механизмов возбуждения вибраций: баффтинг, вихревое возбуждение и гидроупругая нестабильность. Большинство существующих теоретических и аналитических моделей хорошо описывают только один из механизмов возбуждения колебаний, а также зачастую не учитывают пространственный характер течения жидкости в межтрубном пространстве парогенераторов. Разработка новой методологии и математической модели колебаний с использованием CFD может решить эту проблему. В данной работе рассмотрены результаты применения разработанной численной модели для расчета вибрации имитаторов теплообменных труб модели прямоточного парогенератора. Результаты, полученные при помощи модели, сравниваются с экспериментальными данными.

Математическая модель вибрации теплообменных труб в поперечном потоке жидкости включает в себя CFD модель движения жидкости в межтрубном пространстве, а также аналитическую модель колебаний теплообменных труб в поперечном потоке жидкости. В ходе работы, была разработана CFD-модель проточной части модели прямоточного парогенератора со всеми геометрическими особенностями данной модели. Теплоносителем являлась вода с постоянными свойствами. Общая размерность расчетной области CFD-моделирования составила примерно 170 млн ячеек. В результате CFD расчета получены трехмерные поля скоростей и давления.

На основе CFD модели была построена упрощенная пространственная сеточная модель проточной части экспериментального стенда. Разбиение данной упрощенной сеточной модели соответствует разбиению аналитической модели колебания теплообменных труб. Результаты CFD расчета усреднялись по каждому элементу данной модели. Полученные пространственные распределения интегральных параметров течения среды передавались в расчетный модуль колебаний теплообменных труб. При помощи аналитической модели колебаний, оценивались частоты и среднеквадратические значения перемещений середин пролетов между местами закрепления теплообменных труб.

Анализ чувствительности при моделировании TA на РУ с BBЭP-1000 с применением PK COKPAT/B1

Астахов В. В., Гаспаров Д. Л., Николаева А. В., Пантюшин С. И., Литышев А. В., Букин Н. В., Быков М. А.

ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, makarov@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: анализ чувствительности, СОКРАТ/В1, ВВЭР, тяжелая авария, Спирман, Кендалл.

Задача обеспечения и обоснования надежности и безопасности атомных станций и других потенциально опасных объектов ядерно-энергетического комплекса является определяющей перспективой развития атомной энергетики в России, а также в рамках международного взаимодействия. Современные требования Ростехнадзора и зарубежных заказчиков к выполнению анализов тяжелых аварий (TA) для представления результатов в ООБ с РУ ВВЭР предусматривают использование программных средств (ПС), методик и расчетных моделей и схем, удовлетворяющих ряду условий с целью обоснования возможности их при обосновании безопасности в рассматриваемой области применения. Введение новых требований к результатам обоснования безопасности уксплуатируемых и проектируемых АЭС с РУ ВВЭР требует модернизации старых и разработки новых ПС, создания новых и улучшения используемых расчетных схем, усложнения и расширения области применимости используемых физических моделей, проведения дополнительных исследований и развития расчетных методик в областях, которые прежде не были рассмотрены.

В работе представлены методика оценки и анализ результатов исследования чувствительности расчетной схемы к изменению исходных данных расчетной схемы в ходе тяжелой аварии на АЭС с РУ ВВЭР с применением кода улучшенной оценки СОКРАТ/В1. Представленный метод основан на методиках GRS.

В настоящей работе было проведено 100 вариантных расчетов сценария ТА, что соответствует величине достоверности 95% в доверительном интервале 95%. Оценка чувствительности расчетной схемы была проведена статистическим методом на основе проведения вариационных расчетов и последующим вычислением значений коэффициентов корреляции Спирмана и Кендалла. Обработка результатов моделирования выполняется с применением инженерной методики статистической обработки результатов многовариантных расчетов.

В результате расчета были получены зависимости восьми теплогидравлических параметров в РУ, характер которых наиболее часто анализируется в рамках выполнения расчетов по обоснованию безопасности для 100 вариантов различных сочетаний 37 входных параметров модели.

В качестве ключевых параметров расчета рассматриваются: время разрушения днища корпуса реактора и начала выхода расплава и твердых фрагментов из корпуса реактора, давление на выходе из реактора на момент разрушения корпуса реактора, масса расплава и обломков, вышедших из корпуса реактора, температура расплава активной зоны, на момент окончания его выхода из корпуса реактора, степень окисления циркония на момент окончания выхода расплава из корпуса реактора, масса воды и пара, выброшенная из первого контура за время протекания ТА, время окончания выхода расплава и твердых фрагментов из корпуса реактора.

Расчет гидродинамики струйно-вихревого конденсатора системы локализации аварии

Казанцев А. А., Сергеев Вл. В.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>akazancev@ippe.ru</u>

Ключевые слова: ВВЭР-440, система локализации аварий, разрыв первого контура, струйновихревой конденсатор, закрученный поток, аналитическое решение.

Струйно-вихревой конденсатор системы локализации аварии предназначен для обеспечения герметичности гидрозатвора между боксами парогенераторов и атмосферой при проектных авариях с течами теплоносителя. Модель трансформации вихря, предложенная Митрофановой О.В., использовалась для получения аналитического решения, описывающего профили скорости и формы свободной поверхности воды гидрозатвора. Решение основано на системе уравнений сохранения: массы, энергии, импульса, момента импульса, уравнении сохранения потока вихря для вращательнопоступательного течения в вихревой камере. Форма свободной поверхности воды имеет внутреннюю и внешнюю области по радиусу для закрученного течения с вихрем Ренкина. Внутренняя часть имеет свободную поверхность в виде параболического профиля. В области от середины радиуса до внешней стенки вихревой камеры профиль поверхности уплощается. Эта область является зоной квазипотенциального течения. Плоская периферийная поверхность обеспечивает сохранение воды в гидрозатворе при прохождении пиков давления и предотвращает потерю герметичности гермозоны ВВЭР-440 при максимальной проектной аварии.

Верификация модели струйно-вихревого конденсатора системы локализации аварии в коде КУПОЛ-М

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

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

Ключевые слова: ВВЭР-440, система локализации аварий, разрыв первого контура, струйновихревой конденсатор, код КУПОЛ-М.

Код КУПОЛ-М предназначен для расчета параметров среды в системе взаимосвязанных помещений, преимущественно внутри защитных оболочек, и систем герметичного ограждения при различных условиях на АЭС с ВВЭР.

Струйно-вихревой конденсатор (СВК) является элементом системы локализации аварии (СЛА) на АЭС с ВВЭР-440, предназначенным для снижения давления в системе локализации аварии при разрыве первого (второго) контура на АЭС с ВВЭР-440 (В-230,179).

С 1995 по 2001 гг. во ВНИИАЭС были проведены экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик СВК. Цель исследований заключалась в доказательстве работоспособности струйно-вихревого конденсатора при нагрузках, характерных для различного типа аварий, включая аварию с разрывом главного циркуляционного трубопровода максимального диаметра (Ду 500) и двухсторонним истечением теплоносителя обеспечить непревышение проектного предела давления в помещениях СЛА. Экспериментальные данные, полученные на стенде ВНИИАЭС, были использованы для проведения верификации модели СВК в составе кода КУПОЛ-М.

Основным требованием, предъявляемым к СВК как элементу СЛА: обеспечение избыточного давления в боксе парогенератора ниже 0,1 МПа при аварии с гильотинным разрывом Ду500 и двусторонним истечением, соответственно, абсолютное давление обеспечивается ниже 0,2 МПа.

Верификация модели СВК в составе кода КУПОЛ-М проведена на экспериментальных данных, полученных на стенде ВНИАЭС. При численном моделировании экспериментов получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений максимального давления в баке-имитаторе бокса ПГ.

Тестирование CFD-модели кипения на экспериментальной модели прямоточного ПГ с закруткой потока

Сергеев Вл. В., Дьяченко Я. В.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>yakochkareva@ippe.ru</u>

Ключевые слова: CFD код, моделирование, коды расчетной гидродинамики, закрутка потока, кипение, кризис теплообмена при кипении.

С развитием расчетной трехмерной гидродинамики двухфазных потоков в виде CFD кодов и электронной техники появилась возможность относительно «прямого» моделирования тепло-гидродинамики в парогенерирующих каналах прямоточных паропроизводящих установках (парогенераторах) с нестандартными решениями, включая интенсификацию теплообмена за счет закрутки потока в обогреваемых трубах.

В докладе авторами протестирована 3D-2D нестационарная численная модель кипения жидкости при течении в обогреваемых каналах с переходом через кризис 2 рода на примере CFD кода ANSYS-Fluent.Рассмотрены недостатки и преимущества трехмерных моделей по сравнению с одномерными моделями кипения в отраслевых контурных кодах: RELAP, TRACE, КОРСАР.

В основе модель кипения в Fluent повторяет подход в отмеченных отраслевых двухфазных кодах. В пузырьковом режиме жидкость и пар рассматривается непрерывно распределенными в объеме, но пар представлен в виде дискретной фазы с заданным извне диаметром пузырька. Математически задача описывается б уравнениями сохранения массы, импульса и энергии для каждой фазы. Соответственно учитывается силовое и энергетическое взаимодействие каждой фазы со стенкой и межфазное взаимодействие. В отличие от отраслевых кодов уравнения импульса записаны для вязких фаз с учетом турбулентности.

Межфазное силовое взаимодействие в направлении потока описывается по модели сопротивления сферического пузырька пара в потоке жидкости. Данная модель (drag-force) в Fluent аналогична RELAP. Новизна модели Fluent состоит в описании поперечных потоку межфазных сил (без чего не может быть создана пространственная модель кипения). Иными словами, необходим механизм сноса пузырьков пара от парогенерирующей стенки в ядро потока.

Для этой цели в модели Fluent используются несколько сил, основные из которых – турбулентная диффузия пара в поперечном потоку направлении (дословно «турбулентная дисперсия») и подъемная сила Жуковского (liftforce). Турбулентная диффузия пропорциональна кинетической энергии турбулентности (рассчитываемой в коде по RANS моделям турбулентности) и поперечному градиенту объемного локального паросодержания. Сила Жуковского «работает» только в пограничном слое (большой градиент осевой скорости несущей фазы – жидкости) и выносит пузырьки пара на внешнюю границу пограничного слоя. Обе эти модели – полуэмпирические и требуют задания соответствующих констант. В этой связи естественно, что большинство публикаций посвящено верификации рассматриваемой модели кипения на опытных данных по поперечным профилям объемного паросодержания и скоростей фаз в пузырьковой области.

Однако, для задач энергетики наиболее важны вопросы моделирования режимов с высоким паросодержанием и кризисом кипения при осушении (2 рода). Кризис 1 рода в докладе не рассматривается. Очевидно, что в рамках рассматриваемой двухжидкостной модели невозможно смоделировать тонкую структуру предкризисного дисперсно-
кольцевого режима с наличием пленки жидкости у стенки, равномерно распределенного в ядре потока пара и капель жидкости. То есть граничное объемное паросодержание, соответствующее кризису кипения, необходимо определить извне.

Новаторское решение в модели Fluent состоит в определении сечения кризиса 2 рода не по среднему паросодержанию (как это используется в отраслевых одномерных кодах), а, по локальному объемному паросодержанию у обогреваемой стенки. То есть кризис достигается в сечении канала, где локальное паросодержание у стенки достигает некоторого заданного граничного значения. Эта величина в Fluent задана константой, равной 0,95 без возможности корректировки на уровне пользователя.

В докладе показано, что эта граничная величина для вертикальных труб является функцией давления и массовой скорости (так же, как и массовое расходное граничное паросодержание). Только в диапазоне давления около 70 бар и массовой скорости 1500 кг/м²·с граничное объемное паросодержание соответствует принятой в коде уставке 0,95. Этот недостаток модели может быть устранен в последующих версиях кода.

Наибольшую ценность представляет отмеченный «CFD подход» определения граничного паросодержания. Воздействуя на поперечный профиль паросодержания за счет внешних массовых сил представляется возможным в рамках данной модели смещать положение кризиса вверх или вниз по потоку. Например, закруткой потока в вертикальных трубах (внутреннее винтовое оребрение) или за счет наклона ПГ-трубки (плоский змеевик).

В докладе, на примерах тестовых расчетов в коде Fluentпоказано расчетное смещение положения кризиса 2 рода в вертикальных ПГ-трубах за счет закрутки потока до массового паросодержания 0,8 с значения 0,57 без закрутки при давлении 70 бар и массовой скорости 1500 кг/м² с. Полученные результаты согласуются с результатами экспериментов ГНЦ РФ – ФЭИ на электрообогреваемых и обогреваемых натрием моделях прямоточных парогенерирующих каналов.

Продемонстрирован также эффект появления «двойного» кризиса в наклонных каналах.

Для более полного представления о возможности моделирования подобных каналов в отраслевых и международных контурных кодах представлены результаты полного расчета трубки ПГ натрий-вода по отраслевому коду КОРСАР с закруткой потока и без методом смещения базовой скелетной таблицы кризиса кипения на заданную величину («не прямой» расчет). Таким образом, показано, что возможности отраслевых кодов для проектных расчетов в данном направлении не исчерпаны.

Практически важный вопрос при моделировании кипения в каналах на основе CFD моделей – затраты машинного времени и требуемые ресурсы. 3DCFD моделирование требует подробных расчетных сеток (одного канала) размером от 10⁵ ячеек и, следовательно, больших вычислительных ресурсов. При расчете стационарного режима кипения методом установления даже по неявной схеме в коде Fluent предельный расчетный временной шаг по Куранту ограничен 10-20. Кроме того необходимое физическое время при решении задачи для установления баланса расходов пароводяной смеси на входе и выходе составляет 8-10 периодов циркуляции теплоносителя через расчетный канал. В итоге в отраслевых двухфазных кодах расчет ПГ-канала занимает минуты машинного времени (шаг по Куранту всегда не более 1), 3D расчет в CFD коде – часы даже при распараллеливании расчетного алгоритма на 8-24 сопроцессоров.

Уточнение параметров интегральной модели турбулентности для случая углового обтекания регулярной стержневой структуры

Мищенко А. А., Баясхаланов М. В., Корсун А. С., Меринов И. Г., Филиппов М. Ф.

НИЯУ «МИФИ», г. Москва, fyl2323@yandex.ru

Ключевые слова: жидкометаллический теплоноситель, интегральная модель турбулентности, модель пористого тела, пучок стержней, регулярная структура, расчётное исследование, угловое обтекание.

Для замыкания осредненных уравнений тепломассопереноса в ориентированных стержневых структурах в приближении анизотропного пористого тела необходимы эффективные коэффициенты переноса импульса и тепла. Данные коэффициенты могут быть выражены посредством эффективной турбулентной вязкости потока теплоносителя, которая в свою очередь может быть определена с помощью ИМТ.

Уравнения ИМТ были получены путем осреднения уравнений стандартной «*k*–*ɛ*» модели турбулентности. Осреднение производилось по объему ячейки периодичности структуры сборки стержней. Входящие в эти уравнения эффективные коэффициенты переноса энергии турбулентности и скорости ее диссипации и члены, описывающие порождение турбулентности, оказываются функциями геометрических параметров стержневой структуры и условий ее обтекания:

$$\mathbf{v}_t^{\mathrm{gr}} = C_{\mathrm{v}} k^2 / \varepsilon. \tag{1}$$

В ИМТ коэффициента пропорциональности C_v в выражении, связывающем эффективную турбулентную вязкость потока теплоносителя v_t^{sv} с кинетической энергией турбулентности k и скоростью ее диссипации є определяется из формулы (1) по осредненным по ячейке периодичности структуры значениям кинетической энергии турбулентности, скорости ее диссипации и величине коэффициента кинематической турбулентной вязкости, полученным в ходе CFD моделирования стационарного обтекания сборки с помощью кода ANSYSCFX.

В ходе выполнения данной работы исследовалось обтекание потоком воды комнатной температуры стержневых сборок с квадратной и треугольной упаковкой в диапазоне относительных шагов 1,14 – 1,5 и углов обтекания от 15 до 75 градусов при значениях чисел Рейнольдса 6700 – 150000.

Для каждого из рассмотренных режимов обтекания сборки были получены стационарные распределения скоростей, давления, кинетической энергии турбулентных пульсаций, скорости ее диссипации и величины кинематической турбулентной вязкости. Полученные при последующем осреднении по ячейке периодичности структуры средние значения кинетической энергии турбулентности, скорости ее диссипации и коэффициента кинематической турбулентной вязкости были использованы для определения из формулы (1) коэффициента C_{ν} .

Для проверки и корректировки зависимости расчетные значения коэффициента C_v были представлены в виде $C_v = C_v^{calc} \cdot f(\beta)$, где C_v^{calc} – значение коэффициента, полученное по формуле теоретически полученной зависимости, а $f(\beta)$ – некоторая корректирующая функция величины β , значения которой для предельных случаев при $\beta = 0$ и 1 должны равняться 1.

С учетом вышеупомянутых требований к свойствам, функция $f(\beta)$ была описана полиномом второй степени.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10548).

Моделирование с помощью CFD-кода поля температуры теплоносителя в головках TBC АЭС-2006 и BBЭР-1000

Бугаева В. А., Олексюк Д. А., Киреева Д. Р.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Мосвка, Bugaeva_va@nrcki.ru

Ключевые слова: CFD-расчет, реактор, инструментальный канал, активная зона, головка TBC, температура теплоносителя.

В реакторах ВВЭР-1000 и АЭС-2006 используются базовые конструкции кассет современного поколения ТВС-2М и ТВС АЭС-2006 соответственно. ТВС-2М в эксплуатации с 2006 года, на её основе создаются усовершенствованные кассеты для новых проектов. Она же является прототипом для ТВС АЭС-2006.

В некоторых элементах конструкция ТВС АЭС-2006 отличается от ТВС-2М. Одним из важных отличий является быстросъемная головка ТВС АЭС-2006. В этой головке инструментальный канал для КНИТ перемещён из центра ТВС в ячейку, расположенную между рядами направляющих каналов, и установлен твэл в центральную ячейку.

В работе представлен расчёт параметров теплоносителя в головках ТВС реакторов АЭС-2006 и ВВЭР-1000, полученных с помощью ячейкового кода SC-1 и трехмерного CFD-кода STAR-CCM+.

Моделируемая область для каждого типа головки состоит из верхней (цилиндрической) обечайки, демпфирующей плиты, пружинного блока, нижней обечайки, цанг и элементов, связывающих сборочные единицы головки в единую конструкцию, а также части ТВС расположенной сразу после окончания твэлов.

При моделировании течения в головках кассет была использована RANS модель турбулентности. В качестве граничных условий были использованы поля скорости и температуры теплоносителя на выходе из пучка твэлов, полученные с помощью ячей-кового кода SC-1. Эти данные передавались в программу STAR-CCM+.

В результате расчётов были получены значения скорости и температуры на выходе из головки ТВС, в области перфорации инструментального канала ТВС обоих типов реакторов, а также оценки отклонений от среднесмешанной температуры на выходе из ТВС показаний термопар СВРД (АЭС 2006) и показаний штатной термопары (ВВЭР-1000).

Численное моделирование горения натрия при аварийных проливах в помещениях РУ БН-1200

Поваренский Р. Б., Капица Д. В.

АО «Атомпроект», г. Санкт-Петербург, RBPovarenskiy@atomproekt.com

Ключевые слова: теплоноситель, температура, давление, авария, течь, натриевый пожар, горение натрия, численный анализ, расчет опасных факторов.

Опасность использования натрия в качестве теплоносителя заключается в его возможности самовоспламенения. Подобные «аварии» случаются в основном из-за разгерметизации натриевого оборудования, при котором в зависимости от размера дефекта меняется и характер течи. При проектировании помещения основными направлениями технических решений является защита строительных конструкций от недопустимого температурного воздействия, а также сохранение работоспособности элементов вентиляционного оборудования при горении натрия.

Цель доклада заключается в численном анализе последствий натриевого пожара и оценке эффективности технических решений, применяемых для снижения ущерба помещению. Для этого, автором доклада произведен расчет опасных факторов пожара с использованием открытого расчетного кода FDS 6 (Fire Dynamics Simulator версии 6). В рассматриваемых сценариях сравниваются две вариации системы пожаротушения, проектная на основе поддонов с гидрозатвором и альтернативная – сливная система.

Расчетная модель включает в себя трехмерную модель помещения, модели стен, состоящие из слоев облицовки, теплоизоляции и бетона, модель вентиляции, модели систем пожаротушения.

Доклад содержит результаты расчёта опасных факторов горения натрия в помещениях РУ БН-1200 для различных типов течей, применяемого оборудования и мер обеспечения пожарной безопасности. Результаты представлены в виде временных зависимостей давления и температуры газовой среды, температуры теплоизоляции, бетона и облицовки строительных ограждений, расход вентиляции, масса вылетевших продуктов сгорания. По результатам исследований сделаны оценочные выводы о возможности применения рассмотренных вариантов технических решений в составе системы натриевого пожаротушения для локализации и подавления горения натрия в технологических помещениях.

Применение численного эксперимента для определения критической скорости обтекания из анализа условия устойчивости многокомпонентной системы труб

Каплунов С. М., Вальес Н. Г., Фурсов В. Ю., Самолысов А. В.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, kaplunov@imash.ru

Ключевые слова: срывное обтекание, трубные пучки, механизмы возбуждения потери устойчивости, определение критической скорости, численные методы, метод вязких вихревых доменов.

При проектировании теплообменников возникают задачи определения областей параметров, в которых возможны вызванные турбулентным потоком теплоносителя колебания труб с недопустимо большой амплитудой и оценки интенсивности вибраций труб при различных значениях параметров трубного пучка и потока. Решение этих задач – исходный материал для последующих расчетов по вибронадежности и долговечности работы теплообменного оборудования.

Цель исследования – разработка методики определения недопустимых значений скорости потока и обеспечение безопасности эксплуатации теплообменных аппаратов с трубными пучками в условиях поперечного обтекания.

В работе авторов дается описание математической модели гидроупругого механизма возбуждения трубного пучка, на основе использования которой при проведении численного эксперимента для фрагмента пучка трубок определяется значение критической скорости обтекания из анализа условия устойчивости рассматриваемой многокомпонентной системы.

Доказано, что природа гидроупругого механизма возбуждения колебаний труб требует учета отрывного характера обтекания труб, т.к. без его учета получается выражение для критической скорости, при которой возникает только апериодическая потеря устойчивости. Экспериментально же наблюдается не апериодическая, а колебательная потеря устойчивости с частотой, близкой к собственной групповой частоте отдельной трубки.

После того, как было доказано, что численный эксперимент обеспечивает получение необходимых данных об устойчивости, исходя из известной постановки А.М. Ляпунова в линейной области без привлечения сложного и дорогостоящего физического эксперимента, было решено провести численный эксперимент непосредственно в областях устойчивости и неустойчивости уже в нелинейной области. Для этого были выбраны точки, в которых проводились продолжительные численные эксперименты, демонстрирующие либо устойчивость конструкции, либо они приводили к соударениям соседних труб между собой. Эксперимент проводится методом половинного деления. Подтверждение экспериментальной кривой устойчивости указывает на то, что метод вязких вихревых доменов работает и в области нелинейных колебаний системы, то есть, при потери ею устойчивости.

Разработанный подход к исследованию явления гидроупругого возбуждения трубных пучков и полученные на его основе результаты могут использоваться на стадии проектирования теплообменных аппаратов для определения области параметров, в которой невозможна нормальная эксплуатация данной конструкции. Необходимо отдельно отметить, что численное моделирование позволяет в значительной мере избежать длительных трудоемких и чрезвычайно дорогих опытных исследований на натурных объектах.

Предлагаемые в работе подходы обеспечивают получение необходимых данных без привлечения сложного и дорогостоящего натурного физического эксперимента, ограничиваясь численными исследованиями на основании специально разработанных алгоритмов.

Расчетно-экспериментальное исследование конденсационных гидроударов в трубопроводах реакторных установок

Баисов А. М., Посысаев Д. А.

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, baisov75@gmail.com

Ключевые слова: ядерные реакторы, экспериментальная установка, конденсационный гидроудар, неустойчивость двухфазного потока, схлопывание паровых снарядов, расчетное исследование.

В проектах реакторных установок предусматривается создание сложных трубопроводных систем, используемых как в режимах нормальной эксплуатации, так и в аварийных условиях. При проектировании подобных систем необходимо исключить условия, при которых возможно возникновение конденсационных гидравлических ударов (КГУ), которые возникают в случае, когда изолированный паровой объём оказывается окруженным более холодной жидкостью. Быстрая конденсация и схлопывание парового объёма приводят к резкому ускорению объемов жидкости, окружающих паровой пузырь. При столкновении этих объемов возникает ударная волна, амплитуда которой может в несколько раз превышать номинальное давление в системе, что приводит к повреждению или разрушению оборудования реакторной установки (РУ).

Поэтому для обоснования безопасности отечественных реакторов поколения 3+ (ВВЭР ТОИ, АЭС-2006) пристальное внимание при проектировании было уделено трубопроводам пассивных систем безопасности (ГЕ-1, ГЕ-2, ГЕ-3, СПОТ ПГ), в которых высока вероятность возникновения КГУ при авариях, связанных с потерей теплоносителя. Также потенциально опасными местами возникновения КГУ являются трубопроводы нововведенной системы аварийного газоудаления (САГ) и трубопроводы аварийного впрыска в компенсатор давления (КД), поскольку в них присутствуют участки, в которых возможно взаимодействие пара и жидкости.

Для исследования вероятности возникновения гидроударов в проектируемых трубопроводных системах РУ, в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» была сооружена экспериментальная установка «Гидроудар», позволяющая определить области сочетания параметров сред, в которых возможно возникновение КГУ, и рост давления при их возникновении. В целях расчетного исследования в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН разработана математическая модель КГУ, встроенная в расчетный комплекс КОРСАР/ГП, который используется при обосновании безопасности РУ с ВВЭР.

В данной работе представлены результаты расчетного анализа исследований, по определению условий возникновения КГУ в экспериментальных моделях трубопроводов на установке «Гидроудар» с помощью модуля подпрограммы SLUGGING в расчетном коде КОРСАР/ГП. Также для исключения КГУ были установлены области параметров смешиваемых в моделях трубопроводов РУ сред (насыщенный пар, вода), а также амплитуды давления, возникающих при КГУ.

Исследование влияния профиля потока теплоносителя на прочность прямотрубного теплообменного аппарата

Блохина А. Н., Лякишев С. Л.

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, blohina_an@gmail.com

Ключевые слова: теплообменная труба, парогенератор, натриевый теплоноситель, неравномерность, расчет, поле скоростей, расход теплоносителя, температурное поле, напряженно-деформированное состояние, прочность.

В последнее десятилетие развития атомной энергетики намечается устойчивая тенденция к возрождению реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН). Был пущен и успешно эксплуатируется энергоблок БН-800, продляется срок службы БН-600 и проектируется более мощный энергоблок с парогенератором корпусного типа. Выбор парогенератора корпусного типа в новых энергоблоках БН обусловлен необходимостью снижать массогабаритные характеристики основного оборудования РУ.

Высокий уровень опасности и тяжести последствий разгерметизации теплообменных труб парогенераторов натрий-вода приводит к необходимости проведения расчетных и экспериментальных исследований, направленных на обоснование работоспособности и надежности конструкции парогенератора с точки зрения обеспечения прочности теплообменных труб в течение всего срока службы.

В докладе рассмотрено влияние неравномерности профиля потока теплоносителя, омывающего трубный пучок, на прочность теплообменных труб.

Разработана расчетная модель корпусного прямотрубного парогенератора, содержащая семь теплообменных труб, которые моделируют зоны трубного пучка с разными расходами теплоносителя.

Определены граничные условия по температуре теплообменных труб при неравномерности распределения расхода теплоносителя в продольном сечении трубного пучка, выполнен расчет температурных полей и напряженно-деформированного состояния модели парогенератора.

На основании полученных результатов показан характер влияния неравномерности расхода теплоносителя по сечению трубного пучка на прочность теплообменных труб и предложены меры по снижению напряжений в теплообменных трубах и обеспечению прочности парогенератора.

Расчёт распределений локальных параметров адиабатных двухфазных потоков по коду ANSYS CFX

Корниенко Ю. Н., Степанов О. Е.

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

Ключевые слова: CFD, локальные параметры, двухфазный поток, ВВЭР, гидравлическое сопротивление.

В активных зонах реакторов типа ВВЭР в отдельных, наиболее напряженных ячейках ТВС существуют зоны с поверхностным кипением при номинальных режимах эксплуатации РУ. Результаты моделирования аварийных ситуаций, в том числе с потерей теплоносителя первого контура, показывают интенсивное развитие поверхностного кипения с дальнейшим переходом к объемному, что сопровождается изменениями перепадов давления и расходов теплоносителя в каналах активной зоны.

При расчетах теплогидравлических характеристик ТВС в ячеечном приближении одними из ключевых вопросов являются: определение гидросопротивлений и поля массовых скоростей (расходов) в поперечном сечении сборки, что напрямую влияет на температуру потока и оболочки ТВЭЛ. В частности, в коде ТИГРСП ТВС реактора ВВЭР-1000 разбивается на 660 параллельных ячеек, каждая из которых характеризуется своей геометрией, энерговыделением и расходом теплоносителя.

В настоящей работе выполнена верификация CFD-модели восходящего адиабатного пузырькового потока с применением кода ANSYS CFX по экспериментальным данным. При этом рассмотрены наиболее важные с точки зрения анализа безопасности режимы с аномальным поведением трения на стенке канала.

В коде реализовано представление полей переменных двухфазного неравновесного потока в том числе в эйлеровском континуальном описании каждой из фаз с учётом эффектов их взаимного проникновения в виде 3D четырёхполевой двухжидкостной модели. Её получают, используя временное или статистическое осреднение локальных мгновенных параметров. Эта модель выражается соответствующей системой уравнений законов сохранения, управляющих балансом массы, импульса и энергии в поле течения каждой фазы. Эффекты взаимодействия фаз введены в полевые уравнения с помощью источниковых членов правой части уравнений законов сохранения. Четырёхполевое представление моделей служит для обобщения и расширения списка комбинаций структур двухфазных неравновесных турбулентных потоков: от дисперсных пузырьков пара в недогретом потоке жидкости (кипение с недогревом), до дисперсных капель жидкости в перегретом паре (закризисный теплообмен).

В настоящих исследованиях рассматривались режимы с минимальными скоростями $U_l = 0,22$ (Re = 19000) и $U_l = 0,44$ м/с (Re = 38000) как представляющие наибольший интерес в контексте рассмотрения «аномального» трения.

Тестирование на сеточную сходимость выполнено на трех последовательно уточненых сетках. Размерность начальной сетки составляла: по радиусу из линейного размера 4 мм, что близко к капилярной постоянной $(2\sigma/\Delta\rho/g)^{0.5}$; при длине ячеек 0,1 м близком к гидравлическому диаметру канала. Результаты расчетов мало зависят от размерности сетки, и разброс расчетов сопоставим с погрешностями экспериментальных данных.

Исследовалось влияние размера пузырей на результаты расчетов. Было рассчитано несколько вариантов: с постоянным диаметром $d_b = 1...2$ мм; диаметр вычислялся по средним параметрам потока исходя из критерия Вебера; полидисперсная 30-ти группо-

вая односкоростная модель $d_b = 0...2$ мм. Выявлена существенная зависимость результатов от характерного масштаба межфазного взаимодействия. С уменьшением диаметра пузырей увеличивается пик концентрации газовой фазы у стенки и растет трение на стенке — за счет увеличения локальной скорости двухфазного потока и увеличения турбулентности жидкости у стенки пузырьками газа.

Выполнен расчет относительного трения на стенке в зависимости от газосодержания для режима Re = 19000. Получен резкий подъём (аномальное поведение) гидросопротивления трения начиная с области низких газосодержаний по отношению к корреляции А.А. Арманда в режиме пузырькового течения. Экспериментальное зафиксированный аномальный рост вязких напряжение трения, как и данные CFD-расчетов, превышают прогнозируемые значения по справочным корреляциям.

Результаты трехмерного расчета позволяют получать приемлемые результаты для пузырькового потока в области газосодержаний 0...25 % об. При этом результаты сильно зависят от используемых параметров расчетной модели, в частности – от принятого диаметра пузырьков. Это требует проведения дополнительных верификационных исследований – в том числе с привлечением методик оценки погрешности расчетного кода по международным стандартам, например по стандарту ASME.

Сачок сопротивления трения наиболее выражен при низких скоростях потока, с ростом скорости этот эффект нивелируется. Это подчеркивает актуальность данного явления, прежде всего для аварийных процессов.

Для учета этого, в общем случае, 3D эффекта требуется разработка более совершенных квазиодномерных моделей и введение соответствующих поправок в модули расчёта потерь на трение для одномерных и ячейковых теплогидравлических кодов. Такие рекомендации могут быть определены на основе анализа опытных данных с привлечением CFD-расчётов для расширенного (выходящего за область экспериментальных исследований) диапазона режимных параметров и граничных условий, диктуемых рассматриваемыми вариантами конструкций.

Дальнейшим направлением исследований может быть расширенная верификация CFD-моделей на более широком диапазоне экспериментальных данных с применением многоскоростной полидисперсной модели течения газовой фазы и учётом неизотермичности потока. В перспективе такие исследования являются этапами разработки, валидации и верификации более полных 3D моделей двухфазных неравновесных турбулентных потоков, обеспечивающих более корректное физико-математическое описание, а также снижение консервативности, присущее текущим одномерным кодам, не только для режимов поверхностного и объёмного кипения, но и для условий «закризисного» теплообмена.

Моделирование малой течи на стенде ПСБ-ВВЭР с использованием РК КОРСАР/ГП

Харламова А. А., Щеколдин В. В.

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, kharlamova_aa@smteam.grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: экспериментальная установка, ПСБ-ВВЭР, ВВЭР-1000, РК КОРСАР/ГП, малая течь, анализ подобия.

В случае разгерметизации первого контура, а именно малой течи происходит падение давления, причем до значения, соответствующего давлению насыщения при данной температуре, и последующим образованием большого количества пара. При этом возможно образование кольцевого режима кипения и наступление кризиса теплообмена второго рода, что является опасным с точки зрения безопасности.

В силу того, что практически невозможно и зачастую экономически необоснованно проводить исследование аварийного режима на реакторной установке (РУ), их проводят на экспериментальных стендах. При этом крайне важно, чтобы основные явления и процессы, имеющие место на РУ, протекали на стенде точно также. Только в этом случае можно говорить о возможности экстраполяции результатов эксперимента на РУ. Стоит отметить, что на сегодняшний день процесс экстраполяции остается очень сложным вопросом.

Объектом данного исследования является экспериментальный стенд ПСБ-ВВЭР, прототип которого РУ типа ВВЭР, и эксперимент, проведенный на нем, «Малая течь с отказом системы аварийного охлаждения зоны высокого и низкого давления (САОЗ ВД и НД)». В ходе работы была разработана расчетная модель с использованием расчетного кода (РК) КОРСАР/ГП для расчета исследуемого режима. Реализованная расчетная модель дала хорошее согласие с экспериментальными данными и была использована далее в качестве базовой для проведения экстраполяции результатов эксперимента на РУ. При этом за основу была взята методика, предложенная профессорами М. Ishii и М. Kataoka для стендов РUMA и LOFT. В данной работе был произведен расчет масштаба критерия гомохронности (масштабного фактора по времени), с помощью которого результат эксперимента был смасштабирован. Для обоснования правильности применения методики был произведен расчет аналогичного режима на РУ ВВЭР-1000. В результате, было получено, что результат расчета эксперимента на стенде с помощью величины масштаба критерия гомохронности хорошо описывает поведение РУ. Также для обоснования применимости методики в данном случае был произведен анализ некоторых явлений и процессов, характерных для режима малой течи: естественная циркуляция, расход в течь, скорость разгерметизации и критическое истечение. В ходе анализа было выяснено, что данные явления протекают практически одинаково на обеих установках с точностью до масштаба критерия гомохронности.

Данная работа обладает большой практической значимостью. Она заключается в том, что, во-первых, была продемонстрирована возможность воспроизведения основных явлений, характерных для эксперимента в расчете, во-вторых, была проведена процедура экстраполяции результатов эксперимента на РУ, в-третьих, на основе проведенного расчета исследуемого режима на РУ и результатов экстраполяции было показано, что расчетая модель для стенда правильно описывает основные явления на РУ. Таким образом, результаты данной работы могут быть использованы при выполнении процедуры экстраполяции результатов экспериментов на РУ для обоснования их безопасности без проведения дорогостоящих и практически невозможных зачастую экспериментов.

СЕКЦИЯ 6.

Датчики, системы контроля и оборудование для РУ

Прогнозирование фоновых показаний измерительных каналов секторной системы контроля герметичности оболочек твэлов реактора БН-800

Албутова О. И., Лукьянов Д. А.

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

Ключевые слова: реакторы на быстрых нейтронах, БН-800, секторная система контроля герметичности оболочек твэлов по запаздывающим нейтронам, прогнозирование фоновых показаний, запаздывающие нейтроны, регрессионная модель, погрешность прогнозирования, адаптация коэффициентов регрессионной модели.

В работе представлены результаты разработки регрессионной модели для прогнозирования фоновых показаний измерительных каналов (КИ) секторной системы контроля герметичности оболочек твэлов (ССКГО) в зависимости от эксплуатационных параметров реакторной установки (РУ) БН-800 с учетом влияния фотонейтронов и собственного фона измерительных каналов.

Разработанная регрессионная модель позволяет производить оперативный расчет фоновых показаний КИ ССКГО при различных режимах эксплуатации реактора, что дает возможность определять возникновение дефектов оболочки твэлов типа «контакт топлива с теплоносителем» на ранней стадии.

Для улучшения качества прогнозирования предложен алгоритм оперативной адаптации коэффициентов модели к условиям новой микрокампании при выходе реактора на номинальный уровень мощности после планового ремонта. При использовании разработанной автоматической процедуры адаптации регрессионных коэффициентов максимальная погрешность прогноза на номинальном уровне мощности не превышает 3 % от уровня показаний измерительных каналов ССКГО РУ БН-800.

Система температурного контроля активной зоны современного реактора на быстрых нейтронах

Даниленко В. П.¹, Ельшина Н. В.¹, Дворников П. А.¹, Ковтун С. Н.², Кондратович Ф. В.², Кудряев А. А.², Лукьянов Д. А.²

> 1 – НИТИ им. А.П. Александрова, г. Сосновый бор; 2 – АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, dan1@niti.ru

Ключевые слова: реакторы на быстрых нейтронах, система температурного контроля, активная зона, флуктуации температуры.

Современные системы контроля теплотехнического состояния активной зоны реакторных установок (РУ) на быстрых нейтронах предназначены для раннего обнаружения нарушений охлаждения как активной зоны в целом, так и отдельных ее ТВС путем решения следующих задач:

– обнаружение в активной зоне работающего на мощности реактора наличия аномальных температурных зон;

контроль изменения проходных сечений ТВС;

– обнаружение кипения теплоносителя в активной зоне работающего на мощности реактора;

- вычисление баланса нейтронной и тепловой мощности РУ;
- определение равномерности нагрузки по петлям теплообмена РУ;
- контроль появления отложений на теплообменной поверхности парогенераторов;
- вычисление скорости теплоносителя в активной зоне;
- определение причин выявленных аномальных отклонений;
- прогноз развития аномалий.

Указанные задачи решаются на основе организации непрерывного контроля и анализа изменения параметров, характеризующих как средний уровень, так и флуктуации температуры теплоносителя в различных точках контроля. Обнаружение аномалий осуществляется путем комплексного анализа результатов сравнения текущих параметров с уставочными значениями для текущего эксплуатационного режима РУ.

Для повышения достоверности при принятии решения о возникновении аномалии, а также определения ее возможных причин используются результаты диагностирования активной зоны, полученные с помощью систем нейтронно-шумовой диагностики, обнаружения аномально реактивности, контроля герметичности оболочек твэлов. Прогноз развития аномалий осуществляется методом мониторинга тренда параметров и вычисления вероятного времени достижения контролируемыми параметрами предельных значения.

В докладе представлена современная система температурного контроля активной зоны (СТКАЗ) в составе системы диагностирования активной зоны реакторной установки БН-800 (СДРУ), а также результаты, полученные при эксплуатации системы на этапах пуска и опытно-промышленной эксплуатации энергоблока.

Для достижения максимальной чувствительности к аномалиям проведено определение и уточнение образов нормального состояния (граничных значения диагностических признаков) СТКАЗ для различных технологических режимов работы РУ. Впервые на быстрых реакторах получены статистические оценки температурных распределений и спектральных характеристик нейтронно-шумовых и температурных каналов при работе РУ на различных уровнях мощности.

Эксплуатация разработанной системы контроля температуры активной зоны РУ на этапах пуска и опытно-промышленной эксплуатации энергоблока с РУ БН-800 подтвердила возможность оперативного обнаружения отклонений от нормальной эксплуатации по измерениям температурных параметров активной зоны, алгоритмами определения диагностических признаков и их отклонения от «нормы».

Экспериментальные исследования эксплуатационного ресурса датчика газоанализатора водорода в режиме моделирования условий функционирования на АЭС

Богданов С. В., Бережной С. Н., Вашляев Ю. Н. AO «ГНЦ РФ – ФЭИ». г. Обнинск, svbogd@ippe.ru

Ключевые слова: безопасность АЭС, аварийные режимы работы, система водородной взрывозащиты, температура, давление, газоанализаторы водорода, датчики давления и температуры.

Одной из важных систем безопасного функционирования АЭС во всех режимах ее работы, включая аварийные, является система водородной взрывозащиты. Элементом системы водородной взрывозащиты является система контроля концентрации водорода (СККВ), включающая в свой состав газоанализаторы водорода, кислорода, датчики давления и температуры.

Согласно расчетным данным, в процессе развития аварийных ситуаций в герметичном объеме защитной оболочки может происходить быстрый рост температуры, давления, образование высоких концентраций водорода с большой скоростью его выхода. В связи с этим, одним из основных условий своевременного реагирования на быстрый рост объемной концентрации водорода, остается требование непрерывного контроля состояния среды ГО во всех режимах эксплуатации энергоблока.

До настоящего времени отсутствовали объективные данные о сохранении функциональных свойств газоанализатора ГВ-01, используемого на российских и ряде зарубежных АЭС, при переходе от периода длительной эксплуатации в период начала возникновения аварии и ее дальнейшего протекания.

В работе представлены экспериментальные данные исследований эксплуатационного ресурса работы датчика водорода ГВ-01 из состава системы контроля концентрации водорода для нормальных и аварийных условий его работы. Полученные данные позволяют определить возможность использования газоанализатора с назначенным сроком службы для АЭС.

Получены результаты, указывающие на возможность выполнения газоанализаторами водорода своих функций в длительном режиме их нормальной эксплуатации, а также сохранения их работоспособности при переходе внешних условий в аварийную стадию, в том числе при многократно возникающих аварийных факторах. При этом экспериментальные данные показали превышение декларируемого эксплуатационного ресурса газоанализаторов в аварийных режимах, аналогичных проектным.

Испытания макета индукционного расходомера

Генералов Е. В., Кебадзе Б. В., Лагутин А. А., Стефани А. Г.

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

Ключевые слова: индукционный расходомер, бесконтактный, магнитное поле, катушка возбуждения, приемная катушка, жидкий металл.

В ГНЦ РФ – ФЭИ разработаны и нашли применение различные модификации времяпролетных и вихревых расходомеров с электродными и бесконтактными датчиками. Последние особенно эффективны применительно к тяжелым жидкометаллическим теплоносителям. Общий недостаток этого класса приборов – ограничение со стороны нижней части диапазона расходов.

Рассмотрено несколько вариантов индукционных (токовихревых) датчиков, рабочий диапазон которых начинается с «нулевого» расхода. На основе предварительного анализа выбран вариант, основанный на регистрации переменного магнитного поля, индуцированного при взаимодействии радиального магнитного поля, возникающего вследствие встречного включения обмоток возбуждения, с потоком жидкого металла. Приемная обмотка располагается между обмотками возбуждения.

Альтернативная схема, основанная на эффекте сноса магнитного поля и регистрации разностного сигнала приемных обмоток, расположенных симметрично относительно центральной обмотки возбуждения, более критична к изменению параметров (проводимости) контролируемой среды.

Разработан и изготовлен макет индукционного расходомера, содержащий две идентичные соосные катушки возбуждения (количество витков w = 510) со встречно направленным потоком магнитного поля и расположенную между ними приемную обмотку (количество витков w = 225).

Катушки возбуждения подключаются к усилителю, на вход которого подаются импульсы от многофункционального генератора. Ток возбуждения I = 1-2 А. Величина радиального магнитного поля в области приемной обмотки на внутренней поверхности трубы измерительного участка составляет примерно 17 мТл при постоянном токе через обмотки возбуждения I = 1 А. Частота импульсов генератора варьировалась в диапазоне 100 – 1000 Гц. Сигналы с катушек возбуждения и приемной катушки регистрировались с помощью компьютерной системы через АЦП с частотой до 100 кГц с последующей обработкой.

Испытания проводились на измерительном участке Ду 40 установки поверочной ИРС-М в диапазоне расходов до 30 м³/ч. Показано, что для формирования стабильного выходного сигнала наиболее эффективный диапазон частоты питания для данных параметров датчика лежит в пределах 100 – 300 Гц. Получены предварительные результаты по смещению фазы сигнала приемной обмотки с изменением расхода. Для контроля фазы эффективен несколько более высокий диапазон частот 300 – 500 Гц.

Влияние механических воздействий на термо-ЭДС термопар градуировки нихросил-нисил

Ковалев Д. М., Корнилов В. П.

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

Ключевые слова: термопара, нихросил–нисил, хромель–алюмель, температура, метрологическая стабильность, механическое воздействие, термо-ЭДС, градуировочная характеристика, деформация, отжиг.

Термопары очень широко применяются для измерения температуры в самых различных условиях. Термопара типа N (нихросил–нисил) обладает лучшей метрологической стабильностью и считается самой точной термопарой по сравнению с другими термопарами из неблагородных металлов. При температуре до 1200 °С имеет дрейф термо-ЭДС, не превышающий дрейф термопар из драгоценных металлов. Это относительно новый тип термопары, разработанный на основе термопары типа K (хромель– алюмель), имеющий ряд преимуществ, но к сожалению, мало изученный.

Работа посвящена исследованию влияния механического воздействия на изменение термо-ЭДС термопарного кабеля и термопар типа N, а также влиянию термической обработки на восстановление градуировочных характеристик термопар. Проведено сравнение влияния деформации двух типов термопар (нихросил-нисил и хромельалюмель).

Для проведения исследований были изготовлены две партии проволочных термопар типа хромель–алюмель и нихросил–нисил из проволок диаметром 0,5 мм. Первая партия образцов изготовлена стандартным способом и проградуирована до 1100 °C (снята исходная характеристика). После было проведено утонение каждого термоэлектрода с помощью фильеры до рабочего спая до диаметра 0,45 мм. Затем снова была проведена градуировка термопар. Вторая партия образцов была изготовлена из уже заранее утоненных термоэлектродов до диаметра 0,45 мм и проградуирована. Анализ результатов градуировки показал, что проволочные термопары типа N после механического воздействия изменили метрологические характеристики, но соответствуют классу допуска 2 ГОСТ Р 8.585-2001, в то время как аналогичные термопары типа К после механического воздействия не соответствуют ни одному классу допуска. Таким образом, термопары типа N более устойчивы к механическим воздействиям, чем термопары типа К.

Далее был разработан температурно-временной режим отжига термопар для восстановления градуировочных характеристик. Все образцы подвергались термической обработке в вакуумной печи при следующих режимах: 1) (800±10) °C, 30 минут; 2) (550±10) °C, 30 минут; 3) (450±10) °C, 6 часов, после чего снова была проведена градуировка каждого образца. По результатам градуировки все термопары восстановили свои градуировочные характеристики.

Механические воздействия сильно влияют на термо-ЭДС и могут вызвать у термопары погрешность в несколько градусов. При изготовлении термопар не следует подвергать термоэлектрический кабель и проволоку деформации (изгибу, правке, ударам, и т. п.), а в тех случаях, когда это неизбежно, необходимо производить термическую обработку (отжиг). При отжиге деформированных сплавов термо-ЭДС изменяется в направлении, обратному тому, которое вызывается деформацией.

Стабильность метрологических характеристик термопар градуировки нихросил–нисил (N-тип) и хромель–алюмель (К-тип) при температуре более 1000 °С

Стефани А. Г., Ковалев Д. М., Корнилов В. П. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>vkornilov@ippe.ru</u>

Ключевые слова: термопара, градуировка, температура, ГОСТ Р 8.585-2001, хромель, алюмель, нихросил, нисил, метрологическая стабильность.

В настоящее время в практике температурных измерений используются наряду с традиционными термопарами типа К (хромель–алюмель) термопары типа N (нихросил–нисил), которые отличаются от традиционных термопар типа К более высокой метрологической стабильностью особенно при повышенной температуре (более 1000 °C). Так как в основном для научных исследований и частично в промышленности используются термопары кабельного типа, изготавливаемые из термопарного кабеля типа КТМС градуировок N и K, несомненен практический интерес к стабильности во времени показаний таких термопар при температуре более 1000 °C, то есть на верхнем температурном пределе их использования.

С этой целью в процессе испытаний при температуре 1100 °С для термопар типа К и 1200°С для термопар типа N в течение 60 часов в воздушной среде проводилось сличение показаний исследуемых термопар с показаниями эталонного средства измерения температуры, которым являлась термопара типа ППО 1 разряда. Одновременно измерялись сопротивление цепей и изоляции исследуемых термопар. Общее количество исследуемых термопар – 56 штук, из них типа К \emptyset 1,5 мм – 10 шт., \emptyset 1,0 мм – 15 шт., типа N \emptyset 1,0 мм –20 шт., \emptyset 3,0 мм – 11 шт. У всех термопар рабочий спай изолирован от оболочки.

Испытания показали, что термопары обоих типов сохранили свою работоспособность при вышеуказанных температурах в течение ресурса 60 часов и их метрологические характеристики соответствуют ГОСТ Р 8.585-2001.

Градуировка термопар типа К \emptyset 1,0 мм и \emptyset 1,5 мм в диапазоне от 100 до 1100 °С и типа N \emptyset 3,0 мм в диапазоне от 100 до 1200 °С после испытаний показали, что они соответствуют классу допуска 1 или 2 по ГОСТ Р 8.585-2001.

Градуировка термопар типа N \emptyset 1,0 мм после испытаний показала, что они не соответствуют ни одному классу допуска (1 или 2) ГОСТ Р 8.585-2001. Обращает внимание тот факт, что сопротивление цепей термопар типа N \emptyset 1,0 мм увеличилась по сравнению с величинами до испытаний на 1,5–2,0 Ом, что не наблюдалось у термопар типа К \emptyset 1,0 мм, \emptyset 1,5 мм и типа N \emptyset 3,0 мм. По всей вероятности, в связи с потерей герметичности термопар началось разрушение рабочего спая, что привело к изменению метрологических характеристик термопар типа N \emptyset 1,0 мм.

Аналогичные испытания проводились для термопар типа K и N при температуре 600 °C в течение 960 часов, при температуре 800 °C в течение 260 часов с последующими испытаниями термопар типа K в течение 60 часов при температуре 1100 °C и термопар типа N при температуре 1200 °C. В процессе испытаний при температурах 600 и 800 °C термопары типов K и N соответствуют классу 1 или 2 ГОСТ Р 8.585-2001.

Дальнейшие испытания термопар типа К при температуре 1100 °C и типа N при температуре 1200 °C приводит к тому, что их метрологические характеристики изменяются и не соответствуют ГОСТ Р 8.585-2001.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1 Кабельные термопары типа К и N работоспособны при температуре более 1000 °С и их метрологические характеристики соответствуют ГОСТ Р 8.585-2001 в течение нескольких десятков часов.

2 Кабельные термопары типа N \emptyset 3,0 мм могут быть использованы для измерения температуры до 1200 °C. Кабельные термопары типа К при температуре 1200 °C после нескольких часов эксплуатации не соответствовали ГОСТ Р 8.585-2001.

3 Термопары типов К и N, используемые в качестве средств измерения при температуре менее 1000 °C, не рекомендуется в дальнейшем использовать для измерения температуры более 1000 °C.

Применение вихревых магнитоиндукционных расходомеров с осесимметричным телом обтекания в контурах с жидкометаллическим теплоносителем

Шурупов В. А., Кебадзе Б. В., Лагутин А. А., Фомин А. Н. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, vshurupov@ippe.ru

Ключевые слова: магнитоиндукционный вихревой расходомер, осесимметричный тороидальный вихрь, жидкометаллический теплоноситель.

Периодическая поверка и бездемонтажная калибровка средств измерения расхода жидкого металла являются сложными техническими задачами, для решения которых не всегда возможно применить типовые методики, основанные на использовании эталонов необходимого разряда. Типичная ситуация для объектов атомной энергетики – ограниченный доступ к средствам измерения по месту расположения, особенно в условиях наведенной активности.

В таких случаях допускается для определения объемного расхода использовать времяпролетный метод, основанный на фиксации времени перемещения метки (или меток) между датчиками при условии установившегося профиля стабилизированного потока, известного диаметра трубопровода и расстояния между датчиками. Полученный результат корректируется с учетом поправочного коэффициента, полученного при первичной поверке.

В ГНЦ РФ – ФЭИ разработаны и эксплуатируются в первом контуре реактора БН-800 времяпролетные расходомеры, в которых в качестве меток используются устойчивые продольные вихри, индуцирующие полезный сигнал на электродах первичных преобразователей.

Цель настоящей работы показать возможность в качестве меток использовать поперечные тороидальные вихри, возникающие за осесимметричным телом обтекания. Перемещение тороидальных вихрей регистрируется бесконтактными магнитоиндукционными датчиками. Интерес к такому техническому решению связан с устойчивостью профиля потока перед тороидальным вихрем и ожидаемой поступательной скорости тороидального вихря близкой к средней скорости потока.

Испытания проводились на измерительных участках Ду 30, Ду 50 установки поверочной ИРС-М в диапазонах расходов от 1 до 15 м³/ч и от 1 до 35 м³/ч, соответственно. В качестве генератора вихрей выступало кольцо, расположенное строго по центру трубопровода (призма в сечении, основание призмы навстречу потока). Геометрические параметры кольца: диаметр приблизительно 0,71 Ду, ширина 0,1 Ду. В качестве датчиков использовались две приемные катушки (количество витков W = 100), расположенные за генератором тороидальных вихрей на расстоянии 0,5 и 3 диаметра соответственно. Величина постоянного магнитного поля в районе датчика составляла от 30 до 50 мТл.

В работе приводятся градуировочные характеристики расходомеров Ду 30 и Ду 50, а также полученные зависимости:

- частоты вихреобразования от расхода;
- средней скорости тороидального вихря от расхода;
- амплитуды полезного сигнала от расхода;

- затухания амплитуды полезного сигнала при удалении от места генерации вихря.

Сопоставление указанных параметров может быть использовано для периодической поверки по месту установки. Испытанные макетные образцы показали возможность реализации расходомеров с широким диапазоном измеряемых расходов.

Инерционность термопар с изолированным и неизолированным рабочим спаем

Ловчев Р. А., Корнилов В. П., Фомин А. Н.

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

Ключевые слова: термопара, инерционность, спай, хромель-алюмель, нихросил-нисил, ГОСТ 6616-94.

Точность измерения температуры в быстропротекающих процессах зависит от инерционности средств измерения температуры, а именно термопар. Инерционность термопар зависит от конструкции термопар и условий теплопередачи с окружающей средой, температура которой измеряется. В данной работе приведены результаты измерения инерционности термопар, обусловленные конструкцией термопар. Испытания термопар с целью определения величины инерционности проводились по переходному процессу в режиме простого охлаждения в соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 6616-94.

Испытаниям с целью определения инерционности подвергались кабельные термопары хромель-алюмель (тип К) и нихросил-нисил (тип N) изготовленные из термопарного кабеля КТМС диаметром 1,0 мм, 1,5 мм, 3,0 мм. Использовалось различное исполнение рабочего спая – изолированный относительно оболочки и неизолированный относительно оболочки. Неизолированный спай был выполнен как с пробкой, которая обеспечивала герметичность термопары, так и непосредственно совместно с оболочкой термопарного кабеля.

Полученные в ходе испытаний значения тепловой инерции термопар лежат в пределах 0,05 – 1,0 с в зависимости от диаметра термопарного кабеля и вида исполнения рабочего спая. Наименьшее значение показателя тепловой инерции у термопар диаметром 1,0 мм с неизолированным рабочим спаем. Термопары диаметром 3,0 мм с изолированным рабочим спаем имеют наибольший показатель тепловой инерции.

По результатам испытаний установлена зависимость величины показателя тепловой инерции от конструкции рабочего спая термопар и от диаметра термопары. Зависимости инерционности термопар от типа их градуировки К или N не наблюдается.

Моделирование высокопредельных электромагнитных расходомеров для ЖМТ

Фомин А. Н., Генералов Е. В., Кебадзе Б. В., Шурупов В. А.

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

Ключевые слова: электромагнитный расходомер, высокопредельный, диапазон измерений, моделирование, установка поверочная, нелинейность, градуировка.

Высокопредельные расходомеры ($G \ge 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$) составляют заметную долю контрольно-измерительных приборов на установках с быстрыми натриевыми реакторами. В качестве примера можно привести расходомеры на секциях парогенераторов БН-600, БН-800. Их отличительной особенностью с учетом диапазона измерений и параметров измерительного участка (Ду 300) является значение критерия $\text{Re}_m >> 1$, что при ограниченной протяженности магнитного поля расходомера приводит к нелинейности его характеристики. Это в свою очередь затрудняет градуировку и метрологические обоснования характеристик. Цель настоящей работы – показать возможность моделирования для оценки нелинейности и последующей градуировки магнитных расходомеров. Эксперименты проводились на установке поверочной ИРС-М, в основе действия которой лежит объемно-временной метод в сочетании с методом сличения. Представленные в докладе параметры установки поверочной с учетом дополнительных петель позволяют достичь на измерительном участке ДУ 100 значение $\text{Re}_m > 10$, что соответствует диапазону $G > 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ для штатных расходомеров на Ду 300. Отпадает необходимость в полномасштабных дорогостоящих поверочных установках.

Испытуемая модель расходомера имела полюсный наконечник протяженностью 66 мм (0,66 Ду) и 7 последовательно расположенных с шагом 16,5 мм пар электродов. Измерения проводились в диапазоне расходов до 380 м³/ч при температуре натрия 265±5°С. Сигналы пар электродов обрабатывались с помощью метода наименьших квадратов. Нелинейность градуировочной характеристики выражалась путем представления магнитного расходомера в виде системы с обратной связью через индуцированное магнитное поле, пропорциональное выходному сигналу. Для сравнительно слабой нелинейности градуировочная характеристика определялась в виде:

$$E = K(1 - \xi G)G,$$

либо через магнитное число Рейнольдса

$$E = K \left(1 - \alpha \operatorname{Re}_{\mathrm{m}} \right) G,$$

где α – безразмерный коэффициент, определяющий отклонение от линейности.

В экспериментах получены градуировочные характеристики и значения коэффициентов ξ, α для всех пар электродов. Значения α лежат в пределах сотых долей для крайних пар и центральной пары электродов и тысячных долей для смещенной относительно центра пары электродов.

Процедура градуировки высокопредельного натурного расходомера предусматривает два этапа:

 градуировка натурного образца расходомера на Ду 300 для начального участка характеристики (25 – 30% от номинала);

 метрологические испытания модельного образца с соблюдением геометрического и магнитогидродинамического подобия в диапазоне расходов, обеспечивающем значение Re_m для номинального значения штатного прибора, определение коэффициентов α и выбор пары (либо комбинации сигналов пар электродов), обеспечивающих минимальную нелинейность.

Выбор параметров времяпролетного расходомера жидких металлов

Фомин А. Н., Кебадзе Б. В., Стефани А. Г., Шурупов В. А.

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

Ключевые слова: жидкий металл, времяпролетный расходомер, бесконтактный, уровень корреляции, оптимизация.

В настоящее время имеется положительный опыт применения времяпролетных (корреляционных) расходомеров с бесконтактными датчиками для измерения расхода жидких металлов (натрий, свинец, свинец-висмут). Этот метод особенно актуален для ТЖМТ вследствие наличия окисной пленки на внутренней поверхности трубы, что препятствует использованию наружных электродов.

Преимущества бесконтактных расходомеров:

- универсальность;
- отсутствие контакта элементов датчика с теплоносителем;
- возможность монтажа датчиков на трубопроводе без сварки;

– практически отсутствие гидравлического сопротивления, в особенности для ТЖМТ, обладающих большим удельным сопротивлением;

– быстродействие ввиду высокого уровня корреляции, который обеспечивается интегральным типом бесконтактного датчика.

Цель настоящих экспериментов – получение исходного материала для обоснованного выбора параметров измерительного участка, а именно:

 зависимости уровня вихревых флуктуаций от расстояния от источника возмущений;

– изменения уровня корреляции в зависимости от удаления от источника возмущения и взаимного расположения датчиков в измерительных сечениях.

Эксперименты проводились на установке поверочной ИРС-М в диапазоне расходов натрия до 50 м³/ч. Измерительный участок представлял собой трубопровод Ду 50протяженностью более 20 калибров, источником возмущения служит стандартный отвод (ГОСТ 17375-2001), которому предшествует прямолинейный участок трубы длиной не менее 10 калибров.

Датчики вихрей выполнены в виде магнитных систем с постоянными магнитами, кольцевым магнитопроводом и сердечниками с приемными обмотками. Два датчика располагаются на направляющих, вдоль которых они могут перемещаться и устанавливаются в фиксированных позициях с шагом 0,5 Ду и базовым расстоянием в диапазоне 1,5–4 Ду. Имеется также одинарный датчик для возможности анализа корреляции на больших расстояниях.

Аппаратура позволяет регистрировать одновременно до 16 каналов и проводить корреляционную и спектральную обработку. Сигналы каждой из двух приемных обмоток магнитных систем записываются раздельно; для последующей корреляции могут формироваться их сумма либо разность.

Получено распределение флуктуаций сигнала вдоль измерительного участка, которое указывает на двух-трехкратное падение амплитуды сигнала при удалении датчика от позиции 2 Ду до 20 Ду от источника возмущений. Коэффициенты корреляции при различном взаимном расположении датчиков в диапазоне от 1,5 до 4 Ду лежат в пределах 0,7–0,85. Полученные данные будут использованы для оптимизации параметров измерительного участка с целью обеспечения минимума суммарной погрешности с учетом систематической и случайной составляющей.

СЕКЦИЯ 7.

Использование технологий ядерной энергетики в других отраслях

Карнотизированные газотурбинные преобразователи перспективных атомных станций малой мощности и задача их расчётно-конструкторской оптимизации и экспериментальной теплотехнической отработки

Тревгода М. М.¹, Косой А. С.², Чомчоев А. И.³

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, <u>mtrevgoda@ippe.ru;</u>
ОИВТ РАН, г. Москва;
ООО «Испытательный Полигон Холода», Академия наук Республики Саха (Якутия)

Ключевые слова: карнотизированные газотурбинные преобразователи АСММ (КГТП), требования к КГТП, задачи расчётно-конструкторской и экспериментальной теплотехнической отработки КГТП.

В истории развития атомных станций малой мощности (ACMM) вопросам совершенствования собственно РУ традиционно уделялось больше внимания в сравнении с преобразователями. Возможности последних и их влияние на характеристики ACMM исследованы несравненно меньше.

Вместе с тем это влияние значительно, оптимизация типа и параметров преобразователя являет собой значительный резерв дальнейшего развития ACMM в целом.

В большинстве проектов ACMM, по аналогии с теплоэнергетикой, в качестве преобразователя используются паротурбинные установки (ПТУ). На заре развития атомной энергетики газотурбинные установки (ГТУ) как преобразователь после первых же проектов были исключены из дальнейшего широкого рассмотрения, уступив место ПТУ.

Однако, как показали исследования, проводившиеся в течение многих лет в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», в широкой области авиационных, энергетических и др. газотурбинных технологий нашлась относительно небольшая подобласть, на основе которой возможна разработка высокоэффективных преобразователей АСММ, не уступающих, а в ряде отношений превосходящих, традиционные ПТУ-преобразователи. Это направление развития ГТУ, имеющее отечественное происхождение, связанно с совершенствованием схемы ГТУ в направлении приближении её термодинамического цикла к циклу идеальной тепловой машины – циклу Карно (карнотизированные ГТУ – КГТУ). Но далеко не всякая КГТУ может быть использована в качестве преобразователя АСММ. Необходимы специальные модификации КГТУ – карнотизированные газотурбиные преобразователи (КГТП), отвечающие ряду требований, накладываемых РУ.

К числу основных требований к КГТП могут быть отнесены:

 высокая экономичность в номинальном режиме при умеренных температурах на входе в ГТП, обеспечиваемых РУ;

- высокая экономичность в диапазоне нагрузок;
- технологичность;
- компактность;
- совместимость с РУ;

- увеличенный ресурс;
- надёжность;
- безопасность;
- когенерация;
- низкая стоимость КГТП и вырабатываемой энергии.

Основные приёмы карнотизации циклов ГТУ:

- промежуточный нагрев рабочего тела в процессе расширения;
- внутрицикловая утилизация тепла (регенерация);
- промежуточное охлаждение рабочего тела в процессе сжатия.

В ходе поисковых проработок КГТП выявлены:

сильное влияние схемы и параметров КГТП на определяющие характеристики ACMM;

- значительное различие оптимальных схем и параметров КГТП для разных ACMM;

– принципиальная возможность выполнения повышенных требований к перспективным АСММ при применении КГТП;

 принципиальная возможность разработки схемы КГТП, реализующей многократные промежуточные охлаждения и нагревы рабочего тела без значительного развития газоходов;

– принципиальная возможность разработки схемы КГТП, реализующей подвод и отвод тепла к рабочему телу непосредственно в проточной части турбомашин (для КГТП микромощностей до десятков кВт эл.)

В во всех рассмотренных мощностных диапазонах ACMM с КГТУ обнаруживают преимущества по таким определяющим показателям, как экономичность установки, уровень максимального давления в реакторном контуре, исключение работы на площадке станции со свежеотработавшим топливом и др. Особенно показательны возможности улучшения характеристик ACMM в сравнении с альтернативными предложениями для микро и мини диапазонов мощности – до нескольких сотен кВт.

К числу основных задач отработки КГТП АСММ могут быть отнесены:

 расчётно-экспериментальное подтверждение на референтных моделях высокой экономичности КГТП при сравнительно низких температурах РУ;

 расчётно-экспериментальное подтверждение теплогидравлических и теплофизических параметров, надёжности, безопасности и др. характеристик конкретных вариантов КГТП;

 – расчётно-конструкторское подтверждение различной совместимости КГТП с РУ (по параметрам, средам, технологиям и др.) для АСММ конкретных мощностей и назначений;

– расчётное подтверждение приемлемой стоимости конкретных вариантов КГТП и вырабатываемой энергии.

Подход ФБУ «НТЦ ЯРБ» к оценке влияния теплоносителя на противоаварийную готовность и реагирование

Пивоваров В. А.

НТЦ ЯРБ, г. Москва, pivovarov@secnrs.ru

Ключевые слова: реакторные технологии, выбор теплоносителя, конструкционные материалы, реакторы IV поколения, тяжелая авария.

История мировой атомной энергетики свидетельствует о том, что выбор теплоносителя является одним из решающих факторов успешного развития реакторной технологии. За прошедшее время в действующих реакторных установках было использовано множество различных теплоносителей: легкая и тяжелая вода, щелочные металлы (Na, Na-K), тяжелые металлы (Hg, Pb-Bi), органические теплоносители (гидростабилизированный газойль, гидротерфенил, дитолиметан и др.), расплавленные соли (смесь фторидов Na, Zr, Li, Be, U, Th), газы (CO₂, He, диссоциирующий газ N_2O_4). При этом на сегодняшний день лишь реакторы, охлаждаемые водой (легкой и тяжелой) и CO₂, вышли на уровень промышленной энерготехнологии. Остальные за прошедшие десятилетия так и не преодолели стадии экспериментальных реакторов или реакторовпрототипов.

Опыт показывает, что для того, чтобы реакторная концепция стала успешной, теплоноситель, помимо хороших теплофизических свойств (большой удельной теплоемкости, высокого коэффициента теплопередачи), слабого поглощения, а для быстрых реакторов и слабого замедления нейтронов, термической и радиационной стойкости, должен обладать хорошей совместимостью с конструкционными материалами и быть дружественным по отношению к окружающей среде.

Под хорошей совместимостью с конструкционными материалами подразумевается слабое коррозионное и эрозионной воздействие теплоносителя, его слабое физикохимическое влияние на механические свойства конструкционных материалов в реальных условиях эксплуатации (температура, давление, статические и вибрационные нагрузки, радиационное воздействие).

Дружественное отношение к окружающей среде подразумевает малую радиоактивность теплоносителя, его пожаро- и взрывобезопасность, нетоксичность. На пути распространения теплоносителя на два физических барьера меньше, чем у радиоактивных веществ в тепловыделяющем элементе. Поэтому, когда теплоноситель сам является радиоактивным материалом, как, например, расплавленная соль с фторидами актинидов и осколками деления или Pb-Bi с большим содержанием наработанного полония, то это создает дополнительную угрозу персоналу, населению и окружающей среде. Это касается и токсичности теплоносителя, например, ртути или N₂O₄. Горение, а тем более взрыв теплоносителя первого контура интенсифицирует выход радиоактивных веществ и затрудняет действия по ограничению выбросов.

В наибольшей степени указанным выше требованиям совместимости и дружественности к конструкционным материалам и окружающей среде удовлетворяют два теплоносителя – легкая вода и гелий. Поэтому не случайно современная атомная энергетика базируется на легководной технологии в разных ее вариантах, а перспектива освоения температур уровня ~1000 °C и выход на атомно-водородную энергетику связывается, прежде всего, с гелием. Практически все усовершенствованные энергетические реакторы нового поколения, предназначенные для серийного строительства в ближайшие годы (EPR, AP1000, APWR, ABWR, ESBWR, APR-1400, CAP-1400, ACR- 700, ВВЭР-ТОИ), с ресурсом работы до 60 лет – это реакторы с легководным теплоносителем. Действующие экспериментальные высокотемпературные реакторы HTTR, HTR-10 и сооружаемый в Китае демонстрационный реактор HTR-PM используют гелиевое охлаждение.

Выбор теплоносителя влияет не только на работоспособность реакторной установки, но и на ее безопасность. Это касается, в том числе мер аварийной готовности и реагирования, позволяющих смягчить последствия тяжелых запроектных аварий.

В рамках Generation IV, кроме воды и гелия, в качестве теплоносителя рассматриваются натрий, свинец-висмут, свинец и смесь расплавленных солей (фторидов). Отметим, что эти теплоносители не являются новыми для атомной энергетики, история их использования насчитывает шесть десятилетий (за исключением Pb, физико-химические свойства которого близки к Pb-Bi, а температура плавления на ~200 °C выше).

Как показал опыт состоявшихся тяжелых запроектных аварий, запаса теплоносителя, содержащегося в первом контуре, недостаточно для обеспечения постоянного охлаждения топлива, ослабления радиационных последствий для персонала, населения и окружающей среды. Для этой цели используются запасы теплоносителя в системах аварийного охлаждения, а также внешние источники (например, передвижные насосные установки, внедренные на АЭС после аварии на Фукусиме).

Вода и воздух это два теплоносителя, запасы которых на Земле, в принципе, не ограничены. От возможности эффективного использования этих теплоносителей на 4 и 5 уровнях глубокоэшелонированной защиты во многом зависят результаты управления запроектной аварией, успешность мероприятий по защите персонала и населения на площадке АЭС и за ее пределами, в том числе и для реакторов IV поколения.

Выбранные 15 лет назад реакторные технологии Generation IV не должны ограничивать нас в поиске альтернативных более надежных и экологически приемлемых вариантов.

О возможности применения свинецсодержаших расплавов для нефтеперерабатывающей и сталелитейной отраслей промышленности

Кошелев М. М., Ульянов В. В., Гулевский В. А., Коновалов М. А., Харчук С. Е. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, mkoshelev@ippe.ru

Ключевые слова: переработка нефтепродуктов, печи огневого нагрева, образование кокса на теплообменных поверхностях, тепломассоперенос, свинецсодержащие расплавы, тяжёлый жидкометаллический теплоноситель.

Одной из актуальных задач нефтеперерабатывающей промышленности является повышение эффективности нефтепереработки и ресурса работы теплообменного оборудования. Трубчатые печи огневого нагрева являются основными аппаратами, при помощи которых сообщается необходимое для осуществления процесса тепло. Ввиду того, что на практике невозможно обеспечить равномерный нагрев теплообменной поверхности печей, происходит локальный перегрев нефтепродуктов. Это приводит к образованию кокса на поверхности, контактирующей с нефтепродуктами, что негативно сказывается как на ресурсе работы печей огневого нагрева, так и на эффективности нефтепереработке. В настоящее время для предотвращения локального перегрева в печи несколько снижают нагрев нефтепродуктов, однако это негативно сказывается на количестве получаемых лёгких фракций и как следствие снижает экономическую эффективность в целом.

Исследования по выравниванию температурных полей на поверхности теплообменных труб в печах огневого нагрева ведутся достаточно активно научными коллективами по всему миру. Условно их можно разделить на три направления: разработка двухконтурных систем обогрева нефтепродуктов; переход на принципиально новый тип нагрева нефтепродуктов (индукционный и ионный нагрев); совершенствование конструкций «классических» печей огневого нагрева. Использование двухконтурной компоновки оборудования позволяет обеспечить равномерное распределение температурного поля по теплообменной поверхности оборудования. Однако экономическая составляющая этого способа ввиду удорожания оборудования препятствует широкому внедрению. Новые типы нагрева нефтепродуктов (индукционный и ионный нагрев) в настоящее время недостаточно исследованы. Температурный диапазон их использования ограничен диапазоном значений от 50 до 250 °C, вследствие этого они применимы только на стадии первичного нагрева нефти. Совершенствование конструкций «классических» огневых печей на сегодняшний день остаётся наиболее перспективным направлением для решения поставленной задачи. Снижение перепадов температур по теплообменной поверхности достигается в основном за счёт оптимизации конструкции печей в части расположения горелок и изменения профилей.

Для решения задачи по выравниванию температурных полей на поверхности теплообменных труб в печах огневого нагрева предлагается использовать технологии и научный задел атомной отрасли. В этой отрасли успешно решена проблема передачи высокопотенциального тепла от активных зон, функционирующих при температурах до 1000 °C, к парогенераторам мощностью ~ 3000 MBT. Обоснованы десятилетиями эксплуатации жидкометаллические теплоносители натрий, свинец, литий, ртуть, их сплавы, использование которых в первых контурах РУ позволило снизить его габариты по сравнению с водо-водяными РУ. Такая экономия в размерах достигнута благодаря удачному сочетанию теплогидравлических, теплофизических и физико-химических

свойств жидкометаллических теплоносителей. Так, например, эвтектический сплав свинца с висмутом был успешно применен в паро-производящих установках атомных подводных лодок.

Обосновывается схема нагрева нефтепродуктов с применением эвтектического сплава свинца с висмутом, в том числе и конструкция теплообменных труб для печей огневого нагрева. Конструкция представляет собой теплообменник труба в трубе, кольцевой зазор которого заполнен эвтектическим сплавом свинца с висмутом, огневой нагрев осуществляется с наружной поверхности, нефтепродукты располагаются во внутренней трубе.

Проведены сравнительные оценки распределения температур по теплообменной поверхности контактирующей с нефтепродуктами для «традиционной» теплообменной трубы и конструкции трубы, предложенной авторами, при неравномерном огневом нагреве с наружной поверхности с помощью численного моделирования в CFD-пакете OpenFOAM. Показано, что конструкция трубы, предложенная авторами, способствует выравниванию температурных полей на поверхности теплообменных труб в печах огневого нагрева, по сравнению с «традиционной» теплообменной трубой.

Свинецсодержащие расплавы: от теплоносителей перспективных реакторов к инновационным аппаратам для переработки твердого, жидкого и газообразного сырья

Ульянов В. В., Мельников В. П., Орлов Ю. И., Асхадуллин Р. Ш., Гулевский В. А.

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

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, реакторы на быстрых нейтронах, технология теплоносителя, термоэлектрохимическое разложение воды, жидкометаллический пиролиз отработавших автомобильных шин, прямоконтактный парогенератор.

Выбор расплавов легкоплавких металлов в качестве теплоносителей ядерных реакторов легко объясним. При турбулентном течении жидкостей в трубах передача тепла осуществляется как за счет турбулентного перемешивания потока, так и путём молекулярной теплопроводности теплоносителя. Жидкометаллические теплоносители обладают лучшей по сравнению с другими теплоносителями молекулярной теплопроводностью. Это определяет большую долю тепла, переносимого за счёт теплопроводности, и обеспечивает лучшие теплопередающие свойства жидких металлов, что, в основном, и определяет преимущества их использования в качестве теплоносителей.

Транспортный реактор с таким типом теплоносителя компактен, быстро набирает мощность, а также обладает повышенной потенциальной безопасностью, в том числе и способностью самопроизвольно уменьшать мощность в аварийных ситуациях. Реакторы транспортных установок с теплоносителем Pb-Bi, эксплуатировавшиеся в СССР, суммарно отработали на «ходовых» режимах около 20 реакторо-лет при общей наработке 80 реакторо-лет.

Ключевой проблемой, решавшейся при освоении теплоносителя Pb-Bi, было создание системы его контроля и поддержания качества. Отсутствие такой системы вкупе с недостатком знаний о новом теплоносителе привело в 1968 г. к трагическим событиям на АПЛ К-27. Успешно создать систему технологии свинцово-висмутового теплоносителя и исключить в дальнейшем любые аварии, связанные с применением жидкометаллического теплоносителя, сумел коллектив под руководством Ю.И. Орлова.

Жидкие металлы также являются единственными теплоносителями, удовлетворяющими всем требованиям в отношении теплоотвода и ядерных свойств, предъявляемым к энергетическим реакторам на промежуточных и быстрых нейтронах, а также к реакторам-размножителям. Именно этим объясняется наличие сразу трех крупных проектов гражданских реакторов на быстрых нейтронах, разрабатываемых в России (БН, СВБР и БРЕСТ), а также десятки проектов разной степени проработанности, разрабатываемых за рубежом (ELFR, ALFRED, MYRRHA, CLEAR и др.).

В России вопросам обеспечения технологии теплоносителя по-прежнему уделяется значительное внимание. Причем системами контроля и поддержания качества теплоносителей оснащаются как сами реакторные установки, так и исследовательские циркуляционные контура и стенды, а культура обращения с жидкометаллическими теплоносителями на предприятиях ГК «Росатом» повышается и совершенствуется.

Применительно к теплоносителям на основе свинца (свинец и эвтектический сплав свинца с висмутом) технология решает следующие задачи: 1) обеспечение чистоты теплоносителя и поверхностей циркуляционного контура для поддержания проектных теплогидравлических характеристик при длительных ресурсах работы (несколько десятков лет при работе ЯЭУ на мощности до 100 %); 2) предотвращение коррозии и эрозии конструкционных материалов при длительных ресурсах работы (несколько десятков лет при работе ЯЭУ на мощности до 100 %); 3) обеспечение современных требований безопасности на различных этапах эксплуатации реакторной установки (подготовка теплоносителя, пуск реактора, текущая эксплуатация, ремонты и перегрузки, разгерметизация, режимы отклонения от условий нормальной эксплуатации).

Учитывая вышеперечисленное, современный комплекс мер по технологии свинецсодержащих теплоносителей обеспечивает следующее: 1) подготовка теплоносителя и его загрузка; 2) контроль и регулирование кислородного потенциала теплоносителя; 3) водородная очистка теплоносителя и поверхностей циркуляционного контура от шлаков на основе оксида свинца; 4) фильтрация теплоносителя; 5) очистка защитного газа от аэрозолей теплоносителя.

Однако, только лишь реакторными установками не исчерпывается потенциал свинецсодержащих расплавов. Химическая инертность по отношению к воде и органическим веществам, высокая температура кипения и возможность иметь низкое давление в циркуляционном контуре, легко восстанавливаемый оксид свинца и заманчивый для многих процессов химической технологии обратимый металлооксидный цикл «металл – оксид металла», а также и многие другие физико-химические свойства позволяют рассматривать расплавы легкоплавких металлов в новых технологиях переработки твердого, жидкого и газообразного сырья. Ниже приведем лишь некоторые из них.

1) Высокотемпературное термоэлектрохимическое разложение воды. При крайне малом содержании растворенного кислорода свинецсодержащие расплавы взаимодействуют с водой с образованием водорода. Реакция с водой не будет затухать в случае, если из расплава непрерывно отводить растворенный кислород. Эта проблема решена, благодаря использованию специальных кислородных насосов на основе диоксида циркония, имеющего ионную проводимость по кислороду. В результате можно получать водород и особо чистый кислород, выделяющийся на внутренних поверхностях кислородного насоса.

2) Жидкометаллический пиролиз твердых органических полимерных отходов, в первую очередь отработавших автомобильных шин. Из существующих методов переработки отработавших шин наиболее перспективным считается пиролиз, то есть нагрев шин без доступа кислорода. В результате такого нагрева вместо экологически вредного отхода получаются пиролизная жидкость (аналог синтетической нефти), технический углерод, металлокорд и пиролизный газ (близкий по свойствам к попутному нефтяному газу). Однако экономически оправданных технологий пиролиза единицы, т. к. важно, чтобы длительность пиролиза была относительно невелика (<1 ч), иначе доля товарных продуктов в общей массе получившихся стремительно уменьшается. Большая длительность процесса также ухудшает экономические показатели из-за эндотермичности процесса. По этой причине «классический» пиролиз органических полимеров в инертном газе широко не применяется, а использование свинцового теплоносителя кардинально снижает длительность пиролиза, позволяет получать дорогостоящие продуктов.

3) Прямоконтактные парогенераторы на воде без предварительной подготовки. В настоящее время технологии производства пара основаны на использовании кожухотрубных дистилляционных аппаратов, которые используются наряду с устройствами обратного осмоса, электродиализа с ионообменными мембранами и при опреснении морской и материковой вод. Внедрение теплообменных аппаратов с непосредственным смешением жидкого металла и испаряемой воды позволит: а) снизить стоимость, упростить конструкцию и изготовление испарителя; б) избавиться от теплопередающих поверхностей, подверженных коррозии, загрязнению, термической и вибрационной усталости; в) снизить гидравлическое сопротивление; г) уменьшить габариты аппарата за счет большей поверхности теплообмена в единице объема.

4) Традиционные кожухотрубные теплообменные аппараты с жидкометаллическим теплоносителем. По данному направлению наиболее перспективно выглядят инновационные жидкометаллические кристаллизаторы для машин непрерывного литья заготовок сталелитейных комплексов, а также промежуточные свинцово-висмутовые контура в нефтеперерабатывающих аппаратах с открытым огневым нагревом.

Исследования проводятся при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEF157916X0136).

Исследование влияния условий жидкометаллического пиролиза отработавших автомобильных шин на состав и форму получаемых продуктов

Харчук С. Е., Ульянов В. В., Гулевский В. А., Кошелев М. М. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, skharchuk@ippe.ru

Ключевые слова: пиролиз, жидкометаллический расплав, свинец, висмут, автомобильные шины, утилизация отходов, дипентен.

В последнее время перед всем мировым сообществом остро стоит проблема утилизации отходов жизнедеятельности человека. Полигоны твердых бытовых отходов (ТБО) занимают огромные территории. Так, только в Московской области около 2-х десятков действующих полигонов и столько же закрытых, общей площадью более 1000 Га.

Сегодня в Физико-энергетическом институте (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ») проводятся исследования по разработке технологии, позволяющей перерабатывать часть накопленных и продолжающих накапливаться отходов, а именно отработавших автомобильных шин. Технология подразумевает термическое бескислородное разложение полимерных составляющих автомобильной шины при ее непосредственном погружении в расплав жидкого металла (Pb, Pb-Bi).

Предварительные результаты экспериментальных исследований показали, что предлагаемая технология переработки позволяет не только эффективно избавляться от накопленных отходов, но и полезно использовать получаемые продукты с возможностью извлечения коммерческой выгоды. Эта технология позволяет получать следующие продукты: твердые в виде металлокорда и углеподобной массы, пиролизную жид-кость и неконденсируемые пиролизные газы.

Газообразные продукты переработки можно сжигать на месте для поддержания заданного температурного режима свинецсодержащего расплава, тем самым снижая энергоемкость процесса утилизации.

Металлокорд можно использовать в качестве вторичного сырья и отправлять на переплавку.

Углеподобную массу можно использовать в качестве сырья для приготовления импортозамещающих сорбентов, а также в качестве черного пигмента красок.

Из пиролизной жидкости, являющейся аналогом синтетической нефти, можно выделить легкие нефтяные фракции (бензин, керосин, лигроин и др.), которые являются ценным топливом. Также эта жидкость содержит вещество дипентен, который является одним из наиболее дорогостоящих компонентов и используется в парфюмерии, косметологии, в качестве нетоксичного растворителя и т. д. Содержание этого компонента определяется условием проведения процесса переработки.

Проведены исследования влияния условий проведения жидкометаллического пиролиза отработавших автомобильных шин на состав и форму получаемых продуктов.

Анализ пиролизной жидкости проводили на хроматографе «Кристалл-5000». В дополнение к хроматографу для анализа пиролизной жидкости использовался массспектрометр низкого разрешения SATURN 4DMS/MS.

Анализ выявил, что в пиролизной жидкости содержится до 30% бензиновых фракций (с температурой выкипания до 180 °C), до 40% керосиновых фракций (с температурой выкипания от 180 до 315 °C) и от 30 до 50% тяжелых нефтепродуктов неза-

висимо от способа пиролиза. То есть пиролизная жидкость по своему фракционному составу близка к отечественной нефти марки Urals.

Важно отметить, что состав пиролизной жидкости различается в зависимости от температуры проведения процесса. Наблюдается общая тенденция уменьшения количества низкокипящих фракций с ростом температуры пиролиза.

При проведении анализа состава в пиролизной жидкости было обнаружено достаточно большое количество вещества – дипентен (1-метил-4-(1-метилвинил). Ввиду того, что дипентен является одним из наиболее дорогостоящих компонентов полученной пиролизной жидкости и имеет весьма широкий спектр применения благодаря своим уникальным свойствам, при проведении исследований ему было уделено отдельное внимание.

Конструкция лабораторной установки, на которой проводились исследования, позволяет конденсировать получаемые жидкие продукты многостадийно. Состав жидкой фракции, сконденсированной в холодном сепараторе, тщательно исследовался на содержание в нем дипентена.

Также получена зависимость содержания дипентена в жидкости в зависимости от типа перерабатываемого сырья.

Газообразные продукты подвергались анализу фракционного состава.

Как показали результаты, состав получаемых газообразных продуктов различается в зависимости от температуры проведения процесса. Достаточно хорошо просматривается тенденция уменьшения углеродного числа в углеводородах метанового ряда.

Результат анализа фракционного состава продуктов показал, что качественно фракционный состав практически не меняется в температурном диапазоне 370–550 °C. Однако процентное содержание компонент как в пиролизной жидкости, так и в газе достаточно сильно отличается в зависимости от температуры. Следует также учитывать тот факт, что соотношение получаемых продуктов жидкость-газ-твёрдые вещества сильно зависит от температуры протекания процесса. Установлено, что наиболее оптимальным режимом с точки зрения получения максимального количества жидких продуктов является проведение процесса пиролиза при температуре (450±20) °C.

Проведя количественный анализ фракционного состава получаемых жидких продуктов можно заключить, что наиболее оптимальным режимом с точки зрения получения наиболее ценных веществ является температурный интервал пиролиза (430±20) °C. Это обусловлено наибольшим выходом дипентена, приемлемым количеством низкокипящих веществ и относительно небольшим количеством парафиновых фракций.

Исследования проводятся при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEF157916X0136).

О возможности применения тепловых труб в инновационных ядерных и неядерных технологиях

Аксенов Ю. В., Логинов Н. И., Михеев А. С.

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

Ключевые слова: тепловая труба, ядерные, химические и электронные технологии, теплоперенос, термостатирование, изотермические условия, синтез, термообработка.

Тепловая труба является автономным теплопередающим устройством, в котором перенос тепла осуществляется за счет процессов испарения и конденсации. Естественная циркуляция теплоносителя в замкнутом двухфазном контуре осуществляется в результате действия силы тяжести и/или действия капиллярных сил в порах капиллярно-пористой структуры.

Благодаря тому, что тепловая труба работает на естественных принципах, ее использование привлекательно в ядерной технологии для создания пассивных систем безопасности. Одной из таких систем реакторных установок является система аварийного отвода тепла (расхолаживания). Задача этой системы – отвод остаточного тепловыделения к конечному поглотителю (обычно воздуху) в условиях, когда активные системы уже не могут быть задействованы или же не справляются. Другими возможными применениями тепловых труб для увеличения безопасности, надежности и эффективности реакторных установок могут быть:

– охлаждение оборудования реакторной установки, в том числе, встроенного в бак реактора;

 – подвод высокопотенциального тепла из бака реактора (активной зоны) к потребителю для реализации энерготехнологических циклов и/или технологических нужд;

- термостатирование и термостабилизация оборудования реакторной установки и др.

Благодаря таким присущим тепловым трубам свойствам, как работа в близком к изотермическому режиме и способности к трансформации теплового потока, они могут быть использованы в инновационных химических технологиях. Наибольший интерес представляют газофазные каталитические процессы с изотермическими условиями для катализатора и близкими к изобарическим условиями для обрабатываемой среды. При этом достигается максимальная эффективность процесса конверсии углеводородов. Синтез большинства ценных углеводородов производят при температурах не более 600 °C. Высокооктановый бензин из метанола или синтез газа получают при температуре 300–450 °C, синтез протекает с выделением тепла.

По критериям качества теплоносителя, его термической стойкости, химической активности, взаимодействию с конструкционными материалами, токсичности и стоимости выбраны и рекомендованы рабочие вещества для диапазона температуры 300–600 °C. Вещества используются в области термодинамической диаграммы равновесия жидкость-пар при давлении насыщения пара не менее 3 кПа.

Для доказательства осуществимости создания крупногабаритных систем теплопереноса на базе тепловых труб для реакторных (химической и ядерной) технологий создана экспериментальная модель тепловой трубы высотой 10 м, отношением длина/диаметр ~100 с корпусом из нержавеющей стали и жидкометаллическим теплоносителем – натрием. Модель испытана на стенде с электрообогревоми контролируемым сбросом тепла (методом калориметрии) при температуре до 600 °C. В результате экспериментальных исследований получены поля температуры и характеристики теплопередачи, а также изучен характер поведения модели в пусковых и переходных режимах при изменении условий подвода или отвода тепла. По результатам экспериментальных исследований сделан вывод о возможности создания крупногабаритных систем передачи тепла на базе тепловых труб с высокими теплотехническими параметрами.

Ключевое свойство изотермичности тепловой трубы позволяет использовать ее:

– для термообработки изделий (спекание пористых материалов, снятие механических напряжений в материалах для электроники);

- нужд метрологии (калибровка пирометров, тепловизоров);

– охлаждения при формировании термочувствительных материалов (стекло, пластмасса, пористые материалы);

– нагрева или охлаждения среды при проведении процесса каталитической конверсии углеводородов.

В докладе приведены примеры разработки в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» устройств, использующих при функционировании свойство изотермичности тепловой трубы: вакуумная изотермическая печь, термостат для обработки электронных материалов, модель абсолютно черного тела, изотермические прессформы для формования изделий из стекла, тепловые панели для химических конверторов.

Проблема накопления и эффективного использования низкопотенциального тепла

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

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

Ключевые слова: низкопотенциальное тепло, АЭС, тепловой аккумулятор, эффективность, экосистема, окружающая среда.

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов представляет сегодня собой одну из глобальных мировых проблем, успешное решение которой будет иметь определяющее значение не только для дальнейшего развития мирового сообщества, но и для сохранения среды его обитания.

Известно, что большинство технологических процессов, работа многих механизмов и систем сопровождается выделением большого количества тепловой энергии, которая не используется, а рассеивается в окружающей среде и называется «сбросное тепло». Сбросное тепло является низкопотенциальным, поскольку имеет температуру незначительно выше температуры окружающей среды. Его выделяют как техногенные системы, созданные людьми, так и источники естественного происхождения. Можно перечислить следующие источники низкопотенциального тепла:

1) Промышленные предприятия: теплота сжатия газов в компрессорах, теплота продуктов сгорания различного рода топлива;

2) Системы водяного охлаждения, стоки промышленных предприятий и очистных сооружений (теплота жидкости);

3) Биогазовые установки, газогенераторные установки, пиролизеры (теплота сгорания топлива, сгенерированного в этих установках);

4) Тепловые движители транспортных средств (теплота выхлопных газов);

5) Нефтеперерабатывающие заводы (теплота сгорания попутного газа);

6) Птицефабрики, скотофермы и т. д. (энергия биологического топлива);

7) Лесоперерабатывающие предприятия (энергия сжигания древесины).

Атомные электрические станции также являются крупными источниками низкопотенциальной тепловой энергии, не пригодной для промышленного использования вследствие низкого температурного уровня $t \approx 30$ °C. Эффективное использование «сбросного» тепла позволит решить ряд экономических и экологических проблем в атомной энергетике. Возможность накопления такого тепла приведет к более эффективному использованию топливных ресурсов, позволит отказаться от градирен. Кроме того, во много раз снизится тепловое загрязнение окружающей среды. Помимо чисто экономических потерь, связанных с отсутствием утилизации значительной части вырабатываемой энергии, сброс тепла через существующие системы охлаждения приводит к экономическому ущербу в регионе. Так, тепловое загрязнение водоема-охладителя меняет естественный статус его экосистемы. В качестве водоемов-охладителей АЭС в России достаточно часто используются природные водные системы. Поэтому на них должны распространяться все экологические требования по охране природных вод от загрязнения, в том числе и теплового.

Работы по утилизации низкопотенциального тепла являются актуальными и ведутся во всех развитых странах мира. Например, автоконцерн BMW разрабатывает системы электроснабжения автомобиля, использующие в качестве сырья тепло выхлопных газов. Фирма Siemens инвестирует в проекты автономной системы электроснабжения завода, работающей на разнице температур, возникающей в технологическом процессе и т. д.

В настоящем докладе представлена информация об исследованиях возможности использования низкопотенциального тепла, ведущихся в различных странах мира.

Алфавитный указатель

Авдеев Е.Ф. 79, 80, 81 Аксенов Ю.В. 176 Албутова О.И. 155 Алексеев В.В. 89, 90, 91 Алчагиров Б.Б. 38, 40, 42 Арнольдов М.Н. 46, 75 Астахов В.В. 141 Асхадуллин Р.Ш. 16, 36, 172 Аулова О.В. 23 Афанасьев А.В. 112, 139 Ашурко Ю.М. 20 Баисов А.М. 150 Баймаруков А.Ш. 59 Балунов Б.Ф. 106 Баясхаланов М.В. 146 Белавина Е.А. 70 Белозеров В.И. 125 Беляев И.А. 70, 71, 72 Бережной С.Н. 157 Бирюков Д.А. 70, 71, 72 Блохина А.Н. 151 Богданов С.В. 157 Борисов В.В. 90 Бугаева В.А. 147 Бугреев М.И. 82 Букин Н.В. 23, 141 Бутов А.А. 136, 138 Быков М.А. 23, 141 Вальес Н.Г. 149 Варсеев Е.В. 89 Васяшин А.В. 44 Вашляев Ю.Н. 157 Верещагина Т.Н. 25, 26, 27 Виноградов М.М. 54 Волков А.В. 133 Волков В.Ю. 139 Волков С.Е. 114 Ганичев Н.С. 50, 52, 53 Гаспаров Д.Л. 23, 141 Генералов Е.В. 158, 164 Генин Л.Г. 68 Глалышев Ю.А. 135 Глебов А.П. 21 Гончар Н.И. 87 Гордеев С.С. 61 Грабежная В.А. 77 Гулевский В.А. 170, 172, 174

Даниленко В.П. 156 Дворников П.А. 156 Дельнов В.Н. 24 Дмитриев С.М. 100, 101, 103, 104 Добров А.А. 100, 101, 103 Доронков Д.В. 101, 103, 104 Душенков С.Б. 134 Дьяченко Я.В. 144 Ельшина Н.В. 156 Забиров А.Р. 54, 64 Забудько А.Н. 82 Загорулько Ю.И. 50, 52, 53 Зайцев Д.В. 114 Зейгарник Ю.А. 48 Иванов Е.Ф. 55 Иванов К.Д. 36, 82, 85, 94 Ивлев О.А. 18, 59 Ивочкин Ю.П., 48 Исаев А.Ю. 110 Казанцев А.А. 142, 143 Калманович В.В. 135 Калякин Д.С. 117 Канин П.К. 54 Капица Д.В. 148 Каплунов С.М. 149 Каракуш Джихан 80 Каргин Т.Ю. 126 Кебадзе Б.В. 158, 162, 164, 165 Киреева Д.Р. 147 Климонов И.А. 138 Ковалев Д.М. 159, 160 Ковтун С.Н. 156 Коков З.А. 40 Кондратович Ф.В. 156 Коновалов М.А. 53, 89, 91, 170 Корниенко Ю.Н. 28, 152 Корнилов В.П. 159, 160, 163 Корсун А.С. 146 Косой А.С. 166 Костычев П.В. 73 Котляр А.В. 70 Кошелев М.М. 74, 170, 174 Красин В.П. 32 Кремнев И.С. 126 Круглов А.Б. 96, 97 Круглов В.Б. 96, 97

Кубриков К.Г. 48 Кудашов И.Г. 138 Кудряев А.А. 156 Кузина Ю.А. 11, 55 Кясова О.Х. 38, 40 Лаврова О.В. 92 Лагутин А.А. 158, 162 Легких А.Ю. 16, 92, 93 Легчанов М.А. 103 Леденева О.М. 118 Листратов Я.И. 70 Литышев А.В. 23, 141 Ловчев Р.А. 163 Лубина А.С. 63 Лукьянов Д.А. 155, 156 Логинов Н.И. 25, 26, 176 Лучинкин Н.А. 72 Лычаков В.Д. 106 Лякишев С.Л. 151 Макаров В.В. 112, 139 Матвиенко И.В. 112 Мастеров А.В. 82 Матяш А.С. 106 Махин В.М. 17, 98 Махин И.В. 98 Мельников В.П. 16, 172 Мельников И.А. 66 Меринов И.Г. 146 Милинчук В.К. 125 Митрофанова О.В. 18, 57, 59 Михеев А.С. 77, 176 Мищенко А.А. 146 Морозов А.В. 117, 119, 121, 124, 178 Моряков А.В. 133 Мосунова Н.А. 136 Мусихин Ю.А. 46 Николаев А.Н. 82 Николаев С.А. 82 Николаева А.В. 23, 99, 141 Ниязов С.-А.С. 35, 85, 94 Новиков А.О. 68 Носенко А.П. 139 Олексюк Д.А. 147 Орлов А.И. 11 Орлов Ю.И. 172 Осипов А.А. 35, 36, 74, 94 Пантюшин С.И. 23, 141 Перевозников С.В. 90

Перепелица Н.И. 115 Пивоваров В.А. 168 Питык А.В. 124, 178 Поваренский Р.Б. 148 Поздеева И.Г. 57 Попова Т.В. 143 Посаженников А.М. 108, 110 Посысаев Д.А. 150 Прибатурин Н.А. 136, 138 Прокопьев А.Ю. 134 Пронин А.Н. 100, 101, 103, 104 Пятницкая Н.Ю. 66, 71 **Р**агулин С.В. 124 Разуванов Н.Г. 66, 71, 72, 73 Раскач К.Ф. 133 Рознин И.М. 70 Рухляда Н.Я. 44 Рязанов А.В. 100, 101, 103, 104 Рязаниев В.А. 54 Салахова А.А. 125 Самолысов А.В. 149 Сардов П.А. 71 Саутин С.А. 110 Сахипгареев А.Р. 119, 124, 178 Свиридов В.Г. 14, 68, 70, 71, 73 Свиридов Е.В. 66, 71 Селезнев А.В. 112 Сергеев В.В. 30 Сергеев Вл.В. 142, 143, 144 Сергеев С.Г. 114 Серегина Е.В. 135 Скибин А.П. 139 Скобеев Д.А. 93 Смирнова А.А. 64 Смирнова В.О. 79, 81 Солнцев Д.Н. 100, 103, 104 Соломонова Н.В. 133 Сорокин А.П. 11, 55, 61, 91 Сорокин В.Д. 101, 103, 104 Союстова С.И. 32 Старухина К.С. 106 Степанов О.Е. 152 Степович М.А. 135 Стефани А.Г. 158, 160, 165 Стороженко А.Н. 16 Стручалин П.Г. 96, 97 Супотницкая О.В. 143
Таова Т.М. 42 Томковид Б.Г. 114 Тревгода М.М. 166 Торбенкова И.Ю. 91

Узденова А.Н. 40 Ульянов В.В. 16, 74, 170, 172, 174 Ульяновский Д.В. 114 Уртенов Д.С. 18 Усов Э.В. 136, 138

Федоринов А.В. 59 Феофилактова Ю.М. 64 Филиппов М.Ф. 146 Фомин А.Н. 162, 163, 164, 165 Фрик П.Г. 14 Фурсов В.Ю. 149

Харитонов В.С. 96, 97 Харламова А.А. 154 Харчук С.Е. 74, 170, 174 Хоконов Х.Б. 42 Хробостов А.Е. 101, 103, 104 Чан Хонг Фук 79 Чепоров Р.Ю. 85 Чернов В.А. 82 Черныш Д.Ю. 72 Чернухина Ю.В. 133 Чомчоев А.И. 166 Чуркин А.Н. 17, 99, 114 Чухно В.И. 136, 138

Шевченко С.А. 64 Шлёпкин А.С. 121, 124, 178 Шмаль И.И. 122 Шурупов В.А. 162, 164, 165

Щеглов А.А. 106 Щеколдин В.В. 154 Щербаков С.И. 127, 130

Юдин А.В. 101

Ягов В.В. 54 Ягодкин И.В. 108, 110 Яшников Д.А. 64

Подписано в печать 24.04.2018. Тираж 200 экз. Заказ № 127. Уч.-изд. л. 10,3. Усл. п. л. 10,6.

Отпечатано в ОНТИ ГНЦ РФ ФЭИ. 249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1. АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского».