

ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

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

Научно-техническая конференция

ТЕПЛОФИЗИКА РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА – 2022

Тезисы докладов

14 – 16 сентября 2022 год

Обнинск



УДК 536.24 : 621.039.524.4 : 621.039.58

Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2022) / Сборник тезисов докладов на научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2022)», 14 – 16 сентября 2022, г. Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2022. – 168 с.

Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2022)» содержит материалы теплофизических исследований, представленные на конференцию и направленные на решение задач повышения эффективности и безопасности как легководных реакторов на тепловых нейтронах, так и быстрых реакторов с различными жидкометаллическими теплоносителями (Na, Pb, Pb-Bi), а также реакторов с водой при сверхкритическом давлении. В пленарных докладах конференции представлен ряд принципиально новых результатов, полученных в последнее время в области гидродинамики, теплообмена и технологии теплоносителей применительно к ядерным энергетическим установкам (ЯЭУ) нового поколения, такие как: научные открытия в области гидродинамики раздающих коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ, предотвращение явления кризиса закрученного потока в целях повышения надежности работы ЯЭУ, высокотемпературная энерготехнология на основе реактора на быстрых нейтронах для производства электроэнергии, водорода и других применений. Также проблемные доклады по таким актуальным вопросам теплофизики ЯЭУ, как использование тяжелого теплоносителя в реакторных установках, совершенствование пассивных систем охлаждения активной зоны реакторов ВВЭР, теплогидравлика парогенераторов ЯЭУ с жидкометаллическим охлаждением и т. д. На секционных заседаниях конференции представлены доклады, освещающие современное состояние и проблемы проводимых теплофизических исследований по широкому кругу ключевых вопросов теплофизики ЯЭУ, включая гидродинамику и теплообмен в водоохлаждаемых реакторных установках и с жидкометаллическими теплоносителями, физическую химию и технологию жидкометаллических теплоносителей, тепло-массообмен, магнитную гидродинамику, вибрацию и акустику в энергетических установках, результаты разработки и валидации расчетных моделей, теплофизических кодов, их верификации и данные численного моделирования гидродинамики и тепло- и массопереноса в номинальных и аварийных режимах в обоснование безопасности ЯЭУ, результаты разработки и испытаний датчиков, систем контроля и оборудования для реакторных установок, использование технологий ядерной энергетики в других отраслях экономики России.

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

Под общей редакцией

докт. техн. наук А. П. Сорокина

Технический редактор Н. А. Денисова

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные доклады

Научная школа по теплофизике ЯЭУ. Ведущие ученые научной школы	10
<i>Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Алексеев В.В., Асхадуллин Р.Ш.</i>	
Научные открытия АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» в области гидродинамики раздающих коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ	17
<i>Дельнов В.Н.</i>	
Предотвращение явления кризиса закрученного потока в целях повышения надежности работы ядерных энергетических установок	18
<i>Митрофанова О.В.</i>	
Актуальные вопросы моделирования теплогидравлических процессов в реакторах на быстрых нейтронах (эксперимент и теория)	20
<i>Кузина Ю.А., Сорокин А.П., Денисова Н.А.</i>	
Использование опыта создания и эксплуатации одноконтурных реакторов с кипением и ядерным перегревом теплоносителя для проектирования реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя	22
<i>Махин В.М., Пиминов В.А., Семишкин В.П., Чуркин А.Н., Чусов И.А., Латин А.В.</i>	
Исследование высокотемпературной энерготехнологии с реакторами на быстрых нейтронах для производства электроэнергии, водорода и других инновационных применений	24
<i>Сорокин А.П., Алексеев В.В., Иванов А.П., Кузина Ю.А.</i>	
Актуальные теплофизические проблемы и пути совершенствования пассивных систем охлаждения активной зоны реактора ВВЭР	26
<i>Морозов А.В., Калякин Д.С., Сахипгареев А.Р., Шлёпкин А.С., Сошкина А.С.</i>	
Единая интеграционная платформа и интерфейс расчетных кодов в SimInTech	27
<i>Колотыркин И.П.</i>	
Научно-технические достижения в области технологии тяжёлых жидкометаллических теплоносителей	29
<i>Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю., Садовничий Р.П., Ульянов В.В., Скобеев Д.А., Иванов К.Д., Лаврова О.В., Ниязов С.-А.С., Посажеников А.М., Мельников В.П., Воронин И.А.</i>	
Экспериментальное исследование взаимодействия свинцово-висмутового теплоносителя со сталью оболочек твэлов	30
<i>Альмяшев В.И., Сулацкий А.А., Витоль С.В., Крушинов Е.В., Котова С.Ю., Шевченко Е.В., Каляго Е.К., Булыгин В.Р., Беляева Е.М., Шуваева Е.Б., Тимчук А.В.</i>	
Теплогидравлические исследования в обоснование парогенераторов реакторных установок с жидкометаллическим охлаждением, проведенные в ГНЦ РФ – ФЭИ	31
<i>Грабежная В.А., Михеев А.С., Алёхин А.В.</i>	
Секция 1. Физическая химия и технология жидкометаллических теплоносителей	
Этюд о составе нестехиометрических оксидов в разбавленных растворах жидкий металл – кислород	34
<i>Осипов А.А., Иванов К.Д.</i>	
Термодинамическое прогнозирование стабильности керамических материалов в бинарном расплаве Sn-20% Li	35
<i>Красин В.П., Союстова С.И.</i>	

Изучение поверхностного натяжения ртути в области отрицательных температур. Краткий обзор	37
<i>Алчагиров Б.Б., Хибиев А.Х.</i>	
Модель переноса продуктов коррозии ниобия в литиевом контуре охлаждения КЯЭУ	39
<i>Гончар Н.И.</i>	
Определение критических точек, которые недостижимы в статических экспериментах	40
<i>Рахель А.Д.</i>	
Определение количества образующейся взвешенной фазы при взаимодействии воды с натрием	41
<i>Алексеев В.В., Борисов В.В., Камаев А.А., Ганичев Н.С., Вищенко А.С.</i>	
Оценка распределения продуктов взаимодействия воды с натрием в натрии.....	43
<i>Алексеев В.В., Борисов В.В., Камаев А.А., Ганичев Н.С., Вищенко А.С.</i>	
Сравнительный анализ массообменных аппаратов для установок с интегральной компоновкой первого контура (теплоноситель – Pb-Bi, его объём – до 30 м ³)	44
<i>Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю.</i>	
Подход к нормированию кислородного режима в жидкометаллических теплоносителях	45
<i>Легких А.Ю., Асхадуллин Р.Ш., Иванов К.Д., Лаврова О.В.</i>	
Исследование кинетики процесса удаления водорода с помощью гранулированного оксида меди в бескислородной газовой среде.....	47
<i>Скобеев Д.А., Легких А.Ю.</i>	
Исследование особенностей проведения водородной очистки циркуляционных контуров со свинецсодержащими теплоносителями при помощи механических диспергаторов газовой фазы	48
<i>Кошелев М.М., Ульянов В.В., Кремлёва В.С.</i>	
Изучение влияния понижения температуры на эффективность водородной очистки реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем	51
<i>Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С.</i>	
Анализ термодинамических особенностей поведения системы «Na – K – O»	52
<i>Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С.</i>	
Основные направления совершенствования моделей окисления конструкционных сталей в ТЖМТ	54
<i>Ниязов С.-А.С., Иванов К.Д., Осипов А.А.</i>	
Влияние термодинамической активности кислорода на границе раздела «сталь – теплоноситель» на массообмен железа и хрома	56
<i>Лаврова О.В., Легких А.Ю.</i>	
Газофазное окисление, как метод нейтрализации недренируемых остатков ЩЖМТ в оборудовании	57
<i>Смыков В.Б., Легких К.Г.</i>	
Секция 2. Гидродинамика и теплообмен в реакторных установках с жидкометаллическими теплоносителями	
Моделирование процесса кипения жидких металлов в модельных сборках быстрых реакторов в аварийных режимах	58
<i>Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Денисова Н.А., Сорокин Г.А.</i>	

Влияние упругой деформации, создаваемой перепадом давления между контурами, на теплоотдачу в пластинчатых теплообменных аппаратах	60
<i>Матяш А.С., Лычаков В.Д.</i>	
Моделирование пространственной гидродинамики в активной зоне реакторной установки стенда КМ-1	62
<i>Вакарин А.В., Грановский В.С., Грицай А.С., Румянцев С.Н.</i>	
Исследование особенностей теплогидравлики в ТВС быстрого натриевого реактора с широким относительным шагом решетки.....	64
<i>Бландинский В.Ю., Лубина А.С.</i>	
Экспериментальное исследование пространственной структуры поперечных течений в пучке имитаторов твэлов с проволочной навивкой	67
<i>Шестаков М.В., Токарев М.П.</i>	
Экспериментальные исследования влияния изменения геометрии основных элементов проточной части на напорно-расходные характеристики осевого насоса для перекачки свинцового теплоносителя.....	68
<i>Волков Н.С., Бокова Т.А., Боков П.А., Маров А.Р., Кокшайский А.Д.</i>	
Анализ теплогидравлических характеристик модулей ПГН-272 при замене материала теплообменных труб	69
<i>Алюнин А.Г., Халутин А.А., Лякишев С.Л.</i>	
Секция 3. Гидродинамика и теплообмен в водоохлаждаемых реакторах	
Исследование процессов вихреобразования в первом контуре реакторов типа ВВЭР.....	70
<i>Митрофанова О.В., Поздеева И.Г.</i>	
Моделирование теплогидравлических процессов в каналах паропроизводящих установок.....	73
<i>Митрофанова О.В., Федоринов А.В., Старовойтов Н.А.</i>	
Экспериментальные и расчетные исследования гидродинамической картины течения теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР	75
<i>Доронков Д.В., Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Добров А.А., Доронкова Д.С., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.</i>	
Исследование процессов перемешивания петлевых потоков теплоносителя в опускной камере ЯЭУ	77
<i>Дмитриев С.М., Рязанов А.В., Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Демкина Т.Д., Доронкова Д.С., Снегирева А.С., Шадрин В.С., Шуваева М.Ю.</i>	
Экспериментальные исследования гидродинамики теплоносителя в топливных кассетах атомных станций малой мощности и перспективных плавучих энергоблоков.....	79
<i>Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.</i>	
Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик потока однофазного теплоносителя при неизотермическом смешении в тройниковом узле типа «встречный впрыск»	81
<i>Рязанов Р.Р., Мамаев А.В., Соборнов А.Е., Кусков А.М., Кудашкин И.А.</i>	
Исследование поведения оболочки толерантного твэла ВВЭР из сплавов Э110 с защитным покрытием и 42ХНМ при аварии LOCA	83
<i>Ананич Р.О., Базюк С.С., Беспечалов Б.Н., Киселев Д.С., Полунин К.К., Стойков К.В., Ягнятинский Д.А.</i>	

Методики оценочного расчета размера отложений в кольцевых каналах энергооборудования ЯЭУ по данным гидравлических испытаний	86
<i>Писаревский М.И., Голяев Д.В., Федосеев В.Н.</i>	
Инженерная методика оценки повышения давления при конденсационном гидравлическом ударе	88
<i>Чуркин А.Н.</i>	
Исследование процессов теплопередачи при конденсации пара из парогазовой смеси для поддержания работоспособности парогенераторов ВВЭР в аварийном режиме	90
<i>Сахингареев А.Р., Морозов А.В., Шлёпкин А.С.</i>	
Экспериментальное моделирование течения потока теплоносителя за смесительными решетками ТВС-КВАДРАТ	92
<i>Снегирёва А.С., Хробостов А.Е., Добров А.А., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Демкина Т.Д.</i>	
Исследование влияния тепломассообменных процессов на работу пассивных систем безопасности ВВЭР в случае аварийной ситуации.....	93
<i>Шлёпкин А.С., Морозов А.В., Сахингареев А.Р., Калякин Д.С.</i>	
Исследование интенсификации теплосъёма в канале с одиночным подвижным турбулизатором.....	95
<i>Перепелица Н.И.</i>	
Расчетно-экспериментальное исследование критического теплового потока на моделях ТВС реакторов РWR с аксиальной неравномерностью энерговыделения на стенде КС в НИЦ «Курчатовский институт».....	97
<i>Зубков А.Г., Олексюк Д.А., Щербинин А.А., Домрачев П.А., Анохин Ю.М., Вертиков Е.А.</i>	
Анализ влияния различных параметров на эффективность использования водного аэрозоля для охлаждения воздушных теплообменников СПОТ ВВЭР.....	98
<i>Смирнов А.М., Морозов А.В.</i>	
Секция 4. Тепломассообмен, магнитная гидродинамика, вибрации и акустика в энергетических установках	
Экспериментальное исследование механизмов гидродинамического возбуждения вибраций твэлов в ТВС ВВЭР-440	99
<i>Перевезенцев В.В., Солонин В.И.</i>	
Анализ характеристик, связанных резонаторов Гельмгольца	102
<i>Верещагина Т.Н., Кудряева Ю.В., Михеев А.С.</i>	
Выбор и обоснование конструкции термоакустического холодильника	103
<i>Кудряева Ю.В., Верещагина Т.Н., Михеев А.С.</i>	
О некоторых свойствах пульсаций температуры в жидких металлах	104
<i>Осипов А.А., Ниязов С-А.С.</i>	
Исследование влияния магнитного поля на динамику струйного течения жидкого металла	105
<i>Мионов И.С., Беляев И.А., Листратов Я.И., Лучинкин Н.А., Свиридов Е.В.</i>	
Исследование особенностей смешанной конвекции расплавов солей в условиях, характерных для реакторов нового поколения	106
<i>Белавина Е.А., Пятницкая Н.Ю.</i>	
Гидродинамика и теплообмен при подъёмном течении жидкого металла в трубе в поперечном магнитном поле при смешанной турбулентной конвекции	108
<i>Лучинкин Н.А., Разуанов Н.Г., Полянская О.Н., Соколов М.А., Шенягин Е.М.</i>	

Магнито-конвективные пульсации при опускном течении жидкого металла в вертикальной трубе	109
<i>Сардов П.А., Листратов Я.И., Беляев И.А.</i>	

Секция 5. Расчетные модели, коды и результаты численного моделирования

Согласованное моделирование тепловых и нейтронно-физических параметров в активной зоне реактора с водяным теплоносителем сверхкритического давления	111
<i>Зборовский В.Г., Хоружий О.В., Лиханский В.В., Елкин Н.Н., Чернецкий М.Г., Аверченко П.А., Грачев Д.С., Хорохорин М.В., Белоусов В.И., Давиденко В.Д., Дьячков И.И., Иоаннисиан М.В., Малков М.Р.</i>	
Исследование гидродинамики и тепломассопереноса в малоразмерных макетах ТВС применительно к активной зоне РУ БРЕСТ-ОД-300	113
<i>Крапивцев В.Г., Марков П.В., Солонин В.И., Гетья С.И.</i>	
Применение CFD-программы ЛОГОС для получения граничных условий для программы поячейкового расчета ТВС активной зоны	115
<i>Дмитриев С.М., Добров А.А.</i>	
Расчётное исследование в программе для ЭВМ FlowVision трёхмерного течения теплоносителя в реакторе БН при расхолаживании через межпакетное пространство активной зоны	117
<i>Диденко Д.В., Никаноров О.Л., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф., Аксенов А.А., Жестков М.Н., Щеляев А.Е.</i>	
Расчетное исследование критического теплового потока на моделях ТВС реакторов PWR	118
<i>Вертиков Е.А., Олексюк Д.А., Зубков А.Г., Оскирко В.А.</i>	
Моделирование течения воздуха в системе охлаждения блока верхнего РУ ВВЭР с применением CFD	119
<i>Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А., Кудрявцев О.В.</i>	
Валидация программы THOR в области естественной циркуляции теплоносителя в целях расчетного обоснования РУ нового поколения «СВЕТ-М»	120
<i>Новикова Г.С., Аулов И.В., Рогов А.А.</i>	
Моделирование обменных расходных характеристик макета напорного коллектора БРЕСТ-ОД-300	122
<i>Афремов Д.А., Сапожников И.С., Солонин В.И.</i>	
Выполнение претестовых расчетов и разработка экспериментальной программы стенда ПСБ-ВВЭР в рамках международного проекта АЯЭ ОЭСР «ETHARINUS»	123
<i>Латкин Д.Ю., Петкевич И.Г.</i>	
Расчетная оценка выхода радиолитического водорода из бассейна выдержки ЭГП-6 Билибинской АЭС при запроектной аварии	124
<i>Казанцев А.А., Супотницкая О.В., Сергеев Вл.В., Астахова Н.Э.</i>	
Сравнение расчетных программ RELAP5/Mod3.4 и KOPCAP (V3.038.002) на примере системы пассивного отвода тепла реакторной установки с ВВЭР-1000	127
<i>Менюк Д.С.</i>	
Восстановление полей внутри активной зоны реакторных установок по показаниям надзонных датчиков	129
<i>Болнов В.А., Богданова Е.В., Малкин С.А., Ушатиков А.С., Емелина А.С.</i>	

Результаты валидации моделей, разработанных на базе программы BURAN	130
<i>Болнов В.А., Богданова Е.В., Малкин С.А.</i>	
Расчетное исследование теплогидравлических характеристик ядерного реактора на быстрых нейтронах, охлаждаемого CO ₂	131
<i>Семишин В.В., Кавун О.Ю.</i>	
О подходах к проведению натурных тепловых испытаний для обоснования безопасности ТУК с ОЯТ	132
<i>Курьиндин А.В., Киркин А.М., Каримов А.З., Карякин М.Ю.</i>	
Расчётный анализ аварии с блокировкой проходного сечения ТВС РУ БН	133
<i>Анфимов А.М., Кирилов И.Н.</i>	
Анализ теплоотводной аварии РУ БН и мер по её управлению.....	134
<i>Анфимов А.М., Кузнецов Д.В.</i>	
Расчётные исследования расхолаживания реактора в аварии с разрывом циркуляции первого контура РУ БН.....	135
<i>Анфимов А.М., Тимин Д.А.</i>	
Преобразования при структурном описании математических моделей систем ядерных энергоустановок.....	136
<i>Тимофеев К.А., Антоненко А.С., Петухов В.Н.</i>	
Валидация программы ТЕМПА-СК на основе экспериментальных данных для пучков стержней, охлаждаемых средами при сверхкритических давлениях.....	137
<i>Баисов А.М., Чуркин А.Н.</i>	
Численное моделирование радиационного разогрева конструкционных элементов гамма-установки	138
<i>Картанов С.А., Плужан К.Г., Шарифетдинова К.В., Щербакова К.А.</i>	
Исследование чувствительности результатов расчетов охлаждения ОТВС в приреакторных бассейнах выдержки к параметрам дискретизации расчетных моделей кода КОРСАР/ГП.....	139
<i>Акименкова Е.Ю., Гагулин П.С., Бедретдинов М.М., Степанов О.Е.</i>	
Термодинамические данные для расчета высокотемпературного водородного показателя РН _г водного теплоносителя реакторных установок сверхкритических параметров.....	141
<i>Харитонова Н.Л., Гурбанова Ш.А.</i>	
Применение CFD подхода для моделирования теплогидравлических процессов в упаковочном контейнере ТУК-13.....	144
<i>Пугачёв М.А., Олексюк Д.А., Захаров Р.М., Оскирко В.А.</i>	
Гидродинамический расчет распределения плотности воздушно-водяной смеси по элементам затопленного чехла транспортного в ходе слива воды	145
<i>Оскирко В.А., Олексюк Д.А., Захаров Р.М., Пугачёв М.А., Вертиков Е.А.</i>	
CFD моделирование температурных режимов 19-стержневой электрообогреваемой модели ТВС на воздухе, валидация на экспериментальных данных.....	146
<i>Захаров Р.М., Олексюк Д.А., Пугачёв М.А., Оскирко В.А.</i>	
Определение температурного состояния поглощающего элемента при нарушении нормальных условий эксплуатации.....	147
<i>Полевой М.А., Гордеев Д.С., Юдахин В.В., Ягов П.В.</i>	

Секция 6. Датчики, системы контроля и оборудование для реакторных установок

Обеспечение безопасного обращения с ОЯТ стенда КМ-1

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» 148
Иорданский М.Ю., Соколов В.Ю.

Экспериментальное обоснование работоспособности вариантов методов
измерения уровня тяжелого жидкометаллического теплоносителя..... 150
*Бокова Т.А., Мельников В.И., Иванов В.В., Маров А.Р., Боков П.А.,
Волков Н.С., Львов А.В., Мильков С.А.*

Измерение скорости звука в жидком свинце..... 152
Кондратьев А.М., Рахель А.Д.

Оценка относительной скорости дегазации в натриевом теплоносителе
реактора на быстрых нейтронах 153
Гончар Н.И., Дмитриев Д.В.

Градуировка электромагнитного насоса-расходомера 154
Брагин Д.С., Верещагина Т.Н., Логинов Н.И.

Обнаружение аномальных событий системы обнаружения свободных и
слабозакрепленных предметов при помощи сверточного автоэнкодера..... 155
Аркадов Г.В., Коцоев К.И., Трыкова И.В.

Расчетно-экспериментальное обоснование характеристик фильтрующего
материала для фильтра механической очистки свинцово-висмутового сплава..... 157
*Воронин И.А., Мельников В.П., Посаженников А.М.,
Зуборева М.В., Добони К.А.*

Исследование закономерностей термической деструкции отработавших
ионообменных смол в свинецсодержащих расплавах 158
Кремлёва В.С., Ульянов В.В., Асхадуллин Р.Ш., Кошелев М.М., Харчук С.Е.

Секция 7. Использование технологий ядерной энергетики в других отраслях

Исследования в обоснование возможности применения натрий-калиевого
теплоносителя в неядерных отраслях (датчики давления)..... 160
Комаровский В.А., Ульянов В.В., Кошелев М.М., Глушаков Д.А.

Особенности переработки сплава натрий-калий, загрязнённого ртутью 162
Кононюк М.Х., Легких К.Г., Смыков В.Б.

Ресурсные характеристики ионообменных смол, применяемых
в обоснование водно-химического режима водяных контуров
экспериментальных установок и стендов 164
Сахипгареев Д.Р., Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С., Михеев А.С.

Проблемы получения высокотемпературной стали с использованием
термитных реакций 166
*Загорулько Ю.И., Коновалов М.А., Ильичева Н.С., Вищенко А.С.,
Соломатин А.Е., Ганичев Н.С.*

Моделирование теплопередачи в каналах щелевой формы машин
непрерывного литья заготовок с инновационным свинцово-висмутовым
кристаллизатором..... 167
Коновалов М.А., Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С., Харчук С.Е.

Пленарные доклады

Научная школа по теплофизике ЯЭУ. Ведущие ученые научной школы

Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Алексеев В.В., Асхадуллин Р.Ш.

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

Ключевые слова: научная школа, ядерные реакторы, вода, жидкие металлы, эксперимент, расчетные коды, гидродинамика, теплообмен, кризис теплообмена, турбулентный перенос, кипение, конденсация, физическая химия, технология, контроль примесей, очистка, безопасность.

Формирование научной школы по теплофизике ЯЭУ «Теплообмен, физическая химия и технология теплоносителей в энергетических системах» связано с развитием в нашей стране и в мире программы создания ядерных энергетических установок (ЯЭУ) для атомных электростанций (АЭС), флота и космоса, а также с решением новых задач — термоядерные и электроядерные установки и нейтронно-генерирующие мишени.

Основателем научной школы явился академик РАН В.И. Субботин. Учеными, внесшими наиболее значительный вклад в развитие научных направлений, лидерами научной школы явились:

- гидродинамика в каналах, стержневых и коллекторных системах реакторного и теплообменного оборудования (Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н., Верещагина Т.Н., Левченко Ю.Д., Федотовский В.С.);
- теплогидравлика в каналах, стержневых системах ядерных реакторов, теплообменниках и парогенераторах, теплообменном оборудовании (Жуков А.В., Богословская Г.П., Грабежная В.А., Иванов Е.Ф., Кузина Ю.А., Опанасенко А.Н., Рачков В.И., Сорокин А.П., Ушаков П.А., Юрьев Ю.С.);
- моделирование турбулентной микроструктуры потока в жидких металлах (Булеев Н.И., Бобков В.П., Ибрагимов М.Х.-Г., Зинина Г.А., Сабелев Г.И., Таранов Г.С.);
- физхимия и технология щелочных (Арнольдов М.Н., Козлов Ф.А., Кузнецов Э.К., Алексеев В.В., Богданович Н.Г., Загоруйко Ю.И., Логинов Н.И.) и тяжелых жидкометаллических теплоносителей (Орлов Ю.И., Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Гулевский В.А., Иванов К.Д., Паповянец А.К.);
- теплогидравлика двухфазных потоков и кризис теплообмена при высоких и сверхкритических давлениях в сборках твэлов и циркуляционных контурах реакторных установок (Кириллов П.Л., Калякин С.Г., Морозов А.В., Ремизов О.В., Селиванов В.М., Сергеев В.В.);
- теплообмен при конденсации и кипении щелочных жидких металлов (Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В.);

– моделирование нестационарных процессов в многокомпонентных системах с фазовым переходом, развитие аварийных ситуаций и т. д. (Ефанов А.Д., Дробышев А.В., Кумаев В.Я., Пометько Р.С., Привезенцев В.В., Свириденко И.П.).

Работы по ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями были начаты в лаборатории «В» (ныне Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского) по инициативе А.И. Лейпунского. Они были направлены на выбор теплоносителей, научно-техническое обоснование их применения в проектах конкретных установок, обеспечение заданных теплогидравлических параметров, обоснование ядерно-физической и технологической безопасности при использовании ЖМТ, участие в разработке, курирование сооружения ЯЭУ, ввод их в эксплуатацию и сопровождение эксплуатации.

В начальный период формирования научной школы (**1949 – 1956 годы**): проводилось расчетно-теоретическое обоснование использования ЖМТ для ЯЭУ различного назначения: натрий, натрий-калий для АЭС с реакторами на быстрых нейтронах и для ЯЭУ космических аппаратов, свинец-висмут для АПЛ; создавалась экспериментальная база для исследования ЖМТ и изучения теплоотдачи к воде; получены первые результаты по освоению жидких металлов как теплоносителей, а также по критическим тепловым потокам для водоохлаждаемых активных зон; испытаны твэлы для Первой АЭС.

В дальнейшей деятельности научной школы можно выделить четыре периода:

1957 – 1968 годы. От института активно выдвигаются предложения по созданию ЯЭУ с ЖМТ: АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, атомные подводные лодки (АПЛ), космические аппараты. Они положительно принимаются научно-технической общественностью и поддерживаются руководством страны. Ведутся работы по научно-техническому обоснованию теплогидравлических режимов, физхимии и технологии натрия, натрий-калия, литья, по проектированию и сооружению этих установок. Вводятся в эксплуатацию и эксплуатируются: БР-5, 27/ВТ и АПЛ проекта 645. Приказом по Министерству Среднего машиностроения ФЭИ назначается головной организацией по теплофизике (20 декабря 1967 г.).

1968 – 1993 годы. Учёт полученного опыта эксплуатации действующих ЯЭУ с ЖМТ, включая аварии на АПЛ проекта 645 и на Чернобыльской АЭС, продолжение работы по созданию промышленных ЯЭУ различного назначения требовали получения фундаментальных знаний о физико-химических и теплогидравлических процессах в ЯЭУ с ЖМТ и с водой. На их основе развивались исследования по обеспечению безопасности действующих и проектируемых ЯЭУ, по оптимизации теплогидравлических характеристик активной зоны, парогенераторов (АЗ, ПГ) и промежуточного теплообменника (ПТО). Был выполнен комплекс работ по обоснованию технических методов и средств технологии теплоносителей, обеспечивающих длительную безаварийную эксплуатацию ЯЭУ как при номинальных режимах, так и при аномальных ситуациях (течи натрия в атмосферу, течь воды в ЖМТ в парогенераторах).

1994 – 2009 годы. Специфика этого периода связана с усилиями по сохранению научной школы. Наметившийся уже в конце восьмидесятых годов застой определялся иными темпами обоснования проектов новых ЯЭУ, не реализовывались уже разработанные проекты АЭС: БН-800, ВВЭР-640. Однако продолжалась эксплуатация АЭС с реакторами БН-600, ВВЭР, РБМК, Билибинской АЭС, АПЛ с водяным теплоносителем. В этих условиях основные усилия НШ были направлены на повышение безопасности действующих и перспективных ЯЭУ и продление их ресурса, на участие в инновационных проектах, на разработку расчетных кодов, на проведение фундаментальных исследований, которые до 2005 года поддерживались Министерством науки Российской Федерации и Минатомом. Развивалась конверсионная деятельность, проводилось широкое международное научно-техническое сотрудничество, выполнены многочисленные работы по международным проектам и контрактам с организациями и фирмами из США,

Германии, Японии, Италии, Франции, Швеции, Республики Корея, Аргентины, Китая, международными организациями – МАГАТЭ и т.д.

2010 год – по настоящее время. В рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 – 2015 годов и на перспективу до 2020 года» был проведен большой объем исследований в обоснование проектных решений и безопасности по проектам АЭС с РУ БН-1200 с натриевым теплоносителем, РУ БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, СВБР-100 со свинцово-висмутовым сплавом, исследовательского реактора МБИР. Проведен комплекс НИОКР в обоснование повышения технико-экономических характеристик ядерного топлива для действующих, строящихся и перспективных атомных электростанций (АЭС-2006, ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ), в обоснование проектных решений пассивной безопасности, технических решений и устройств водородной безопасности РУ ВВЭР. Выполнены НИОКР по инновационному проекту ВВЭР-СКД, исследования теплогидравлики, массопереноса и разработки комбинированной системы очистки в обоснование высокотемпературной РУ БН-ВТ с температурой натрия ~ 900 °С для производства водорода и других инновационных приложений.

Через месяц после пуска Первой АЭС 68 лет назад (24 июля 1954 года) по инициативе А.И. Лейпунского в ФЭИ был создан теплофизический отдел, который возглавил будущий академик В.И. Субботин. В январе 1962 года В.И. Субботин представил на секции ЯЭУ Научно-технического совета Госкомитета по использованию атомной энергии доклад «Теплофизические исследования для реакторов». В решении, принятом по его докладу, отмечалось, что «теплофизическим отделом ФЭИ в период 1954 – 1961 гг. выполнен большой объем теплофизических исследований для реакторов. Особое внимание (до 80 % всех исследований) отдел уделял исследованиям жидкометаллических теплоносителей. Выполнены важные исследования по определению критических тепловых нагрузок на воде и пароводяных смесях...».

Заключение секции НТС способствовало тому, что в 1964 году на базе теплофизического отдела ФЭИ был сформирован Теплофизический сектор под руководством В.И. Субботина. А с 1967 года ФЭИ стал исполнять функции головной организации Министерства среднего машиностроения СССР по теплофизике реакторов с жидкометал-



Руководство теплофизического сектора ФЭИ (начало 1960-х годов):
Кириллов П.А., Казновский С.П., Хачатуров Х.А., Субботин В.И., Зенкевич Б.А.,
Ибрагимов М.Х.-Г., Номофилов Е.В. (нижний ряд), Габрианович Б.Н., Ивановский М.Н.,
Рамзин В.Ф., Гущин Г.И. (верхний ряд)

лическим и водяным охлаждением. На Теплофизический сектор была возложена координация исследований по теплофизике ЯЭУ, выполняемых в организациях атомной отрасли и других ведомствах.

Валерий Иванович Субботин родился 12 декабря 1919 г. в г. Баку в семье военного моряка. 8 июня 1953 г. по Постановлению Правительства СССР «О мероприятиях по развитию Лаборатории «В» Первого главного управления при Совете Министров СССР» В.И. Субботин откомандирован в распоряжение Первого главного управления при Совете Министров СССР для постоянной работы в Лаборатории «В», где принял под свое руководство теплофизическую лабораторию. Его приход совпал с завершающей стадией работ по сооружению Первой в мире атомной станции, начатых по инициативе И.В. Курчатова, уже было принято решение о строительстве наземного стенда-прототипа ядерной энергетической установки (ЯЭУ) для атомной подводной лодки (АПЛ) с теплоносителем вода, а при разработке реакторов с жидкометаллическим охлаждением теплоносителями были выбраны: для АЭС с реакторами на быстрых нейтронах – натрий, ЯЭУ для АПЛ – эвтектический сплав свинец-висмут, а для ЯЭУ космических аппаратов – эвтектический сплав натрий-калий (в перспективе – литий).

В 1969 году В.И. Субботина назначают заместителем директора ФЭИ по научной работе. Организационно-воспитательные административные мероприятия предопределили и ускорили окончание обнинского этапа жизни В.И. Субботин, – этапа, на котором им была создана научная школа теплофизиков ФЭИ. Школа сформировалась благодаря редкой способности ученого правильно задать вопрос природе, явлению, исследователю и с целеустремленной энергией добиваться ответа на него.

В 1975 году В.И. Субботин был переведен на работу в Москву директором вновь создаваемой широкопрофильной организации НПО «Энергия» Министерства энергетики и электрификации СССР. В 1977 – 1988 годах он работал заведующим кафедрой теплофизики в МИФИ.

Признанием высокого авторитета В.И. Субботина в научных кругах страны и мира стало избрание его в 1968 г. членом-корреспондентом Академии наук СССР, а в 1987 г. – действительным членом Академии наук СССР. В 1988 г. он после избрания его членом Президиума академии перешёл на работу в Академию наук СССР. В последние годы своей жизни В.И. Субботин – советник Президиума РАН и начальник лаборатории в Институте машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, главный научный сотрудник Института прикладной математики имени М.В. Келдыша.

Кириллов Павел Леонидович родился 20 августа 1927 года в г. Чистополе Татарской АССР в семье служащего. В 1950 году окончил Московский энергетический институт по специальности «теплофизика». В 1958 году защитил в ФЭИ кандидатскую диссертацию на тему «Роль контактного термического сопротивления при теплообмене жидких металлов» и в 1969 году в ИВТ АН СССР – докторскую диссертацию на тему «Теплообмен в жидких металлах (однофазные и двухфазные потоки)». В 1970 году ему присвоено звание профессора. Заслуженный деятель науки и техники РСФСР. Автор более 350 научных публикаций (монографии, справочники, учебники), в том числе, 13 книг, 7 авторских свидетельств на изобретения. В числе его учеников 5 докторов и 15 кандидатов наук. Кириллов П.Л. соавтор учебного пособия для вузов Галин Н.М., Кириллов П.Л. «Тепломассообмен в ядерной энергетике». – М.: Энергоатомиздат, 1987; справочника Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. «Теплофизические свойства материалов ядерной техники». Изд-е 2-е, испр. и доп. под редакцией П.Л. Кириллова. – М.: ИздАТ. 2007; справочника в 3-х томах «Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике» под общей редакцией П.Л. Кириллова. – М.: ИздАТ, 2010 – 2014. Засуженный деятель науки и техники РСФСР, академик Международной и Российской инженерных Академий.

Арнольдов Михаил Николаевич родился 11 февраля 1934 года в г. Сызрани Куйбышевской области в семье служащего. В 1957 году окончил Московский энергетический институт по специальности «инженер-теплофизик». В 1964 году защитил кандидатскую диссертацию по специальной тематике по специальности «теплофизика» и в 1977 году – докторскую диссертацию на тему «Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей установок специального назначения». Соавтор более 100 научных публикаций, в том числе, 4 монографий, 13 авторских свидетельств на изобретения. Опубликовано: Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. – М.: Атомиздат, 1970; Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Ивановский М.Н., Мосин А.А., Тарбов А.А. Литий. – М.: ИздАТ, 1999; Асхадуллин Р.Ш., Арнольдов М.Н., Игнатьев В.В. Жидкие металлы и солевые расплавы в термоядерной энергетике. – М.: ИздАТ, 2021. В числе его учеников 2 кандидата наук. Академик Академии инженерных наук. им. акад. А.М. Прохорова, член-корреспондент РАЕН.

Габрианович Борис Николаевич родился 11 апреля 1930 года в г. Сызрани Куйбышевской области в семье служащего. В 1953 году закончил с отличием Казанский химико-технологический институт по специальности «химическое машиностроение», в 1966 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Теплообмен и гидравлическое сопротивление при продольном омывании теплоносителем плотно упакованных пучков тепловыделяющих стержней» и в 1990 году докторскую диссертацию «Гидродинамика проточных частей реакторов ЯЭУ специального назначения с жидкометаллическим теплоносителем». Академик Российской академии «Промышленной экологии». Соавтор более 40 научных трудов, монографии Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н. «Особенности гидродинамики проточных частей коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016.

Жуков Альберт Владимирович родился 22 декабря 1932 года в с. Щелканово Юхновского района Калужской области в семье учителей. В 1956 году закончил Московский энергетический институт по специальности «инженерно-физическая теплотехника», в 1966 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Температурные поля твэлов активной зоны реактора БН-350» и в 1980 году докторскую диссертацию «Температурные поля и теплоотдача твэлов высоконапряженных реакторов с жидкометаллическим охлаждением», в 1990 году присвоено звание профессора. Соавтор 200 научных трудов, 4 монографий, 15 учебных пособий, монографии Кириллов П.Л., Ушаков П.А., Жуков А.В. и др. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

Козлов Федор Алексеевич родился 27 сентября 1931 года в д. Хохлово Дедовичского района Ленинградской области в семье крестьян. В 1956 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина по специальности «техническая физика». В 1964 году в ФЭИ защитил кандидатскую диссертацию по теме «Очистка натрия от кислорода и контроль за содержанием кислорода в натрии», а в 1982 году докторскую диссертацию на тему «Исследования по технологии натрия как теплоносителя ядерных энергетических установок». В 1987 году ему присвоено звание профессора. Соавтор более 80 научных публикаций, в том числе, 4 монографий, 50 авторских свидетельств на изобретения. В числе его учеников 1 доктор и 5 кандидатов наук. Опубликовано монографии: Козлов Ф.А., Волчков Л.Г., Кузнецов Э.К., Матюхин В.В. Жидкометаллические теплоносители ЯЭУ. Очистка от примесей и их контроль / Под ред. Ф.А. Козлова. – М.: Энергоатомиздат, 1983; Поплавский В.М., Козлов Ф.А. «Безопасность парогенераторов натрия – вода». – М.: Энергоатомиздат, 1990; сборник статей «Жидкие металлы: от первого теплофизического стенда к крупномасштабной атомной энергетике» под ред. А.Д. Ефанова, Ф.А. Козлова. – Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2001. Лауреат Госпремии РСФСР в области науки и техники.

Мартынов Петр Никифорович родился 1 июля 1946 года в с. Жданово Барятинского района Калужской области в семье служащих. В 1968 году окончил Московский институт химического машиностроения по специальности «автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов». В 1976 году в ФЭИ защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка технологии водородной очистки контуров с теплоносителем свинец–висмут» и в 1981 году – докторскую диссертацию «Разработка процессов технологии свинец–висмут применительно к ремонтно-перегрузочным режимам работы ЯЭУ». В 2002 году ему присвоено звание профессора. Соавтор более 250 научных публикаций, в том числе, более 60 изобретений. В числе его учеников 7 кандидатов наук.

Орлов Юрий Иванович родился 18 января 1932 года в г. Талды-Курган Казахской ССР в семье врача. В 1955 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина по специальности «котлостроение». В 1966 году защитил кандидатскую диссертацию в ФЭИ по теме «Исследование теплоотдачи и контактного термического сопротивления на макетах активных зон с литиевым теплоносителем» и в 1981 году – докторскую диссертацию по специальной тематике по специальности ЯЭУ. В 1987 году ему присвоено звание профессора. Академик Российской академии «Промышленной экологии». Соавтор более 200 научных публикаций, в том числе, статей, изобретений и научных отчетов. В числе его учеников 3 доктора и 8 кандидатов наук.

Федотовский Владимир Сергеевич родился 14 июня 1946 года в г. Дзержинске Горьковской области семье служащего. В 1970 году закончил Филиал МИФИ в г. Обнинске по специальности «физико-энергетические установки», в 1982 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование динамических характеристик упругих стержневых элементов, обтекаемых одно- и двухфазными потоками» и в 1992 году докторскую диссертацию «Динамика гетерогенных сред и гидроупругих стержневых систем при вибрационных воздействиях». Академик Российской академии «Промышленной экологии». Соавтор более 100 научных трудов, монографии Фролов К.В., Махутов Н.А., Каплунов С.М. и др. «Динамика конструкций гидроупругих систем». – М.: Наука, 2002.

За годы существования научной школы через аспирантуру и соискательство прошло более 200 сотрудников, защищено 28 докторских и более 100 кандидатских диссертаций. Ивановскому М.Н и Козлову Ф.А. присвоено звание лауреатов Государственной премии СССР (1988 и 1973 годы), Кириллову П.Л. и Ушакову П.А. – звание Заслуженный деятель науки и техники (1988 и 1996 годы). Многие члены научной школы награждены орденами и медалями.

Формированию высокого научно-технического кадрового потенциала способствовала активная работа ведущих специалистов школы по написанию монографий и проведению научных конференций и семинаров.

Исследования тепло- и массопереноса, физической химии и технологии теплоносителей в энергетических системах обобщены в 42 монографиях, 16 – в справочниках и руководящих технических материалах, 38 – в учебных пособиях для ВУЗов.

Первая «Всесоюзная научно-техническая конференция по использованию жидких металлов в качестве теплоносителей» в Обнинске была проведена 13 – 17 декабря 1955 года. На ней от теплофизиков с докладами выступили Субботин В.И., Гуцин Г.И., Ибрагимов М.Х.-Г., Кириллов П.Л., Кузнецов В.Ф., Ушаков П.А. С 1976 года теплофизические конференции проводятся практически ежегодно, в общей сложности проведены 42 конференции, в том числе, международные.

Главным направлением деятельности научной школы останется ядерная энергетика. При этом учитывается, что, хотя основой ядерной энергетики ближайших десятилетий будут АЭС с реакторами на тепловых нейтронах с теплоносителем вода, большая атомная энергетика будущего может быть реализована лишь с реакторами на быстрых

нейтронах с замыканием топливного цикла. Для обеспечения конкурентной способности АЭС типа ВВЭР и сохранения приоритета (которым в настоящее время обладает Россия) по АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем и продолжения инновационных работ с тяжелыми теплоносителями необходимо проведение комплекса НИОКР.

Научные открытия АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» в области гидродинамики раздающих коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ

Дельнов В. Н.

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

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

В работе рассмотрены научные открытия АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» в области гидродинамики раздающих коллекторных систем (РКС) теплообменников и реакторов ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

Дан краткий анализ зарегистрированных в СССР научных открытий за период с 1969 по 1991 гг. и зарегистрированных в Международной академии авторов научных открытий и изобретений за период с 1991 по 2022 гг. [2].

Представлены определения, связанные с научными открытиями, и классификация различных типичных РКС.

Рассмотрены гидродинамические особенности течения и характерные схемы течения теплоносителя в проточных частях РКС с различными условиями подвода и отвода теплоносителя [1].

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

Приведены краткие описания и формулы зарегистрированных в виде научных открытий закономерности распределения жидкости на выходе из проточных частей коллекторных систем и явления гидродинамической идентичности в раздающих коллекторных системах [2, 3, 4].

Литература

1. Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н. Особенности гидродинамики коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ. – Саров: ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2016. – 215 с.
2. Дельнов В.Н., Юрьев Ю.С. Гидроаэромеханика: научные открытия, эффекты, парадоксы и научные гипотезы. – Обнинск, ОРГТЕХПРИНТ, 2021. – 130 с.
3. Диплом на открытие МААНОиИ № 518. Закономерность распределения жидкости на выходе из проточных частей раздающих коллекторных систем / Дельнов В.Н., Габрианович Б.Н., Юрьев Ю.С. – Заявка на открытие: № 670 от 17.04.2019. Приоритет открытия: 26.11.2012.
4. Диплом на открытие МААНОиИ № 524. Явление возникновения гидродинамической идентичности в раздающих коллекторных системах / Дельнов В.Н. – Заявка на открытие: № А-678 от 25.02.2021. Приоритет открытия: 2018.

Предотвращение явления кризиса закрученного потока в целях повышения надежности работы ядерных энергетических установок

Митрофанова О.В.

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

Ключевые слова: ядерные энергетические установки, гидродинамика, теплообмен, система компенсации давления, парогенераторы, вихреобразование, акустические колебания, кризис закрученного потока, теплогидравлическая эффективность, резонансные эффекты, виброустойчивость.

Систематизация данных мониторинга теплогидравлических параметров, полученных в результате многолетнего опыта эксплуатации транспортных ЯЭУ, и анализ аварийных ситуаций позволили выявить и теоретически объяснить ряд теплофизических явлений, влияние которых на надежность и теплогидравлическую эффективность работы оборудования ЯЭУ ранее не учитывалось. И, в первую очередь, это относится к явлению кризиса закрученного потока в элементах конструкций и трубопроводов ЯЭУ, где целенаправленная генерация закрутки потока не предусматривалась.

В настоящей работе для теоретического описания кризиса закрученного потока используется подход, развитый академиком РАН И.И. Новиковым на основе ранее сделанного открытия. Суть этого открытия заключается в определении кризиса закрученного потока как режима течения, при котором расходная скорость закрученного потока жидкости достигает своего предельного значения, равного скорости распространения длинных центробежных волн. И.И. Новиковым было показано, что центробежные волны возникают при закрученном движении жидкости под действием центробежных сил, и дан вывод соотношения для скорости распространения длинных центробежных волн в трубе. Эти волны представляют собой малые возмущения, которые распространяются от источника возмущений по всей жидкости. При достижении скоростью потока значения скорости распространения длинных центробежных волн уменьшение давления не будет передаваться внутрь канала и вызывать увеличение скорости вследствие того, что оно распространяется с той же скоростью, с какой движется текущая жидкость. В общем случае описанное явление «запирания» потока от внешнего воздействия называется кризисом течения, а скорость течения жидкости в момент кризиса – критической скоростью, равной скорости распространения малых возмущений (слабых волн) в жидкости.

Проведенные экспериментально-теоретические исследования показали, что сложная геометрия различных элементов теплогидравлического тракта ядерных энергетических установок может являться не только определяющим фактором в формировании крупномасштабных вихревых структур и закрутки потока, но и в ряде случаев приводить к кризису закрученного течения. Теоретическое описание кризиса закрученного потока позволило рассчитать характеристики движения и вихревую структуру потока в вычислительных экспериментах с соответствующей постановкой начальных и граничных условий.

В представленной работе проявление кризиса закрученного потока рассмотрено на примерах моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в трубопроводных системах компенсации давления и парогенератора ледокольной паропроизводящей установки. При моделировании процессов гидродинамики и теплообмена в замкнутых циркуляционных контурах ЯЭУ с применением CFD расчетных кодов для определения

кризисного режима использовалось условие равенства градиентов давления в продольном направлении и радиального перепада давления в поперечном сечении канала, возникающего за счет генерации крупномасштабного вихревого движения и закрутки потока.

Расчеты подтвердили тот факт, что при приближении расходной скорости потока к скорости распространения длинных центробежных волн течение, имея однонаправленную закрутку в масштабе всего канала, останавливается и, вращаясь в том же направлении, переходит к возвратному движению, образуя четко выделяемую линиями тока зону реверсивного спирально-винтового течения, которое может приводить к заклиниванию расхода теплоносителя. В работе показано, что существование «закризисного» режима течения закрученного потока также возможно и на самом деле осуществляется на практике по той же причине, по которой можно обеспечить сверхзвуковое течение газа в специальном сопле – сопле Лавала. Здесь роль управления изменением проходного сечения канала в отличие от жесткой геометрии канала в сопле Лавала играет сама «пробка». Расчеты показывают, что при увеличении расхода жидкости и степени закрутки потока ширина зоны реверсивной циркуляции сужается, обеспечивая прохождение жидкости. Вместе с тем, формирование такой устойчивой крупномасштабной внутренней вихревой структуры течения (пробки) связано со снижением работоспособности самого потока, так как наступление кризисного режима и его преодоление сопряжены с большими потерями давления и требуют дополнительных расходов мощности на прокачку теплоносителя.

Был рассмотрен механизм генерации акустических колебаний, связанный с образованием в движущейся среде устойчивых вихревых структур. Экспериментальные исследования показали, что при достижении предельной расходной скорости закрученного потока наблюдается эффект саморегулирования акустических колебаний, который выражается в резонансном усилении амплитуды собственных частот гидромеханической системы за счет поглощения составляющей спектра акустических колебаний, генерируемых вихревой структурой потока. Таким образом, показано, что явление кризиса закрученного потока может приводить к усилению шумности и снижению виброрезонансной устойчивости и надежности работы оборудования ЯЭУ.

Для создания системы мониторинга и диагностики кризисных явлений, обусловленных гидродинамикой потока и, прежде всего, кризиса закрученного потока, предлагается использовать метод акустических резонансов, позволяющий регистрировать излучение средой упругих волн, вызванных локальной динамической перестройкой ее структуры. Преимуществом предлагаемого диагностического метода перед существующими методами неразрушающего контроля (ультразвуковыми, радиационными, магнитными) является то, что он дает возможность отслеживать возникновение и развитие опасных для конструкций ЯЭУ вибрационных процессов и резонансных колебаний, причем непосредственно в режиме эксплуатации ЯЭУ.

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

Актуальные вопросы моделирования теплогидравлических процессов в реакторах на быстрых нейтронах (эксперимент и теория)

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

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

Ключевые слова: быстрый реактор, бак реактора, активная зона, сборки твэлов, гидродинамика, теплообмен, эксперимент, расчетное моделирование, турбулентный перенос, межканальный обмен, температурная стратификация теплоносителя, вынужденная конвекция, естественная конвекция, аварийное расхолаживание, режимы кипения, шероховатость, двухжидкостная модель.

Процессы гидродинамики, массо- и теплообмена и свойства теплоносителей влияют на нейтронно-физические характеристики реактора, процессы коррозии, надежность и безопасность реакторной установки, поэтому недооценка теплофизических проблем отражается на решении этих актуальных задач. Успехи, достигнутые в результате освоения жидкометаллических теплоносителей, позволили предложить жидкометаллическую технологию в различных технических приложениях: натрий – на АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, натрий и натрий-калий – в металлургической и химической промышленности; натрий-калий, цезий, литий – в установках космического назначения; литий – в реакторах синтеза – термоядерных реакторах и т. д.

Представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамики в сборках стержней активной зоны реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями с номинальной и деформированной решеткой. Демонстрируется интенсификация турбулентного переноса импульса в каналах в азимутальном и радиальном направлениях в области зазоров между стержнями. Показано значительное различие расчетных в рамках полуэмпирических моделей турбулентного переноса экспериментальных зависимостей коэффициентов турбулентного переноса импульса в радиальном и азимутальном направлениях переноса импульса в пучках стержней, распространенные коды лишь приближенно описывают экспериментальные данные. Интенсификация турбулентного переноса импульса в каналах сборок стержней обусловлена крупномасштабным турбулентного переноса импульса (вторичными токами). Рассчитан вклад крупномасштабного турбулентного переноса в турбулентный перенос импульса в каналах сборок стержней. Объясняется интенсификация межканального турбулентного обмена в тесных решетках стержней. Обсуждается эффект неподобия вынужденного проволочной навивкой межканального конвективного обмена импульсом и массой и энергией и массой в сборках стержней. Кратко изложены методики и результаты численного моделирования с использованием метода Монте-Карло температурного режима твэлов в сборках, а также термомеханического анализа изменения температурного поля в сборках в процессе кампании.

Изложены результаты экспериментальных исследований на интегральной водяной модели полей температуры и структуры движения неизоотермического теплоносителя в первом контуре реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем в различных режимах: принудительной циркуляции, при переходе к режиму расхолаживания и аварийном расхолаживании с естественной конвекцией теплоносителя. Показано, что в результате действия подъемных сил при движении неизоотермического теплоносителя в верхней камере реактора на периферии ее нижней области над боковыми экранами формируется изотермическая устойчивая зона холодного теплоносителя, размеры которой с

ростом общего расхода воды увеличиваются. Выявлена существенная и устойчивая температурная стратификация теплоносителя в периферийной зоне верхней (горячей) камеры реактора над боковыми экранами, в холодной и напорной камерах, элеваторной выгородке, системе охлаждения корпуса реактора, на выходе из промежуточных и автономных теплообменников. На границах раздела стратифицированных и рециркуляционных образований зафиксированы большие градиенты и пульсации температуры. В режиме расхолаживания с естественной циркуляцией теплоносителя температура теплоносителя на выходе из головок тепловыделяющих сборок активной зоны понижается, а температура теплоносителя в периферийной зоне верхней камеры увеличивается по сравнению с режимом принудительной циркуляции. Полученные результаты могут быть использованы как для верификации расчетных кодов, так и для приближенной оценки параметров реакторной установки при пересчете по критериям подобия.

Полученный опыт освоения реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями позволяет считать, что они по праву занимают свою нишу в ядерной энергетике. Однако нельзя считать, что все задачи решены, что остаётся только тиражировать накопленный опыт при создании новых реакторных установок.

Задачи дальнейших теплогидравлических исследований включают:

- разработка методов физического моделирования теплогидравлических процессов на всех участках гидродинамического тракта реактора (АЗ, ПТО, САОТ) с учётом нестационарности, например, развитие естественной циркуляции при срабатывании аварийной защиты и возникновении кипения натрия в ТВС;

- совершенствование методов расчета локальных турбулентных характеристик переноса импульса и энергии для однофазных и двухфазных потоков жидкого металла в каналах и больших объемах с учетом крупномасштабных вихревых течений, влияния стратификации протока теплоносителя;

- экспериментальное определение базовых констант и замыкающих соотношений по теплообмену и температурным полям для всех условий и режимов работы (деформация геометрии, всплески энерговыделения, статистическое распределение параметров и т.д.) с учетом факторов перегрева), используемых при численной реализации комплекса кодов;

- проведение анализа последствий возможных нестандартных режимов (блокировки, САОТ, кипение) и разработка мероприятий, исключающих их переход в тяжелую аварию;

- оценка пульсаций температуры непосредственно в потоке теплоносителя и на стенках каналов, исследование влияния этих пульсаций на прочность конструкций;

- обоснование номинальных режимов, исключающих образование вихрей в коллекторе АЗ и на поверхности натрия (захват газа), зон пассивной циркуляции (стратификационные явления, пульсации температуры);

- изучение режимов двухфазного потока натрия, динамики распространения области кипения натрия при возникновении и развитии кипения в ТВС активной зоны в аварийных режимах в реальной ТВС с новым техническим решением «натриевая полость» над активной зоной реакторов на быстрых нейтронах, определение границы устойчивого охлаждения активной зоны;

- создание и обоснование системы верификационных тестов;

- разработка верифицированного комплекса кодов, учитывающих взаимосвязь ядерно-физических, теплогидравлических, физико-химических, термомеханических, массообменных и технологических процессов, происходящих в ЯЭУ, для обоснования ее ресурса с учетом всей совокупности процессов и режимов ее эксплуатации.

**Использование опыта создания и эксплуатации
одноконтурных реакторов с кипением и ядерным
перегревом теплоносителя для проектирования реакторов
со сверхкритическими параметрами теплоносителя**

Махин В.М., Пиминов В.А., Семишкин В.П., Чуркин А.Н.,
Чусов И.А., Лапин А.В.

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

Ключевые слова: водоохлаждаемый реактор, кипящий теплоноситель, закритические параметры, перегрев пара в реакторе, опыт эксплуатации, водно-химический режим.

Рассмотрен опыт создания и эксплуатации одноконтурных установок с кипящим теплоносителем и с ядерным перегревом пара и прямой подачей перегретого пара в турбину (реакторы ВК-50, РБМК, АМБ-100 и АМБ-200) применительно к его использованию при создании водоохлаждаемого реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя (SCWR). Рассмотрен также водно-химический режим энергоблоков в тепловой энергетике и одноконтурных реакторных установок, обеспечивающий сравнительно малые отложения на поверхностях проточной части турбины, а также вопросы о радиационной обстановке и дезактивации контура.

Россия обладает опытом эксплуатации одноконтурных реакторных установок с кипящим теплоносителем (ВК-50, ЭГП и РБМК) и с ядерным перегревом пара и прямой подачей пара из реактора в турбину: АМБ-100 и АМБ-200 (Белоярская АЭС). АМБ – это одноконтурные (по пару) установки, отличающиеся исполнением контуров охлаждения реактора. На реакторах, кроме выработки электричества и тепла и получения эксплуатационного опыта, выполнено значительное количество испытаний разных топливных композиций (более 40 топливных композиций). Основным, важным для практических приложений результат эксплуатации АМБ, является опыт эксплуатации одноконтурных установок с ядерным получением и перегревом пара с последующей подачей его в турбину. При этом эксплуатационные характеристики, ответственные за радиационную безопасность энергоблока, были в 5–10 раз ниже, чем установленные в соответствующих нормативных документах [16].

На данном этапе можно оценочно прогнозировать, что радиационные характеристики проектируемых SCWR с близким уровнем мощности к АМБ могут отличаться от АМБ в два раза (отличие, обусловленное разницей плотности пара в АМБ и в SCWR), так как активация теплоносителя (воды) вносит весомый вклад в радиационную обстановку на блоке при номинальной мощности.

Успешная эксплуатация одноконтурной энергетической установки ABWR мощностью ~4000 МВт (тепл.) подтверждает возможность эксплуатации одноконтурных установок при условии очистки теплоносителя от примесей, в том числе продуктов деления при разгерметизации твэлов. Эти оценки, основанные на опыте эксплуатации кипящих реакторов и реакторов с ядерным перегревом пара, подтверждают корректность выбора одноконтурных SCWR при сравнении одноконтурных и двухконтурных установок SCWR, сделанного в конце 20-го и в начале 21-го веков.

Опыт АМБ важен для выбора водно-химического режима SCWR и технологии его обеспечения в течение кампании реактора.

Нашедшее применение как в одноконтурных, так и в двухконтурных установках решение по минимизации ^{60}Co путем ограничения его содержания в используемых конструкционных материалах является примером как на стадии проектирования принять меры по ограничению активации конструкционных материалов и снизить дозовую нагрузку на персонал. Кроме минимизации содержания кобальта интерес представляет анализ на активацию и других элементов с ограничением их содержания в исходном материале, как это делается в случае применения кобальта в сталях.

Нейтральный водно-химический режим в установках АМБ одобрен и при испытаниях на РУ ВК-50. Этот режим рекомендуется для прототипа энергетического реактора ВВЭР-СКД для его отработки в условиях СКП перед внедрением в проекте энергетического реактора. Заслуживают рассмотрения способы «очистки» теплоносителя в течение кампании и во время остановки, применяемые на АМБ и других реакторах. Кроме того, освоенные ВХР, конструкционные материалы и технология их изготовления, а также режимы эксплуатации энергоблоков в тепловой энергетике также представляют практический интерес и рекомендуются для использования при создании SCWR. Опыт тепловой энергетики по исключению отложений примесей в турбине позволит существенно улучшить радиационную обстановку в машинном зале SCWR.

Несмотря на решение вопроса о «подавлении радиолиза в кипящем реакторе», по-видимому, этот вопрос остается актуальным при проектировании как одноконтурных, так и двухконтурных SCWR. Способы решения этого вопроса также отработаны на кипящих реакторах и реакторах с ядерным перегревом пара. На реакторе-прототипе SCWR целесообразно подтвердить или уточнить применимость используемого способа.

Исследование высокотемпературной энерготехнологии с реакторами на быстрых нейтронах для производства электроэнергии, водорода и других инновационных применений

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

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

Ключевые слова: высокотемпературный реактор на быстрых нейтронах, натриевый теплоноситель, интегральная компоновка оборудования первого контура, нейтронная физика, технология теплоносителя, система очистки, примеси, жаропрочные радиационно стойкие высокотемпературные конструкционные материалы, коррозия, производство водорода, твердооксидный электролиз воды, инновационные приложения.

Наиболее важной проблемой, определяющей развитие экологически чистой энергетики, является вовлечение в топливный цикл водорода. В настоящее время основным способом производства водорода является паровая конверсия метана. В долгосрочной перспективе крупномасштабного получения водорода этот способ не жизнеспособен из-за потребления невозобновляемых ресурсов и выделением парниковых газов. Альтернативные способы производства водорода методами расщепления воды с помощью термохимических или электролизных процессов, требуют высокотемпературного источника тепла. Наиболее освоенными в настоящее время высокотемпературными источниками тепла могут служить ядерные реакторы. Проведенные авторами нейтронно-физические и теплофизические исследования показали, что имеется принципиальная возможность обеспечить требуемые параметры высокотемпературной (900–950 °С) установки с реактором на быстрых нейтронах БН-ВТ 600 МВт (тепл.) с натриевым теплоносителем для производства водорода, на основе одного из термохимических циклов или высокотемпературного электролиза с высоким коэффициентом теплового использования электроэнергии. Относительная малогабаритность, вид теплоносителя, выбор делящегося вещества и конструкционных материалов позволяют создать реактор с внутренними присутствующими ему свойствами, обеспечивающими повышенную ядерную и радиационную безопасность. Обсуждаются возможности применения жаропрочных радиационно-стойких конструкционных материалов и использования предложенной технологии высокотемпературного натриевого теплоносителя при высокой концентрации водорода. При возрастании интенсивности источников водорода, поступающего из третьего контура во второй, по сравнению с АЭС БН-600 на два – три порядка, условием ее реализации является повышение концентрации водорода в натрии на два – три порядка по сравнению с современными АЭС в сочетании с удалением водорода из натрия вакуумированием через мембраны из ванадия или ниобия.

Анализируются особенности поведения высокотемпературной сложной многокомпонентной гетерогенной системы «натриевый теплоноситель – примеси – конструкционные (технологические) материалы – защитный газ», связанные с экспоненциальной зависимостью от температуры констант, характеризующие процессы тепломассопереноса (диффузия, проницаемость, растворимость, скорость абсорбции, равновесные давления газов и др.), описываемой формулой Аррениуса. Показано, что система технологии, обеспечивающая соблюдение требований технологии высокотемпературного натриевого теплоносителя (900–950 °С), существенно отличается от систем на современных АЭС с уровнем температуры 550 °С:

- обязательный компонент системы очистки – холодные и горячие ловушки окислов, использующие геттеры для глубокой очистки натрия от кислорода, углерода, азота;
- для очистки от водорода во втором контуре установки используются мембраны из материалов с высокой проницаемостью по водороду, например, из ниобия или ванадия;
- учитывая возрастание скорости коррозии конструкционных материалов и массопереноса примесей при повышении температуры в контурах, разрабатываются специальные массообменно-фильтрующие аппараты для очистки натрия от продуктов коррозии.

Расчетные оценки показали, что установка с высокотемпературным реактором БН-ВТ с тепловой мощностью 600 МВт при использовании 30 % мощности для производства водорода с эффективностью 50 % могла бы производить около $0,6 \cdot 10^6$ м³ водорода в сутки, что достаточно для современного крупного предприятия, производящего водород, перерабатывающего сырую нефть среднего качества или реализующего другие высокотемпературные промышленные технологии.

Актуальные теплофизические проблемы и пути совершенствования пассивных систем охлаждения активной зоны реактора ВВЭР

Морозов А.В., Калякин Д.С., Сахипгареев А.Р., Шлёпкин А.С., Сошкина А.С.

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

Ключевые слова: ВВЭР, активная зона, пассивные системы, естественная циркуляция, кипение, конденсация, борная кислота, неконденсирующиеся газы.

Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) являются основой современной российской атомной энергетики. Данные реакторные установки доказали свою безопасность и надежность в течение более пятидесяти лет эксплуатации, начиная с первого блока Нововоронежской АЭС. Энергоблоки нового поколения с реакторами ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ являются результатом эволюции традиционной технологии корпусных водоохлаждаемых реакторных установок. В настоящее время в Российской Федерации на Ленинградской и Нововоронежской АЭС эксплуатируются четыре энергоблока, сооруженных по проекту ВВЭР-1200. Кроме того, атомные станции, оснащенные данными реакторами, строятся во многих странах мира, включая Бангладеш, Венгрию, Египет, Турцию, Финляндию. Первые энергоблоки по проекту ВВЭР-ТОИ сооружаются на площадке Курской АЭС-2.

Новые проекты реакторных установок ВВЭР характеризуются большей мощностью, а также более высоким уровнем безопасности за счет использования пассивных систем охлаждения реактора. При использовании пассивных систем обеспечиваются останов реактора и отвод остаточного энерговыделения от активной зоны. При этом для пуска их в работу не требуется вмешательство персонала АЭС, а также подача энергии извне в течение длительного времени (до 72 часов).

Пассивные системы охлаждения активной зоны реактора ВВЭР-1200 включают в себя традиционные гидроаккумуляторы с азотной подушкой, а также дополнительную систему пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени. Для конденсации пара, генерируемого в активной зоне, предусматривается использование воздухоохлаждаемой системы пассивного отвода тепла.

В одном из вариантов конфигурации систем безопасности проекта ВВЭР-ТОИ предусматривается использование системы пассивного залива активной зоны из гидроемкостей третьей ступени, которая увеличивает время охлаждения активной зоны реактора за счет подачи борной кислоты.

В рамках обоснования безопасности новых проектов ВВЭР особое внимание уделяется вопросам, связанным с совершенствованием системы пассивного охлаждения активной зоны при запроектных авариях с разрывом главного циркуляционного контура и потерей всех источников переменного тока. 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 на наружной поверхности твэлов, что может привести к ухудшению теплоотвода. Еще одной актуальной проблемой является влияние неконденсирующихся газов на работу парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при прекращении отвода парогазовой смеси из трубного пучка теплообменного аппарата.

Единая интеграционная платформа и интерфейс расчетных кодов в SimInTech

Колотыркин И.П.

ООО «ЗВ Сервис», Москва,
i.kolotyркиn@zv-services.com

Ключевые слова: SimInTech, математическое моделирование, комплексное моделирование, расчетный код, теплогидравлика, сквозная разработка, интеграционная платформа, генерация кода.

SimInTech — программная платформа для разработки логико-динамических систем, описываемых во входо-выходных отношениях, в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений и/или дифференциально-алгебраических уравнений. SimInTech предназначен для моделирования, разработки алгоритмов управления и программирования вычислителей. Данный программный комплекс является конкурентом систем Matlab SimuLink (MathWorks), Dymola (Dassault), AMESim (Siemens), SCADE (ANSYS), LabVIEW (National Instruments) и других. SimInTech обладает большим количеством библиотек, таких как теплогидравлика, силовая гидравлика, электротехника, электропривода, динамика полета и другими, которые разрабатываются ведущими научными организациями.

Основной задачей SimInTech является предоставление разработчикам программного обеспечения для математического моделирования физических систем и алгоритмов управления в функционально-блочном виде. Отличительной особенностью SimInTech является возможность реализовывать модели больших мультифизических систем максимально приближенно к протеканию реальных процессов средствами программного комплекса. Такой подход в моделировании достигается за счёт пакетной организации проектов, где расчёт каждого проекта производится своим шагом и методом интегрирования на разных ядрах вычислительного устройства, а алгоритм синхронизации обеспечивает корректное временное разрешение. Таким образом, декомпозировав большую систему на множество самостоятельных подсистем увеличивается скорость расчёта, точность и устойчивость.

Разработка моделей в SimInTech разделяется несколько основных этапов разработки:

- 1) Разработка библиотеки блоков;
- 2) Разработка модели объекта;
- 3) Разработка АСУТП;
- 4) Генерация кода.

Каждый этап работы реализуется в SimInTech как в едином инструменте, позволяя объединить работу множества организаций и подразделений в одном проекте. На текущий момент любой разработчик имеет возможность самостоятельно разработать на платформе SimInTech свою собственную библиотеку и коммерциализировать её без участия компании разработчика.

В атомной промышленности есть целый класс расчетных кодов (методов решений теплогидравлических задач), которые имеют корни с 80-х годов и часто характеризуются, большим объемом кода, плохой комментированностью, особенностями написания, и при этом данные расчетные коды имеют валидационные отчеты, позволяющие использовать эти инструменты для определенных задач при обосновании безопасности ядерных энергетических установок. Важной особенностью SimInTech является открытость инструментов для интеграции сторонних приложений и расчетных кодов, что позволяет

интегрировать при помощи встроенного API уже существующие наработки. По итогу интеграции работа с расчетным кодом будет представлять из себя не заполнения таблиц, а формирования расчетной схемы в SimInTech путем установки на схему и настройки базовых теплогидравлических элементов, что снимает необходимость изучения работы с конкретным расчётным кодом, формирует единый графический вид модели и упрощает работу технолога. Таким образом, технолог имеет в SimInTech наглядную принципиальную схему, которая при запуске расчета, запускает верифицированный расчетный код и позволяет наглядно моделировать технический процесс, строить графики и формировать отчеты, не внося никаких изменений в валидированный расчетный код. SimInTech также позволяет разработать алгоритмы управления и запустить их, используя собственный решатель. Особенности архитектуры SimInTech позволяют использовать одновременно несколько решателей при расчете комплексной модели, т. е., например, один контур рассчитывается одним расчетным кодом, второй контур другим расчетным кодом, а система автоматического управления ядром SimInTech, и все это является одной связной математической моделью.

По итогу разработки систем управления, в SimInTech возможна генерация кода на бортовые вычислители напрямую из проектов. Корректная настройка генератора кода позволяет использовать кодогенератор для любого вычислительного устройства, программируемого на языке Си, формируя код, оптимальный под конкретную задачу. Такой подход сквозной разработки позволяет ускорить процесс интерпретации алгоритма в Си код, исключить большую часть ошибок ручного кодирования и обеспечить автоматизированную генерацию документации, полностью соответствующей рабочему алгоритму.

Таким образом, при работе в SimInTech возможна:

- разработка собственных математических моделей как средствами SimInTech, так и с использованием сторонних расчётных кодов;
- разработка комплексных математических моделей, учитывающих особенности расчёта каждой подсистемы, увеличивая точность, скорость и устойчивость расчёта всей модели;
- по итогу разработки АСУТП сгенерировать Си код для всех уровней систем управления.

Научно-технические достижения в области технологии тяжёлых жидкометаллических теплоносителей

**Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю., Садовничий Р.П., Ульянов В.В., Скобеев Д.А.,
Иванов К.Д., Лаврова О.В., Ниязов С.-А.С., Посаженников А.М.,
Мельников В.П., Воронин И.А.**

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

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, измерения, нормируемый параметр, концентрация, кислородный режим, термодинамическая активность, электрохимический потенциал, ядерный реактор.

Технология обращения с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем (свинцом, сплавом свинца и висмута) включает в себя значительный комплекс мер:

- подготовку теплоносителя для заполнения первого контура реакторной установки;
- поддержание условий в теплоносителе для обеспечения коррозионной стойкости конструкционных сталей;
- очистку теплоносителя от твердофазных шлаков как на основе оксидов свинца, так и на основе оксидов компонентов конструкционных сталей;
- очистку защитного газа от аэрозолей теплоносителя и продуктов коррозии;
- диагностику состояния циркуляционного контура реакторной установки.

Для реализации комплекса мер требуются специальные методы и средства, к которым относятся:

- датчики термодинамической активности кислорода;
- массообменные аппараты;
- устройства ввода газовой смеси в тяжелый жидкометаллический теплоноситель;
- фильтры тяжелого жидкометаллического теплоносителя;
- фильтры защитного газа;
- дожигатели водорода;
- увлажнители газа;
- конденсаторы;
- методы автоматизированного управления;
- методы подготовки теплоносителя перед загрузкой и его загрузка в реакторную установку;
- методы диагностики (индикации) состояния циркуляционного контура.

При разработке каждого из элементов технологии обращения с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем коллективом АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» выполнен значительный комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рассматриваемой области знаний. В докладе рассмотрены основные научно-технические достижения в области технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей за период с 2000 г. по 2021 г.

Экспериментальное исследование взаимодействия свинцово-висмутового теплоносителя со сталью оболочек ТВЭЛОВ

**Альмяшев В.И., Сулацкий А.А., Витоль С.В., Крушинов Е.В., Котова С.Ю., Шевченко Е.В.,
Каляго Е.К., Булыгин В.Р., Беляева Е.М., Шуваева Е.Б., Тимчук А.В.**

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский
технологический институт им. А.П. Александрова» (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»),
Сосновый Бор, email: andrei314@mail.ru*

Ключевые слова: свинцово-висмутовый теплоноситель, сталь оболочек ТВЭЛОВ, запроектные аварии, высокотемпературная коррозия, расслоение расплава.

К числу наиболее сложных физико-химических, технологических и инженерных проблем ядерной энергетики относится создание и обоснование материалов основного теплоэнергетического оборудования реакторов нового поколения, в частности, для условий аварийных режимов.

В настоящее время усилия специалистов сосредоточены на создании усовершенствованных теплогидравлических и физико-химических моделей, позволяющих воспроизвести реалистичную картину процессов, происходящих в реакторной установке. Для создания моделей необходимы достоверные экспериментальные данные по характеристикам перспективных материалов реакторных установок, в том числе, жидкометаллических теплоносителей, в частности, на основе свинцово-висмутовой эвтектики.

Основной интерес к свинцово-висмутовому теплоносителю (СВТ) обусловлен тем, что свойства эвтектики свинец-висмут такие как низкая температура плавления, высокая температура кипения, химическая инертность, высокие теплопроводность и теплоемкость предоставляют широкие возможности выбора вариантов при проектировании реакторных установок с обеспечением внутренне присущих данному типу теплоносителя характеристик безопасности. Однако при повышенных температурах сдерживающим фактором становится коррозия оболочек ТВЭЛОВ и прочих конструкционных материалов.

В связи с отсутствием доступных данных в «НИТИ им. А.П. Александрова» было проведено экспериментальное исследование взаимодействия СВТ со сталью оболочек ТВЭЛОВ для условий аварии реакторной установки, сопровождающейся существенным повышением температуры теплоносителя.

Экспериментальное исследование было выполнено на установке «Расплав-3» комплекса экспериментальных установок «Расплав», использующих технологию индукционной плавки в холодном тигле. Исследовано взаимодействие расплава теплоносителя со сталью оболочки ТВЭЛОВ на температурных уровнях ≈ 1230 и ≈ 1340 °С с выдержкой на каждой температурной полке в нейтральной атмосфере, а при температуре расплава ≈ 1120 °С – в воздушной атмосфере. В результате эксперимента и пост-тест анализов было, в частности, показано, что при выдержке стального образца в расплаве СВТ с температурой ≈ 1340 °С происходит активное растворение стали в расплаве, причем при экспозиции в течение 60 мин. образец растворился практически полностью. Кроме того, по пост-тест анализу слитка выявлена стратификация расплава на два несмешивающихся слоя. Первый слой содержал в себе, помимо свинца и висмута, до 50 масс. % компонентов стали (железа и хрома). Второй слой по составу был близок к свинцово-висмутовой эвтектике без компонентов стали. Полученные данные могут быть использованы при анализе и моделировании запроектных аварий на реакторных установках с СВТ.

Теплогидравлические исследования в обоснование парогенераторов реакторных установок с жидкометаллическим охлаждением, проведенные в ГНЦ РФ – ФЭИ

Грабежная В.А., Михеев А.С., Алёхин А.В.

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

Ключевые слова: парогенератор, БН-350, БН-600, БРЕСТ-ОД-300, натрий, свинец, вода, однотрубная модель, фрагментная модель, теплогидравлическая устойчивость, кризис теплообмена, температура, продольное течение, поперечное течение.

В ГНЦ РФ – ФЭИ на протяжении более полувека на стенде СПРУТ проводятся работы по теплогидравлическому обоснованию парогенераторов различных реакторных установок с жидкометаллическим обогревом. В качестве теплоносителя использовались: свинец, эвтектический сплав свинец-висмут, натрий. Рабочее тело – вода.

В период с 1969 по 1978 гг. в ГНЦ РФ – ФЭИ на стенде СПРУТ был выполнен большой комплекс экспериментальных исследований теплогидравлических характеристик десяти моделей ПГ, обогреваемых натрием, в обоснование работоспособности испарителей энергоблоков БН-600 и БН-350.

Для обоснования ресурса и тепловых характеристик испарителя энергоблока БН-600 были проведены эксперименты на четырех однотрубных моделях (трех гладких и одной с внутренним оребрением). Экспериментально было показано, что:

- при кризисе теплообмена в парогенерирующей трубе для расчета критических тепловых потоков и граничного паросодержания можно использовать рекомендации, полученные в экспериментах с электрообогревом, чего нельзя сказать про закризисную зону, где в условиях парогенерирующего канала коэффициенты теплообмена существенно выше значений, полученных при электрообогреве трубы;

при условиях номинального режима работы на выходе испарителя в паре, перегретом на 20 °С, содержится около 6% влаги, доупаривание которой в трубопроводе между испарителем и пароперегревателем гарантирует не попадание влаги в пароперегреватель;

использование внутреннего оребрения позволяет исключить кризис теплообмена в парогенерирующей трубе при параметрах номинального режима испарителя БН-600.

Основной задачей испытаний, проводимых в ФЭИ в обоснование испарителя энергоблока БН-350, являлось подтверждение расчетных характеристик испарителя, доказательство отсутствия кризиса теплообмена на теплопередающей поверхности канала Фильда при всех режимах работы испарителя, а также изучение теплогидравлической устойчивости и определение границы устойчивых режимов работы.

Проведенные исследования каналов Фильда показали:

- во всех режимах эксплуатации, заложенных в регламент, имеет место бескризисная работа парогенерирующего канала;

- не обнаружены неустойчивые режимы в диапазоне изменения эксплуатационных параметров;

- увеличение давления котловой воды приводит к смещению границы неустойчивых режимов в область более высоких параметров по температуре и расходу натрия, что было положительно воспринято руководством станции БН-350 при выборе основного режима эксплуатации. Вместо первоначально намеченного давления 2,45 МПа в качестве рабочего было выбрано давление 3,92 МПа, хотя в проекте номинальным считалось давление 5,1 МПа, т.е. станция работала в режиме 70% мощности.

Был выполнен комплекс работ на модели ПГ «Надежность», спроектированный и изготовленный в Чехословакии, и предназначенный для замены вышедшего из строя парогенератора БН-350 с трубками Фильда. Определены параметры режимов с пульсациями расхода питательной воды.

В рамках реализации Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года» в ГНЦ РФ – ФЭИ был выполнен цикл экспериментальных работ по изучению теплогидравлики парогенерирующего канала, обогреваемого натрием, включающего в себя и испарительный, и пароперегревательный участки. При работе на пониженных параметрах по давлению и расходу питательной воды обнаружены балластные зоны. В условиях отсутствия дросселирования потока обнаружен нестационарный кризис теплообмена. Проведенные испытания данной модели с дроссельным устройством на входе позволили устранить нестационарный кризис теплообмена. Протяженность зон с низким теплообменом при этом не изменилась.

В разрабатываемом в АО «НИКИЭТ» проекте установки БРЕСТ-ОД-300 с реактором на быстрых нейтронах и свинцовым теплоносителем в первом контуре в качестве ПГ принята конструкция, представляющая собой бухту с витыми трубами. Для проведения испытаний в обоснование натурного ПГ в Подольске была разработана двухсекционная модель ПГ, состоящая из двух трёхтрубных модулей с витыми трубами (вариант 2000 г.), но с продольным течением теплоносителей. На первом этапе испытаний была проведена серия опытов на одном трёхтрубном модуле с целью подтверждения проектных характеристик парогенератора в различных режимах работы, а также создания банка результатов экспериментов для дальнейшей верификации расчетных кодов. Испытания проводились в условиях номинального режима работы парогенератора при давлении 18 МПа и сверхкритическом давлении 25 МПа (первоначальный вариант РУ БРЕСТ-ОД-300), а также при работе на пониженных расходах воды. В процессе испытаний был достигнут перегрев пара, заложенный в проект ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300. Изменение расхода воды на $\pm 20\%$ от номинального значения, практически не влияло на величину перегрева пара. В опытах при сверхкритических параметрах воды не обнаружены режимы с локальным ухудшением теплообмена во всем диапазоне режимных параметров. При работе на частичных параметрах с пониженными расходами воды, несмотря на отсутствие дроссельных устройств на входе в трубы, не обнаружено режимов с колебаниями давления воды либо её расхода, которые говорили бы о нарушении (опрокидывании) циркуляции в водяном контуре.

Испытания при совместной работе двух модулей проводились в условиях пусковых режимов при разбалансе расходов питательной воды либо свинца через модули. Как и в случае одного модуля при совместной работе двух модулей не зарегистрированы режимы с пульсациями во втором контуре, способными вызвать опрокидывание циркуляции воды. Результаты проведенных испытаний модели парогенератора с продольным течением теплоносителей дали обширную информацию о характере теплообмена в разных зонах парогенерирующего канала при различных условиях эксплуатации (номинальный и частичные режимы, пусковые режимы).

Недостаточное количество теплопередающих труб в модуле (всего три), различие в направлении течения свинцового теплоносителя (опускное с обтеканием пучка труб, близким к поперечному обтеканию), различия в геометрии (иные размеры теплопередающей трубы, другие шаги коридорного размещения этих труб, другой угол наклона труб к горизонту) не позволяют сделать вывод о гарантии полной гидродинамической устойчивости ПГ РУ БРЕСТ во всем возможном диапазоне эксплуатационных параметров. Это послужило основанием для проведения испытаний на многотрубной модели штатного парогенератора, разработка проекта которого была выполнена в ОАО «ИК «ЗИОМАР». Штатная (фрагментная) теплогидравлическая

модель парогенератора состояла из 18 витых парогенерирующих трубок, расположенных на одном условном диаметре (спираль с 18 заходами). Целью испытаний являлось получение теплогидравлических характеристик модели и данных о гидродинамической устойчивости отдельных парогенерирующих труб и всей модели в целом при работе во всем диапазоне изменения режимных параметров. В процессе испытаний режимов с нарушением циркуляции во втором контуре не установлено.

Испытания моделей парогенераторов, направленные на обоснование ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300 показали устойчивую работу всех моделей во всем диапазоне изменения режимных параметров, вплоть до расхода воды, составляющего 4 % от номинального.

Для верификации расчетных кодов необходимо располагать информацией не только о теплообмене со стороны нагреваемого теплоносителя, но и данными о теплообмене со стороны греющего теплоносителя при поперечном обтекании труб бухтовой компоновки. Еще до начала экспериментов на первой модели ПГ с продольным течением теплоносителей для выяснения влияния характера обтекания теплопередающей поверхности на теплообмен были изготовлены две методические модели – одна с продольным обтеканием витой трубки, другая – с поперечным обтеканием змеевика в однорядном исполнении.

Проведенные опыты показали удовлетворительное согласие экспериментальных данных о теплообмене с известными расчетными рекомендациями, полученных на модели с продольным течением теплоносителей, и сильное расхождение экспериментальных данных, полученных на модели при поперечном обтекании. Такие результаты привели к необходимости проведения работ на иной экспериментальной модели, состоящей из трех горизонтальных и шести вертикальных рядов труб длиной 200 мм, пять из которых были теплопередающими. Осевой и радиальный шаги расположения трубок соответствовали проекту ПГ (вариант 2000 г.). Для выравнивания профиля скорости теплоносителя была установлена специальная решётка. В качестве греющего теплоносителя в модели использовался сплав свинца с висмутом, что позволило проводить эксперименты при низком давлении (1,4 МПа) и однофазном течении воды.

Были получены коэффициенты теплообмена в области переходного режима течения теплоносителя (числа Рейнольдса $(0,41-1,54) \cdot 10^4$). Поскольку эксперименты были выполнены не со свинцовым теплоносителем и охватывали область переходного течения, а также из-за несоответствия геометрических параметров (диаметр трубы, шаги осевой и радиальный) новому проекту ПГ (вариант 2010 года), была создана новая модель. Она также состояла из шести вертикальных, но уже четырех горизонтальных рядов труб длиной 250 мм каждая, пять из которых теплообменные. Параметры по воде определялись из условия не вскипания воды в теплопередающей трубке и, с другой стороны, – отсутствием замораживания свинца. Поэтому в первой серии удалось получить данные о теплообмене со стороны свинца только в переходной области чисел Рейнольдса. И только после глушения трубок ещё в трёх рядах были проведены опыты по определению коэффициентов теплообмена для свинцового теплоносителя в базовом кислородном режиме $((1-4) \cdot 10^{-6} \% \text{ масс})$ при числах Re до 554 и свинцового теплоносителя с термодинамической активностью кислорода ~ 1 при числах Re до 500.

Для свинца в базовом кислородном режиме данные неплохо согласуются с формулой, ранее полученной в ФЭИ С.И. Щербаковым:

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

Для свинца в базовом кислородном режиме коэффициенты теплоотдачи в 1,5–4 раза больше, чем для свинца на линии насыщения кислородом. Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи от скорости потока в межтрубном пространстве (числа Пекле) наблюдается только для свинца базового кислородного режима. Установлена нижняя граница коэффициента теплообмена $Nu = 2$ при скорости свинца до 0,3 м/с.

Секция 1.

Физическая химия и технология жидкометаллических теплоносителей

Этюд о составе нестехиометрических оксидов в разбавленных растворах жидкий металл – кислород

Осипов А.А., Иванов К.Д.

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

Ключевые слова: жидкий металл, разбавленный раствор, нестехиометрический оксид, закон Рауля, стандартная энергия образования Гиббса.

Применение жидких металлов в различных областях науки и техники часто сталкивается с необходимостью учета взаимодействия металла и кислорода. В жидком металле кислород находится в растворенном виде и его содержание, как правило, не превосходит нескольких процентов при температурах порядка несколько тысяч градусов. Это означает, что при не слишком высоких перегревах металла выше температуры его плавления, раствор Ме-О можно считать разбавленным, то есть таким, для которого для растворителя (металла) выполняется закон Рауля, а для растворенного элемента (кислорода) закон Генри, что подтверждается экспериментом. Однако, в силу высокого химического сродства металла к кислороду, уже при крайне незначительном парциальном давлении кислорода в системе Ме-О образуется оксид металла Me_nO_m . В стандартном подходе считается, что при насыщении жидкого металла кислородом образуется оксид стехиометрического состава, однако хорошо известно, что составы оксидов могут зависеть от парциального давления кислорода и характеризоваться широкой областью гомогенности (нестехиометрические оксиды). Для большинства металлов зависимость стандартной энергии образования оксида (нормированной на содержание кислорода) $\Delta G(\beta) = \Delta G_{Me_nO_m}/m$ от его состава $\beta = m/n$ хорошо описывается параболической зависимостью, что в сочетании с условие разбавленности раствора Ме-О ($a_{Me} = c_{Me} \approx 1$), позволяет найти состав β^* равновесного с раствором оксида по формуле:

$$\beta^* = \frac{\beta_2 \sqrt{\beta_1 (\Delta G^* - \Delta G_1)} \pm \beta_1 \sqrt{\beta_2 (\Delta G^* - \Delta G_2)}}{\sqrt{\beta_1 (\Delta G^* - \Delta G_1)} \pm \sqrt{\beta_2 (\Delta G^* - \Delta G_2)}},$$

где $\Delta G_{1,2}$ – известные величины стандартной энергии образования оксидов составов $\beta_{1,2}$, нормированные на содержание кислорода в оксиде, а ΔG^* – минимум функции $\Delta G(\beta)$.

Термодинамическое прогнозирование стабильности керамических материалов в бинарном расплаве Sn-20% Li

Красин В.П., Союстова С.И.

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

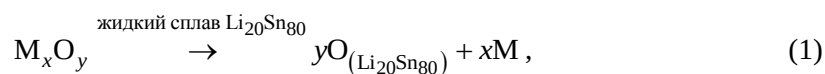
Ключевые слова: капиллярно-пористые системы, сплавы литий – олово, термодинамическая активность, энергия Гиббса реакции, внутрикамерные компоненты, тройной оксид, керамические материалы, энтропия смешения.

Для решения ряда вопросов, связанных с возможным использованием жидких сплавов Li-Sn в качестве жидкометаллического компонента капиллярно-пористых систем (КПС) в токамаках, возникает потребность в прогнозировании химической стабильности керамических материалов при контакте с этими сплавами. Термодинамический анализ взаимодействий между сплавом Li-Sn и тройными оксидами металлов (в состав которых входит литий) также представляет практический интерес, поскольку тройные оксиды, как известно из работ по изучению процессов с участием жидких сплавов $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$, могут являться продуктами коррозионных процессов при контакте конструкционных материалов с жидкими металлами.

Имеющиеся в литературе сведения о коррозионном поведении конструкционных материалов в жидких сплавах Li-Sn весьма ограничены. Некоторый опыт при исследовании растворов неметаллов в расплавах литий-олово, а также наличие общих черт, характерных для диаграмм состояния двух бинарных систем Li-Sn и Li-Pb, указывает на то, что именно кислород в расплаве Li-Sn, несмотря на свою чрезвычайно низкую растворимость, является той примесью, значение термодинамического потенциала которой определяет направление протекания многих химических процессов в этой жидкометаллической среде. В этом сплавы Li-Sn близки к сплавам системы Li-Pb и отличаются от жидкого лития, в котором роль коррозионно-активной примеси принадлежит азоту.

В двухкомпонентном расплаве Li-Sn именно химическая активность лития как одного из компонентов расплава определяет термодинамику и кинетику взаимодействия этого сплава с оксидами других металлов, включая и тройные оксиды с участием лития. Это объясняется достаточно просто, если принять во внимание что оксид лития Li_2O является высокостабильным соединением (характеризуется значительной по абсолютной величине отрицательной стандартной энергией Гиббса образования соединения $\Delta_f G_{298}^0(\text{Li}_2\text{O}) = -561,2 \text{ кДж} / (\text{г- атом кислорода})$). С другой стороны, олово образует существенно менее стабильный, с точки зрения термодинамики оксид SnO_2 , для которого $\Delta_f G_{298}^0(\text{SnO}_2) = -259,9 \text{ кДж} / (\text{г- атом кислорода})$.

Термодинамический анализ взаимодействий между жидкими сплавами Li-Sn и оксидами металлов существенно облегчается, если использовать методику, предложенную ранее для прогнозирования совместимости различных керамик с эвтектическим расплавом $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$. Сделать обоснованный прогноз о том, будет ли тот или иной оксид стабилен при контакте с жидким сплавом Li-Sn, можно, рассчитав изменение энергии Гиббса $\Delta_r G$ реакции. В случае, когда нас интересует совместимость двойного оксида M_xO_y с расплавом $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ (Sn-20%Li), мы имеем дело со следующей реакцией:



$$\Delta_r G = (1/x) \left[y \Delta_f G^0(\text{Li}_2\text{O}) - 2yRT \ln(a_{\text{Li}}) + 2yRT \ln(x_{\text{O}} / x_{\text{O}}^{\text{sat}}) - \Delta_f G^0(\text{M}_x\text{O}_y) \right], \quad (2)$$

где a_{Li} – термодинамическая активность лития в жидком $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$; x_{O} – содержание кислорода в $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ в мольных долях; $x_{\text{O}}^{\text{sat}}$ – концентрация насыщения кислорода в $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ при данной температуре; $\Delta_f G^0(\text{M}_x\text{O}_y)$ и $\Delta_f G^0(\text{Li}_2\text{O})$ – энергии Гиббса образования оксидов M_xO_y и Li_2O при температуре T ; R – универсальная газовая постоянная.

Положительные значения $\Delta_r G$ свидетельствуют о стабильности оксида при контакте с жидкометаллическим расплавом и, наоборот, в случае отрицательных величин $\Delta_r G$ следует ожидать, что равновесие в реакции (1) будет смещаться вправо, то есть будет проходить процесс восстановления оксида до металла.

При повышении температуры стабильность керамик в сплавах $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$, насыщенных по кислороду, возрастает, о чем свидетельствует увеличение значений $\Delta_r G$ для всех рассмотренных здесь соединений. Точно такая же закономерность была отмечалась при изучении стойкости оксидов металлов в жидком сплаве $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$. В обеих системах это можно объяснить тем, что при повышении температуры содержание кислорода в жидкой фазе увеличивалось, чтобы обеспечить выполнение условия $x / x_{\text{sat}} = 1$.

Проведенные вычисления показали, что в насыщенном кислородом жидком сплаве $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ большинство двойных оксидов металлов (например, Y_2O_3 , Al_2O_3 , Er_2O_3 , BeO) стабильны в отношении восстановления до металла, и только некоторые (например, Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , NiO) не стабильны. Значения $\Delta_r G$ для реакций между оксидами металлов и литием реакторной чистоты (очищенным холодной ловушкой при 473 К) свидетельствуют о том, что только небольшая часть из всех рассмотренных соединений (Y_2O_3 , Er_2O_3 , Sc_2O_3) стабильны в жидком литии при температурах 773 К и 1073 К.

Получение более достоверных прогнозных оценок о стабильности керамик в жидком сплаве Li-Sn стало возможным в настоящей работе благодаря использованию концентрационных и температурных зависимостей термодинамической активности лития в бинарной системе Li-Sn, полученных из анализа экспериментальных работ.

Анализ результатов расчета энергии Гиббса реакций между оксидами металлов и жидкими сплавами Li-Sn позволил оценить влияние температуры и содержания лития в сплаве на стабильность некоторых керамик в жидкометаллической среде. Принимая во внимание низкие значения растворимости кислорода в расплавах литий-олово, расчеты проводились для условий, близких к условиям функционирования жидкометаллических систем энергетических установок, когда раствор кислорода в жидком сплаве Li-Sn будет близок к насыщенному по этому химическому элементу.

Сравнение результатов термодинамической оценки стабильности керамик в жидком сплаве $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ с аналогичными оценками для тех же керамик в среде жидкого лития показало, количество оксидов подверженных разложению при взаимодействии с жидким литием существенно превышает число соединений, которые будут восстанавливаться до металла в расплаве Li-20%Sn. Отличия в поведении оксидных керамик в этих двух жидкометаллических средах связано с отрицательными отклонениями жидких растворов системы Li-Sn от идеальности, о чем свидетельствуют низкие значения термодинамической активности лития в этих растворах.

Доклад подготовлен в рамках выполнения базовой части государственного задания ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (проект FZRR-2020-0027).

Изучение поверхностного натяжения ртути в области отрицательных температур. Краткий обзор

Алчагиров Б.Б., Хибиев А.Х.

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

Ключевые слова: металлы, чистая ртуть, поверхностное натяжение, методы измерения, температурная зависимость, аномалии, область низких температур, метод большой лежащей капли, плавление и кристаллизация.

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

Вопрос о поверхностном натяжении ртути представляет также теоретический интерес, поскольку в литературе по настоящее время отсутствует единое мнение об абсолютной величине ПН чистой ртути и ее температурной зависимости. В частности, встречаются трудности в объяснении и интерпретации данных ряда опытов, в которых обнаруживаются отклонения политерм ПН ртути от линейной зависимости или наличие на них небольших, но вполне воспроизводимых экстремумов. При этом аномалии связываются с наличием существенного понижения плотности состояний в области поверхности Ферми в энергетическом спектре ртути (Н.Ф. Мотт, N.F. Mott, 1966 г., Х.И. Ибрагимов, докт. диссертация, 1979 г.).

ПН ртути достаточно полно изучено в области положительных температур, но работ, посвященных измерениям ПН ртути в области отрицательных температур, лишь единицы. Поэтому весьма важны дальнейшие прецизионные измерения по определению ПН ртути, проводить их в широких температурных интервалах, охватывающие область отрицательных температур, вплоть до кристаллизации ртути.

Данные $\sigma(T)$ Биннэ (H. Binne), полученные методом максимального давления в капле, описываются уравнением прямой с отрицательным температурным коэффициентом ПН $d\sigma/dT = -0,205$ мН/м·°C вплоть до перехода ртути в твердое состояние. Биркумшоу (L. Birsumshaw) изучил температурную зависимость ПН $\sigma(T)$ ртути методом максимального давления в газовом пузырьке. Полученные им данные оказались зависящими от длительности времени формирования пузырька: по мере увеличения продолжительности времени ПН ртути понижалось, причем наиболее существенно – в области отрицательных температур от -20 до $-38,83$ °C, (234,32 K). В частности, при -34 °C понижение ПН ртути (σ_{Hg}) в зависимости от времени формирования пузырька составило: при $t = 0$ мин $\sigma_{\text{Hg}} = 496$ мН/м, при $t = 15$ мин $\sigma_{\text{Hg}} = 480$ мН/м, а при $t = 30$ мин $\sigma_{\text{Hg}} = 466$ мН/м.

По данным Биркумшоу, вблизи температуры кристаллизации (при -35 °C) на политерме ПН ртути обнаруживается аномалия в виде максимума.

В работе С.В. Карпачева, М.В. Смирнова и З.С. Волченковой (1953 г.) ПН ртути измерено методом большой плоской лежащей капли в условиях высокого статического вакуума. Расчет ПН производился по результатам обмера лишь максимального радиуса капли и высоты расположения ее вершины над максимальным диаметром, то есть по

несовершенной методике. По их данным, при температуре 17 °С ПН ртути оказалось равным 484 мН/м. В этой же работе было измерено ПН ртути в зависимости от упругости паров воды при температурах: –25; 2; 16,5 и 30 °С: ПН ртути в парах воды ($3 \cdot 10^{-4}$ Па) при температуре $-25 \pm 0,05$ °С составило 491 мН/м, а для $d\sigma/dT$ получено значение –0,30 мН/м.

Таким образом, данные $\sigma(T)$ в предкристаллизационной области температур ртути не согласуются не только количественно, но и качественно. Общим недостатком этих работ является также малое число (только по 5–6) экспериментальных точек на температурной зависимости ПН ртути в интервале отрицательных температур от 0 до –38 °С.

В данной работе решается задача выяснения особенностей температурной зависимости ПН в области отрицательных температур, обращая при этом особое внимание на изучение $\sigma(T)$ вблизи к точке кристаллизации ртути. Для измерений ПН нами использован метод «большой» лежащей капли, которые осуществлялись в цельно-паяном приборе из молибденового стекла в условиях статического вакуума термодинамического равновесия поверхности исследуемой капли ртути со своим насыщенным паром, которое устанавливалось в отпаянной от откачного поста измерительной ячейке после ее вакуумирования и заправки в сверхвысоком вакууме.

Охлаждение измерительной ячейки при измерениях ПН в области отрицательных температур осуществлялось с использованием специально сконструированного термостата и измерительной ячейки с тройными вакуумно-изолированными друг от друга стенками. Пространства между одними стенками откачивались до сверхвысокого вакуума, а между другими – заполнялись жидким азотом для термостатирования его парами исследуемый образец капли. Температура термостатирующей жидкости поддерживалась постоянной в пределах $\pm 0,5$ °С. В опытах использовалась чистая ртуть марки Р-О (99,9997 % Hg).

В работе приведены результаты измерения ПН ртути в температурном интервале от комнатной (25 °С) до точки кристаллизации ртути, а также их обсуждение и сопоставление с наиболее надежными рекомендуемыми данными.

Выводы:

1. Несмотря на большой объем результатов измерений температурной зависимости ПН ртути, накопленный за всю историю исследований с 1880-х годов по настоящее время, имеются лишь несколько работ, посвященных изучению поверхностного натяжения ртути в области отрицательных температур.
2. Данные о ПН ртути в области отрицательных температур не согласуются не только количественно, но и качественно.
3. К недостаткам экспериментальных работ в области низких температур (в интервале от 0 до –38 °С) является малое количество (только по 5–6) точек на политермах ПН ртути.
4. Имеющийся в литературе экспериментальный материал все еще недостаточен для однозначного заключения об абсолютной величине ПН ртути и его температурной зависимости.
5. Измерения ПН чистой ртути, проведенные за последние несколько десятилетий, дают наиболее вероятную величину поверхностного натяжения ртути, равную 490 ± 5 мН/м при $t = -38$ °С.
6. В литературе отсутствуют исследования поверхностного натяжения ртути с использованием современных электронно-спектроскопических методов контроля состояния исследуемой поверхности.

Модель переноса продуктов коррозии ниобия в литиевом контуре охлаждения КЯЭУ

Гончар Н.И.

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

Ключевые слова: литиевый теплоноситель, ниобий, холодильник-излучатель, коррозия, растворимость, перенос, предельная концентрация, конвективная диффузия, диффузионный подслой, динамическое равновесие, размывание, осаждение.

В настоящее время идёт активная разработка малогабаритных ядерных источников энергии для космических аппаратов. Как один из вариантов рассматривается ЯЭУ с термоэмиссионными электрогенерирующими каналами (ЭГК) и литиевым теплоносителем, отдающим тепло через холодильник-излучатель (ХИ). Одним из основных вопросов при обосновании проекта такой ЯЭУ является расчёт защиты приборного отсека от гамма-излучения, создаваемого активной зоной и контуром охлаждения. Для решения этой задачи необходимо смоделировать и рассчитать распределение активности в активной зоне и в контуре охлаждения.

Миграция и распределение активности по контуру охлаждения обусловлены массопереносом продуктов активации (ПА) теплоносителя и продуктов коррозии конструкционных материалов. При использовании литиевого теплоносителя доминирует активность продуктов коррозии. Основной процесс коррозионного взаимодействия конструкционных материалов (ниобия) с жидкометаллическим теплоносителем (литием) в контуре охлаждения – растворение твёрдого металла в жидком.

Для литиевых систем характерен диффузионный режим растворения. В описании процессов, происходящих вблизи поверхности твёрдой фазы, используют понятия гидродинамического пограничного слоя и диффузионного пограничного слоя. Совокупность процессов диффузии и перемещения растворённого вещества в результате движения жидкости определена как конвективная диффузия.

В работе рассмотрены процессы массопереноса продуктов коррозии в неизотермичном ниобиевом контуре с литиевым теплоносителем. По ходу циркуляции в контуре изменяется температура лития и параметры растворимости в нём ниобия.

Представлена модель и расчётные оценки скорости растворимости и осаждения ниобия в контуре охлаждения. Контур разбит на участки с условно постоянными гидродинамическими условиями и постоянной или незначительно изменяющейся температурой (берётся среднее по участку значение). На «холодных» участках контура концентрация насыщения ниже, чем на «горячих», поэтому пришедший с более горячего участка литий окажется перенасыщенным, избыток ниобия выпадет в осадок и осядет на поверхностях более холодного участка.

После стабилизации процесса скорость растворения/осаждения на каждом участке будет постоянной. Критерий стабилизации – количество ниобия, растворившегося в контуре в течение одного цикла теплоносителя равно количеству ниобия, выпавшего в осадок. Стационарная концентрация растворённого в литии ниобия постоянна и одинакова на всех участках. Выведена формула для её расчёта.

Определение критических точек, которые недостижимы в статических экспериментах

Рахель А.Д.

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

Ключевые слова: свинец, свинцово-висмутовая эвтектика, тепловое расширение, коэффициент Грюнайзена, уравнение состояния, критическая точка, холодная кривая, термодинамическое подобие.

Критические точки жидкометаллических теплоносителей, которые недостижимы в статических экспериментах оценены путем экстраполяции термодинамических функций, измеренных в ограниченной области жидкого состояния, в область высоких температур и давлений (до критической точки). Однако указать точность таких оценок затруднительно.

Для исследования теплофизических свойств веществ при высоких давлениях и температурах в нашей лаборатории разработан динамический экспериментальный метод, который позволяет проводить измерения термодинамических функций и электропроводности для веществ с относительно высокой проводимостью: металлов, графита, плазмы. Методика состоит в том, что образец исследуемого материала в виде отрезка фольги или тонкой пленки (толщиной 10–30 мкм), помещается между двумя относительно толстыми пластинами сапфира или кварцевого стекла (толщиной 5 мм) и нагревается импульсом электрического тока за время $t \sim 1$ мкс. Такой динамический эксперимент позволяет реализовывать квазистатический процесс, при котором образец переходит из нормального состояния в состояния с температурой $T \leq 30\,000$ К и давлением $P \leq 10$ ГПа. Объем образца в течение этого процесса непрерывно растёт и может достигать значений в 8–10 раз больших, чем исходный (то есть нормальный объем в твердом состоянии), а давление сначала монотонно растет, достигая некоторого максимального значения в указанном выше интервале значений, а затем либо остаётся на этом уровне, либо уменьшается в несколько раз по отношению к максимальному значению, в зависимости от параметров эксперимента.

Используя этот динамический метод, ранее нами были получены (и опубликованы) уникальные экспериментальные данные для свинца и свинцово-висмутового эвтектического сплава. Было также показано, что эти данные позволяют построить достаточно точные уравнения состояния этих металлов для широкой области состояний на плоскости PV (V – удельный объем). С помощью этих уравнений состояния можно определить критические точки фазового перехода жидкость-газ. Важно отметить, что поскольку при построении уравнения состояния не используются никаких модельных предположений о его структуре то точность этого уравнения определяется исключительно точностью экспериментальных данных. В этой работе определена критическая точка свинца, параметры которой сравниваются с определенными ранее критическими параметрами свинцово-висмутовой эвтектики. Сравнивается также поведение термодинамических функций и электропроводности этих двух веществ в области перехода жидкость-газ и перехода металл-неметалл с таковыми для ртути и цезия с целью выявления термодинамического подобия. Наличие такого подобия предсказывалось в литературе, и оно использовалось для оценки критических точек.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20–21–00093).

Определение количества образующейся взвешенной фазы при взаимодействии воды с натрием

Алексеев В.В., Борисов В.В., Камаев А.А., Ганичев Н.С., Виценко А.С.

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

Ключевые слова: щелочь, вода, натрий, кислород, водород, концентрация, дисперсная фаза, трубный пучок, электрохимический датчик, разбавление продуктов реакции.

Как показывают измерения в экспериментах на стендах при взаимодействии воды с натрием не наблюдается баланса по количеству поданной воды и изменением концентрации кислорода и водорода в натрии. Количество растворенных в натрии примесей существенно ниже расчетных значений. Наиболее вероятной причиной такого расхождения является эффект образования взвешенной фазы щелочи в натрии в зоне реакции, где её концентрация достигает громадного пересыщения. До настоящего времени не был исследован этот процесс и неизвестна концентрация взвеси щелочи, а также процент воды, расходуемый на образование взвеси. С целью уточнения указанных параметров были выполнены расчеты по итогам экспериментов на модели с трубным пучком, выполненных на стенде Протва-1.

Трубный пучок был расположен в проточной камере, в межтрубном пространстве располагались электрохимические датчики контроля кислорода (ИКН). В нижней части камеры располагались впрыскивающие устройства для подачи воды в натрий. Натрий поступал снизу камеры и выходил через верхний патрубок.

При средней скорости потока натрия в межтрубном пространстве 1 м/с средняя величина разбавления продуктов реакции по межтрубному пространству пучка составляла 88 при их распространении на все сечение проточной камеры. Учитывая показания датчиков, получено, что изменения концентрации воды (эквивалент) на чувствительной поверхности ИКН-2 и ИКН-4 (при первой подаче воды) составляет 1,5 и 1,35 млн⁻¹, а на чувствительной поверхности ИКН-1 и ИКН-5 (при второй подаче воды) — 2,26 и 1,1 млн⁻¹ соответственно.

Используя эти данные, а также указанную величину разбавления раствора при его перемещении от зоны реакции до датчиков, получены фактические значения концентрации эквивалента воды у границ зоны реакции. Для ИКН-2 и ИКН-4 они составляют (С_и) 132 млн⁻¹ и 119 млн⁻¹ соответственно, а для ИКН-1 и ИКН-5 – 199 и 97 млн⁻¹. Расчет по балансу поданной воды дает величину концентрации воды в натрии (С_р) 800 млн⁻¹ при первой подаче воды и 1060 млн⁻¹ при второй подаче воды. Разность (С_р – С_и) представляет собой концентрацию продукта реакции, не участвующую в разбавлении, выраженную в единицах концентрации взаимодействующей с натрием воды. Предполагается, что на выходе из зоны реакции в преобладающем количестве образуется взвесь щелочи.

Таким образом, получено, что концентрация взвешенной фазы щелочи на выходе из зоны реакции при использовании в оценке показаний четырех датчиков составляет от 1480 до 2140 млн⁻¹ при этом процент воды, идущей на образование взвеси щелочи, составляет от 81,2 % до 90,8 %.

Образующаяся взвесь уносится потоком натрия в натриевый контур, где она частично растворяется в натрии и осаждается на поверхности оборудования, а также частично транспортируется в циркуляционном контуре. Ввиду отсутствия данных по ско-

рости растворения частиц щелочи и её распределению по контуру невозможно установить строгий баланс по кислороду и водороду в натрии до полного растворения частиц. Полученный результат свидетельствует о необходимости исследования процессов массопереноса и растворения частиц взвесей, образующихся в результате взаимодействия натрия с водой, с целью усовершенствования методов контроля течей в парогенераторах натрий – вода.

Оценка распределения продуктов взаимодействия воды с натрием в натрии

Алексеев В.В., Борисов В.В., Камаев А.А., Ганичев Н.С., Виценко А.С.

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

Ключевые слова: натрий, вода, концентрация, оксид натрия, щелочь, продукты реакции, водород, насыщенный раствор, осадок.

Вопрос количественного распределения продуктов взаимодействия воды с натрием в натрии при поступлении большого количества воды в контур с натрием имеет важное практическое значение.

При поступлении большого количества воды в натрий концентрации продуктов их взаимодействия могут превышать пределы насыщения в натрии, что приводит к выделению твердого осадка и в конечном итоге к забиванию каналов, по которым транспортируется натрий. Начало выделения твердой фазы зависит как от температуры натрия, так и от концентрации в нем воды.

Разработаны алгоритм и программа расчета для решения полученной системы уравнений с целью определения равновесных концентраций компонентов продуктов взаимодействия воды с натрием, а также количества осадка при различных количествах поданной воды и температурах натрия.

Рассматривался диапазон концентраций до несколько тыс. млн⁻¹ воды в натрии. Если не учитывать выход водорода при взаимодействии воды с натрием, то получим: насыщение натрия по гидриду натрия при 400 °С начинается с концентрации ~1600 млн⁻¹ воды в натрии, а при 300 °С – с концентрации ~220 млн⁻¹ воды в натрии. По оксиду натрия и щелочи насыщение при 300 °С достигается при 360 и 420 млн⁻¹ воды в натрии соответственно. Известные экспериментальные данные по растворимости щелочи в натрии отличаются в несколько раз: при 300 °С от 860 до 2600 млн⁻¹. По нашим оценкам эта величина составляет 640 млн⁻¹.

Получены зависимости концентраций компонентов продуктов взаимодействия воды с натрием от температуры натрия при поступлении 317 кг воды в 120 т натрия (2640 млн⁻¹ воды в натрии) при $\phi = 0,5$. Здесь ϕ – коэффициент, характеризующий долю воды, идущую на образование водорода. При 300 °С основная масса примесей по всем компонентам находится в нерастворенном состоянии. Выделение осадка оксида натрия начинается при температуре натрия ниже 440 °С, а гидрида натрия при температуре натрия ниже 412 °С. Щелочь осаждается при температуре ниже 365 °С.

При поступлении 31,7 кг воды в 120 т натрия (264 млн⁻¹ воды в натрии) и $\phi = 0,5$ выделение твердого осадка оксида натрия происходит при температуре натрия ниже 302 °С, а гидрида натрия при температуре ниже 295 °С.

При поступлении 64 кг воды в 120 т натрия (553 млн⁻¹ воды в натрии) и $\phi = 0,5$ при 400 °С все компоненты, образующиеся в реакции натрия с водой, находятся в растворенном состоянии.

Сравнительный анализ массообменных аппаратов для установок с интегральной компоновкой первого контура (теплоноситель – Pb-Bi, его объём – до 30 м³)

Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю.

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

Ключевые слова: тяжёлый жидкометаллический теплоноситель, массообменный аппарат, растворенный кислород, твердофазный источник кислорода, ядерный реактор, интегральная компоновка, сравнительных анализ, расчеты, реакторная установка

В свинцово-висмутовом теплоносителе для обеспечения условий формирования и поддержания в процессе эксплуатации защитных оксидных пленок на поверхностях конструкционных сталей, контактирующих с теплоносителем, необходимо регулируемое дозирование растворенного кислорода в теплоноситель. Регулируемая подпитка осуществляется массообменными аппаратами с твердофазным источником кислорода – оксидом свинца.

В настоящее время реакторные установки с теплоносителем свинец-висмут не рассматриваются больших мощностей, то есть для обеспечения их работоспособности не требуются сотни кубометров жидкометаллического теплоносителя. Для установок с тепловой мощностью до 280 МВт требуется не более 30 м³ жидкометаллического теплоносителя. Для повышения безопасности в конструировании реакторных установок преобладает подход использования интегральной компоновки первого контура. Учитывая, что такие конструкции установок имеют специфические особенности, то является актуальным рассмотреть конструкции массообменных аппаратов, которые могут быть в них использованы. Одной из таких особенностей является размещение массообменного аппарата в емкости, имеющей границу раздела «теплоноситель – газ», то есть необходимо рассматривать аппараты погружного типа.

В связи с этим в докладе авторы провели сравнительный анализ массообменных аппаратов погружного типа для установок со свинцово-висмутовым теплоносителем с интегральной компоновкой первого контура и объемом теплоносителя до 30 м³.

Подход к нормированию кислородного режима в жидкометаллических теплоносителях

Легких А.Ю., Асхадуллин Р.Ш., Иванов К.Д., Лаврова О.В.

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

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, измерения, нормируемый параметр, концентрация, кислородный режим, термодинамическая активность, электрохимический потенциал, ядерный реактор.

Тяжелые жидкие металлы (свинец, свинец-висмут) являются теплоносителями ядерных реакторов нового поколения. Использование тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) требует особых мер для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации ядерных реакторов с этими теплоносителями. К таким мерам относится контроль кислородного режима. Для количественной оценки содержания примеси кислорода в ТЖМТ разработаны и экспериментально обоснованы электрохимические датчики активности кислорода (ДАК). Эти датчики позволяют в непрерывном режиме измерять разность электрических потенциалов между электродом сравнения и контролируемой средой. Совместно со встроенными термопарами датчики позволяют измерить термодинамическую активность кислорода, однозначно характеризующую термодинамические условия в точке их расположения. К настоящему времени разработанные ДАК аттестованы в качестве средства измерения.

Между тем, исторически сложилось так, что эксплуатационные нормы на содержание примеси кислорода выражаются в виде диапазона концентрации растворенного кислорода (% мас.), который следует поддерживать имеющимися средствами регулирования.

Переход от измеренных показаний ДАК к массовой концентрации осуществляется путем расчета по принятым формулам, включающим уравнение Нернста и температурную зависимость растворимости кислорода в ТЖМТ.

В настоящем докладе авторы рассматривают историческую ретроспективу, касающуюся выбора нормируемого показателя кислородного режима ТЖМТ, а также обосновывают предложения для его изменения с целью использования в проектах ядерных энергетических установках нового поколения.

Традиционно принято нормировать концентрацию кислорода в жидкометаллическом теплоносителе. Однако концентрация кислорода однозначно не характеризует кислородный режим жидкометаллического теплоносителя, так как нужно измерять концентрацию именно того кислорода, который определяет состояние теплоносителя, то есть растворенного кислорода. Кроме того, параметром, линейно связанным с сигналом электрохимического датчика, является логарифм термодинамической активности кислорода (исходя из фундаментальных законов), а не концентрация. Вычисление концентрации приводит к дополнительным неопределенностям.

В водном теплоносителе есть аналогичный параметр – это рН. Концентрация водорода в воде однозначно не позволяет определить состояние водного теплоносителя, так как нужно уточнение: о каком конкретно водороде идет речь. Приборы, измеряющие рН, являются электрохимическими средствами измерений. Как известно, в воде нормируется значение рН, а не концентрация водорода.

Таким образом, является актуальным вопрос о пересмотре нормируемого параметра для контроля кислородного режима жидкометаллических теплоносителей, учитывая принцип действия электрохимических средств измерений, альтернативы которым в настоящее время нет. В данном докладе авторы предлагают подход к нормированию кислородного режима, дают его обоснование и сопоставление с традиционным подходом нормирования.

Исследование кинетики процесса удаления водорода с помощью гранулированного оксида меди в бескислородной газовой среде

Скобеев Д.А., Легких А.Ю.

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

Ключевые слова: тяжёлый жидкометаллический теплоноситель, оксид меди, водород, дожигатель водорода, удаление, кинетика, топохимические реакции, константа скорости реакции, степень восстановления, реакторная установка.

Для обеспечения штатной и безаварийной эксплуатации ядерных реакторов нового поколения с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) необходимо решение вопросов, касающихся их технологии.

Одним из таких вопросов является необходимость удаления водорода из газового объема контуров циркуляции ТЖМТ, который образуется в первом контуре в результате проведения технологического мероприятия по водородной очистке контура и в случаях нарушения нормальной эксплуатации, связанных с течами парогенераторов.

Одной из главных причин необходимости удаления водорода из защитного газа первого контура реакторных установок (РУ) с ТЖМТ является водородная безопасность. При запроектной аварии с разгерметизацией первого контура существует вероятность попадания в контур газообразного кислорода воздуха и образования «гремучей смеси». Поэтому концентрация водорода в защитном газе нормируется.

Особенностью защитного газа первого контура РУ с ТЖМТ является то, что в нем отсутствует кислород, в связи с чем использование существующих методов и устройств удаления водорода (каталитических рекомбинаторов, дожигателей с электрическим нагревателем), применяемых на действующих АЭС, не представляется возможным.

На данный момент наиболее перспективным методом удаления водорода из бескислородной газовой среды является процесс удаления (дожигания) водорода твердым окислителем с возможностью его регенерации. В качестве твердых окислителей рассматриваются различные оксиды металлов.

В настоящей работе представлены методика и результаты исследований кинетики процесса удаления водорода с помощью гранулированного оксида меди в бескислородной среде, позволяющие сделать вывод о перспективах его использования в качестве наполнителя дожигателя водорода.

Исследование особенностей проведения водородной очистки циркуляционных контуров со свинецсодержащими теплоносителями при помощи механических диспергаторов газовой фазы

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

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

Ключевые слова: свинецсодержащий теплоноситель, свинец, свинцово-висмутовая эвтектика, шлаки на основе оксида свинца, водород, водяной пар, газообразные окислители, механические диспергаторы газа, термодинамика, кинетика, энергия активации, степень восстановления, эжектор.

Выбор жидких металлов в качестве теплоносителей ядерных реакторов, объясним их свойствами. Жидкие металлы обладают лучшей по сравнению с другими теплоносителями молекулярной теплопроводностью, что определяет их преимущества как теплоносителей. Первой в качестве теплоносителя была опробована ртуть (реакторы Clementine и БР-2), позднее теплоносителем гражданских реакторов был выбран натрий, а теплоносителем реакторных установок для кораблей малого водоизмещения и большой мощности был выбран свинцово-висмутовый эвтектический сплав, позволивший достичь таких удельных массогабаритных показателей, которые невозможно достичь в установках с водяным теплоносителем. На сегодняшний день обосновывается использование свинецсодержащих теплоносителей в таких реакторных установках, как БРЕСТ-ОД-300, СВБР-100, ALFRED и др.

В процессе эксплуатации первых контуров вышеуказанных реакторных установок происходит в случае попадания в контур кислорода из воздуха образование шлаковых отложений на основе оксида свинца. Для очистки теплоносителей и контуров от твердых оксидов свинца могут применяться разные методы: фильтрация, обработка гидразингидратом ($N_2H_4 \cdot H_2O$), обработка газовыми смесями «водород – водяной пар – инертный газ». Последний метод является наиболее технологичным, предпочтительным и, как следствие, распространенным. Определяющей при этом является реакция взаимодействия водорода и оксида свинца с образованием водяного пара и свинца. Последний в процессе проведения очистки возвращается в состав теплоносителя.

Требование к составу восстановительной газовой смеси определяется тем, что при любых соотношениях парциальных давлений водяного пара и водорода, а также при любых температурах протекания процесса, газовая смесь должна иметь влажность, исключаящую возможность прямого восстановления железа из оксида железа и гарантирующую возможность восстановления свинца из оксида свинца. Наличие инертного газа в смеси определяется следующим: 1) обеспечение неосуществимости детонации и дефлаграции в случае полной разгерметизации газового контура и попадании газовой смеси в воздух окружающего контур помещения; 2) давление в газовом контуре должно быть выше атмосферного, даже в случае полного превращения водорода в водяной пар и его последующей конденсации, для исключения натеков кислорода воздуха из окружающего контур помещения; 3) облегчение контроля процесса очистки.

Химическое взаимодействие водорода и оксида свинца начинается при температурах выше 200 °С, а в диапазоне температур 300–350 °С процесс значительно ускоряется. Это объясняется исчезновением диффузионного барьера вследствие перехода продукта

реакции (свинца) из твердого состояния в жидкое. Кинетика подобных реакций описывается в общем случае уравнением Ерофеева:

$$\alpha = 1 - e^{-kt^n}, \quad (1)$$

где α – доля прореагировавшего вещества (степень восстановления оксида свинца); t – время от начала реакции; k – константа скорости реакции; n – эмпирический коэффициент.

Авторами проведены экспериментальные исследования кинетики реакции восстановления свинца из его оксида. В качестве экспериментальных образцов использовались гранулы оксида свинца, полученные путём прессования порошка и последующего обжига. Восстановление свинца проводилось при температурах 400, 500 и 600 °С. Обработка полученных данных показала, что механизм протекания реакции может быть описан уравнением Грея-Веддингтона «сокращающейся сферы»:

$$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = kt, \quad (2)$$

где: α – степень восстановления; k – константа скорости химической реакции, с^{-1} ; t – время, с.

Энергия активации реакции восстановления гранулированного оксида свинца в условиях эксперимента составила 32 кДж/моль. Погрешность её определения оценена в пределах $\pm 17\%$. Можно сделать вывод, что реакция протекает в переходной области реагирования. Это означает, что для повышения эффективности водородной очистки контуров со свинецсодержащим теплоносителем следует вводить газ с высокой степенью дисперсности непосредственно в объем циркулирующего теплоносителя.

В зависимости от конструктивных особенностей циркуляционного контура ввод газовой смеси в поток теплоносителя может быть осуществлен устройствами разного принципа действия: эжекторы и инжекторы, сопловые насадки, механические диспергаторы газа с движущимися элементами конструкции. Для каждого контура выбор устройства ввода газовой смеси индивидуален. Определяется он, в основном, средними скоростями опускного течения теплоносителя в контуре.

Если контур имеет петлевую компоновку, большие скорости опускных течений теплоносителя ($> 0,6$ м/с), его расход создается с помощью центробежных циркуляционных насосов, то оправдано применение эжекторов на байпасе насосов. Для осуществления эжекции газа часть расхода теплоносителя с напора вспомогательных или других насосов направляется в эжекционное устройство. Газовая смесь подводится к суженной части эжектора с давлением, превышающим давление в контуре в месте установки эжектора. Газ эжектируется потоком теплоносителя вследствие эффекта Вентури, а на лопатках насоса дробится и разносится по контуру, осуществляя очистку теплоносителя и контура. Проциркулировав по контуру, парогазовые пузыри сепарируются на поверхности раздела «теплоноситель – газ». Не полностью прореагировавшая водородосодержащая газовая смесь поступает в газовый объем контура, откуда вновь вводится в поток теплоносителя эжектором. Водяной пар конденсируется в холодных участках газового контура, контроль за ходом процесса проще всего осуществляется по скорости уменьшения концентрации водорода в газовой системе.

Проекты крупногабаритных реакторных установок имеют моноблочную или усовершенствованную петлевую конструкцию со значительными поверхностями раздела «теплоноситель – газ». Применение классических эжекторов для ввода газа в теплоноситель в них невозможно, но обоснованы механические устройства с движущимися частями (патент РФ № 2639721). Эти устройства, фактически, сочетают в себе небольшой насос и узкую часть эжектора.

Подобные устройства успешно эксплуатируются на стендах АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», АО «НИКИЭТ», ФГУП «НИТИ».

Результатам исследования эффективности водородной очистки свинецсодержащих теплоносителей при помощи механических диспергаторов газа посвящены материалы настоящего доклада.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калужской области (проект № 19-48-400003).

Изучение влияния понижения температуры на эффективность водородной очистки реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем

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

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

Ключевые слова: установка петлевой конструкции, водородная очистка, свинцово-висмутовый теплоноситель, свинец, восстановление свинца, оксид свинца, растворение свинца, кинетика растворения, энергия активации, скорость растворения свинца.

Водородная очистка свинецсодержащих теплоносителей является эффективным способом поддержания чистоты самих теплоносителей и поверхностей циркуляционных контуров. Выбор температуры проведения водородной очистки определяется, с одной стороны, тем фактом, что с повышением температуры существенно ускоряется процесс очистки, с другой стороны, технологичность процесса и простота вспомогательного оборудования побуждают снизить температуру до приемлемого уровня. Авторы не обнаружили достоверных данных об изучении растворения свинца в свинцово-висмутовом эвтектическом сплаве, поэтому провели его экспериментальное изучение в лабораторных условиях.

Эксперимент проводился в два этапа. Первый этап был направлен на доказательство возможности растворения свинца в свинцово-висмутовой эвтектике, на втором этапе исследовались кинетические закономерности рассматриваемого процесса.

Для исследования кинетики растворения твердого свинца в жидкой свинцово-висмутовой эвтектике был проведен второй этап эксперимента, методика которого приведена в докладе. Общая продолжительность эксперимента составила 16 часов. По результатам эксперимента построены кривые по полученным данным о скорости растворения и эффективная энергия активации процесса.

В результате анализа построенных кинетических кривых показано, что зависимость натурального логарифма удельной скорости растворения от обратной температуры удовлетворительно описывается прямой линией:

$$\ln(K_p) = -\frac{4939,2}{T} + 14,307, \quad (1)$$

или
$$K_p = 1,63 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{R \cdot T}\right), \quad (2)$$

где K_p – удельная скорость растворения, г/(с·см²); E_A – энергия активации данного процесса, $E_A \approx 41060$ Дж/моль, R – постоянная, $R = 8,314$ Дж/(моль·К); T – температура, К.

Таким образом образование металлического свинца в диапазоне температур от 150 до 327,5 °С не тормозит скорость проведения водородной очистки свинцово-висмутовой эвтектики. Исследованный процесс можно рассматривать как модель взаимодействия свинца, восстановленного из шлаков на основе оксида свинца в свинцово-висмутовом теплоносителе. Значение энергии активации позволяет говорить о том, что процесс растворения металлического свинца в свинцово-висмутовой эвтектике протекает в области, близкой к диффузионной.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калужской области (проект № 19-48-400003).

Анализ термодинамических особенностей поведения системы «Na – K – O»

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

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

Ключевые слова: натрий-калиевая эвтектика, теплоноситель, натрий, калий, ядерная энергетическая установка, космический аппарат, термодинамика, кислород, оксид натрия, оксид калия, активность, энергия Гиббса, оксид хрома.

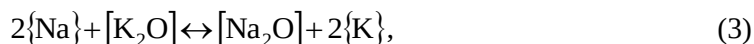
К важным проблемам, решаемым при помощи искусственных спутников Земли (космических аппаратов), можно отнести обеспечение бесперебойной связи во всех точках нашей планеты, точное предсказание метеорологической обстановки, исследование месторождений природных ресурсов и др. Расширение возможностей космических аппаратов зависит от масштабов энергоснабжения бортовой аппаратуры, от технических и эксплуатационных характеристик бортовых энергоустановок. Использование ядерных реакторов в системах энергоснабжения космических аппаратов практически может снять значительную часть ограничений в удовлетворении энергопотребностей для выполнения любых задач, появляющихся в ходе освоения космического пространства.

В то же время космическое применение ядерной энергетики предъявляет ряд специфических требований к энергоустановкам и их основному элементу – ядерному реактору. Так, например, в качестве теплоносителя ядерного реактора космического назначения может выступать натрий-калиевый эвтектический сплав. Такой выбор обусловлен наличием следующих критериев: хорошие ядерно-физические свойства; хорошие теплофизические свойства; низкая коррозионная и эрозионная активность по отношению к топливу и конструкционным материалам; высокая термическая и радиационная стойкость. Также натрий-калиевая эвтектика привлекательна из-за низкой температуры плавления, составляющей около – 12 °С, так как для ядерных энергетических установок космического назначения применение теплоносителя с низкой температурой замерзания настолько упрощает требования к конструкции системы охлаждения, что это качество перекрывает преимущества, например, натриевого теплоносителя, обладающего значительно лучшими теплофизическими свойствами и температурой плавления ~ 97 °С.

Как и для всех щелочных металлов, основной примесью натрий-калиевой эвтектики является кислород, выступающий инициатором образования взвешенных отложений в контуре циркуляции теплоносителя и катализатором коррозионных процессов. Так как в циркуляционном контуре ядерной энергетической установки неизбежно имеет место нарушение термодинамического равновесия из-за разности температур, различия в составе отдельных конструктивных узлов и элементов, то возникают условия для неизо-термического переноса массы. Это может сопровождаться растворением различных элементов в горячих участках контура с коррозионным повреждением поверхностей, переносом растворенных элементов по циркуляционному контуру, осаждением растворенных элементов в холодных участках контура с нарушением нормальных условий гидродинамики и теплообмена контура. Коррозионная стойкость используемых материалов может быть повышена за счет создания защитных покрытий, обеспечивающих диффузионный барьер для растворяющихся элементов.

Особенности рассматриваемых процессов выявляются при термодинамическом анализе протекающих химических реакций. Результаты расчетных исследований, приводимые авторами в настоящем докладе, важны для решения комплексной проблемы технологии теплоносителя ядерных энергетических установок космических аппаратов.

Авторы провели термодинамические расчеты (с применением упрощения), включающие компоненты натрий-калиевой эвтектики и кислород. Рассмотрены реакции:



где $\{\text{Na}\}$, $\{\text{K}\}$ – жидкие натрий и калий; (O_2) – газообразный кислород; $[\text{K}_2\text{O}]$, $[\text{Na}_2\text{O}]$ – взвешенные оксиды калия и натрия.

Выявлено, что в диапазоне температур от 98 до 784 °С равновесие может быть достигнуто при существенно большей активности оксида натрия по сравнению с оксидом калия. Это означает, что на каждую молекулу оксида калия в растворе будет приходиться от 10^2 до 10^7 молекул оксида натрия. Это утверждение верно, даже если есть условия для образования оксида натрия в твердой фазе, что соответствует активности оксида натрия равной единице, при этом активность оксида калия не будет достигать насыщения от 2 до 7 порядков, в зависимости от температуры.

Таким образом, образование оксида калия в твердой фазе в натрий-калиевой эвтектике не обосновано с позиции термодинамики – при анализе процессов массопереноса кислорода основное значение имеет реакция (1).

Движущая сила реакции образования оксида натрия (1), соответствующая отрицательному значению изменения энергии Гиббса, увеличивается при уменьшении активности оксида натрия. Анализ изменения энергии Гиббса при переменных значениях температуры и активности оксида натрия показывает, что с уменьшением активности оксида натрия в натрий-калиевой эвтектике от 1 до 10^{-3} возможность протекания процесса окисления возрастает, так как отрицательная величина энергии Гиббса увеличивается при уменьшении активности оксида натрия. В то же время с увеличением температуры от 98 до 784 °С возможность протекания этой реакции заметно падает.

Также выявлено, что стандартное изменение энергии Гиббса в реакции образования магнетита во всем диапазоне температур больше фактического изменения энергии Гиббса реакции (1) вне зависимости от значения активности оксида натрия. Это означает, что в натрий-калиевой эвтектике термодинамически обосновано существование примеси железа и не обосновано существование магнетита.

В то же время при температурах выше 250 °С при определенных значениях активности оксида натрия термодинамически обосновано существование оксида хрома. Это означает, что при использовании в качестве конструкционных материалов сталей, содержащих хром, и при поддержании определенных значений активности оксида натрия, возможно существование на поверхностях конструкционных материалов защитной диффузионно слабо-проницаемой пленки на основе оксида хрома.

Основные направления совершенствования моделей окисления конструкционных сталей в ТЖМТ

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

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

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, конструкционная сталь, модель окисления, коррозионная стойкость, оксидная пленка, диссоциация внешнего слоя, кислород, железо, баланс масс, коэффициент диффузии, матрица стали.

Процессы, связанные с взаимодействием конструкционных сталей с ТЖМТ, определяют принципиальную возможность создания реакторных установок, отвечающих современным требованиям по рабочим параметрам теплоносителя, ресурсу работы и безопасности эксплуатации. Хорошо известно, что это обеспечивается путем создания на поверхностях, контактирующих с теплоносителем, защитных барьеров, снижающих интенсивность данного взаимодействия. В настоящее время такими барьерами являются оксидные пленки, которые формируются, как правило, за счет окисления сталей, в том числе и в самом теплоносителе. Из этого с очевидностью вытекает важность адекватного описания окислительного процесса, которое реализуется в тех или иных моделях окисления конструкционных сталей.

Анализ реализованных на сегодняшний день подходов в моделировании процессов окисления конструкционных сталей в ТЖМТ показал, что современный этап характеризуется переходом от описания окислительного процесса в виде простейших форм кинетического уравнения, характеризующего изменение общей толщины оксидной пленки, к более детальному описанию процесса в виде системы нескольких уравнений, отражающих в общем случае баланс потоков кислорода и металлических компонентов стали.

Этот подход в большей степени соответствует современному состоянию экспериментальных методов исследования, позволяющих не только определять общую толщину оксидных пленок, но и количественно характеризовать более тонкую структуру оксидных пленок и прилегающих к ней слоев стали.

В отличие от предшествующих моделей реализация упомянутого выше подхода позволяет получить целый ряд преимуществ:

Во-первых, эта модель в явном виде содержит параметр, характеризующий интенсивность убыли толщины матрицы стали – основного показателя коррозионной стойкости стали;

Во-вторых, она учитывает процессы, протекающие не только в оксидной пленке, но и в смежных средах. Это позволяет более детально описывать характер изменения общей толщины оксидного слоя во времени, представляя данный процесс как суперпозицию процессов, протекающих на его внутренней и внешней границе;

Кроме того, используемый в данной модели способ описания окислительного процесса позволяет общие потери железа в теплоноситель представить в виде диффузионного выхода компонентов стали в теплоноситель и вследствие диссоциации внешнего оксидного слоя.

Одним из основных достоинств рассматриваемого подхода к моделированию окислительного процесса является его высокий потенциал развития. Для доказательства этого тезиса в работе рассмотрены три основных направления расширения возможностей использования этого подхода и конкретные примеры реализации этих возможно-

стей. При этом рассмотрены в основном те направления, которые предполагают включение в модель процессов и эффектов, и которые в настоящее время уже проявили себя в ходе экспериментальных исследований.

Первое направление касается естественного развития модели за счет учета большего количества металлических компонентов, которые реально в том или ином виде участвуют в окислительном процессе. Примером такого подхода может служить работа, где в рамках данной модели в формировании внутреннего оксидного слоя помимо железа рассмотрено также участие хрома и кремния.

Другим направлением совершенствования модели является подход, основанный на учете ряда эффектов, которые при определенных условиях реализуются в ходе окислительного процесса:

- одним из таких эффектов, который в рамках более ранних моделей вообще не учитывался, является эффект изменения состава оксидного слоя во времени;
- другим эффектом, наблюдаемым в некоторых случаях в экспериментах по окислению конструкционных сталей в ТЖМТ, является диссоциация внешнего слоя оксидных пленок. Этот процесс в модели окисления стали можно представить, как действие внутренних источников кислорода и железа на границе с ТЖМТ;
- еще одним эффектом, наблюдаемым в некоторых случаях в экспериментах по окислению конструкционных сталей в ТЖМТ, является диссоциация внешнего слоя оксидных пленок. Этот процесс в модели окисления стали можно представить, как действие внутренних источников кислорода и железа на границе с ТЖМТ.

Третье из рассмотренных направлений совершенствования модели окисления вытекает из необходимости разработки и включения в общую систему физических критериев смены режимов окисления, которые реально наблюдаются на практике.

Влияние термодинамической активности кислорода на границе раздела «сталь – теплоноситель» на массообмен железа и хрома

Лаврова О.В., Легких А.Ю.

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

Ключевые слова: тяжёлый жидкометаллический теплоноситель, окисление, конструкционная сталь, коррозия, модель, научный подход, термодинамический расчет, термодинамическая активность, кислород, железо, хром, оксидная фаза, металлическая фаза, массоперенос.

В неизотермических циркуляционных контурах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) наряду с образованием на поверхностях конструкционных сталей оксидных пленок, обеспечивающих их коррозионную стойкость, происходит поступление в теплоноситель компонентов стали и их массоперенос по контуру циркуляции.

Процессы поступления компонентов сталей в теплоноситель важно учитывать при разработке установок с ТЖМТ, поэтому развитие научных подходов, объясняющих эти процессы, является актуальным.

Одним из факторов, влияющих на выход компонентов сталей в теплоноситель, является селективность окисления этих компонентов, которая в свою очередь зависит от термодинамической активности кислорода на границе раздела «сталь – теплоноситель».

Используя научный подход, основанный на термодинамическом анализе систем «железо – кислород», «хром – кислород» и «свинец – кислород», авторами выполнен качественный анализ влияния термодинамической активности кислорода на границе раздела «сталь – теплоноситель» на массоперенос компонентов конструкционной стали: железа и хрома.

Результаты данного анализа позволяют объяснить значительное превышение потоков железа над потоками хрома из сталей в тяжелые жидкометаллические теплоносители и механизм преобразования магнетита в хромистые шпинели, а затем в оксид хрома.

Термодинамические расчеты выполнены с использованием справочных данных [1–3].

Список литературы

1. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies Edition // NEA, 2015. – No. 7268. – 949 p.
2. Куликов И.С. Термодинамика оксидов. Справочник. – М.: Металлургия, 1986. – 344 с.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание в четырех томах / Под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1978.

Газофазное окисление, как метод нейтрализации недренируемых остатков ЩЖМТ в оборудовании

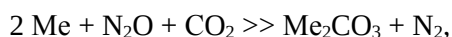
Смыков В.Б., Легких К.Г.

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

Ключевые слова: реакторы на быстрых нейтронах, ИР БР-10, РУ типа БН, щелочные металлы, нейтрализация, недренируемые остатки щелочного металла, ХЛО, газовая смесь-реагент.

Развитие реакторов на быстрых нейтронах обусловлено стремлением многих стран перейти к замкнутому топливному циклу, что является и приоритетным направлением МАГАТЭ. На сегодняшний день России принадлежит технологический приоритет в разработке реакторов на быстрых нейтронах и их эксплуатации, что открывает практически неограниченные возможности для использования энергетического потенциала ядерного топлива, в том числе отходов АЭС. Учитывая вариации таких РУ, стоит отметить, что успешно эксплуатируются АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемыми щелочным теплоносителем. Безаварийный опыт эксплуатации БН-600 Белоярской АЭС, превышающий 40 лет, указывает на устойчивое развитие и надежность РУ данного типа. Однако еще на стадии проектирования любой РУ необходима концепция вывода из эксплуатации создаваемого объекта атомной энергетики. В России на стадии вывода из эксплуатации находится исследовательский реактор БР-10, готовится к останову БОР-60. В Казахстане ожидается вывода из эксплуатации БН-350, в Японии – Монджу, во Франции – Рапсодия, Феникс. Поэтому разработка технологий вывода из эксплуатации не теряет актуальности, а методы переработки отработавшего щелочного теплоносителя продолжают развиваться. Стоит обратить внимание, что не все из них применимы для очистки реакторного оборудования от недренируемых остатков щелочного теплоносителя.

Для решения задачи по нейтрализации недренируемых остатков щелочного металла на базе ИР БР-10 проводились многолетние исследования, которые позволили разработать метод газофазного окисления. Метод основан на взаимодействии щелочного металла с газовой смесью-реагентом. Смесью-реагентом состоит из закиси азота и углекислого газа. Процесс газофазного окисления протекает следующим образом:



где Me – щелочной металл или сплав щелочных металлов.

Основные технологические параметры процесса взаимодействия щелочного с газовой смесью-реагентом были отработаны экспериментально на стендах ЛУИЗА и ЛУИЗА-Т (ИР БР-10). Таким образом, было разработано научно-техническое обоснование для безопасного обезвреживания недренируемых остатков щелочного металла в отдельном оборудовании ИР БР-10 (ХЛО, баки, сильфоны, трубопроводы). На основании полученного опыта и достигнутых результатов был разработан, изготовлен и пущен в эксплуатацию модуль ЛУИЗА-РАО в реакторном зале ИР БР-10 для обезвреживания недренируемых остатков радиоактивного натрия в отработанных ХЛО 1-го контура и в сливных баках 2-го и 1-го контуров. К настоящему времени обезврежены 10 отработавших ХЛО первого контура и два сливных бака второго контура.

Секция 2.

Гидродинамика и теплообмен в реакторных установках с жидкометаллическими теплоносителями

Моделирование процесса кипения жидких металлов в модельных сборках быстрых реакторов в аварийных режимах

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

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

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

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

Моделирование на современном уровне динамического кипения щелочных жидких металлов имеет важное значение для комплексного анализа нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны реакторов на быстрых нейтронах в аварийных ситуациях при одновременном прекращении энергоснабжения всех главных циркуляционных насосов и отказе органов аварийного останова реактора (авария (UTOP, ULOF) при обосновании их безопасности.

Кипение жидких металлов в стесненных каналах ТВС является сложным и динамичным высокотемпературным процессом (температура насыщения натрия при атмосферном давлении 883 °С). Динамика образования паровой фазы может быть взрывной, особенно с учетом возможного перегрева жидкого металла относительно температуры насыщения при вскипании. С учетом этих факторов оперативное управление установкой во время экспериментов осуществляется с высокой скоростью, запись и обработка данных ведутся непрерывно в реальном времени.

Результаты проведенных экспериментальных работ на стенде AP-1 и расчетных с использованием модифицированного расчетного кода SABENA-3D исследований кипения жидких металлов в модельных ТВС в режиме естественной конвекции показали, что режим устойчивого пузырькового кипения в модельных ТВС отмечается лишь в ограниченной области тепловых потоков, его переход в режим неустойчивого пульсационного снарядного кипения определяется разными факторами.

В системе параллельных ТВС возникновение колебательного процесса при кипении теплоносителя в одной из ТВС приводит к противофазному колебательному процессу в другой ТВС, в дальнейшем колебания в различных контурах носят противофазный характер. Гидродинамическое взаимодействие контуров с течением времени приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний расхода теплоносителя в них

(«резонанс» пульсаций расхода) и возможному «запиранию» или инверсии расхода теплоносителя в контурах, росту температуры теплоносителя и оболочки тепловыделяющих элементов (эффект межканальной неустойчивости) и, в конечном итоге, к возникновению кризиса теплообмена.

Границы переходов от пузырькового к снарядному, дисперсно-кольцевому и дисперсному режимам течения двухфазного потока жидкого металла в пучках твэлов аппроксимируются простыми зависимостями. Картограммы режимов течения двухфазного потока жидких металлов в моделях ТВС в одиночных контурах и при их параллельной работе согласуются между собой и существенно отличаются от картограммы для воды.

Теплоотдача при кипении жидких щелочных металлов в сборках твэлов и трубах в диапазоне плотности теплового потока свыше 100 кВт/м^2 выше в 1,5 раза, чем при кипении в большом объеме. Коэффициенты теплоотдачи имитаторов твэлов при кипении жидкого металла в моделях ТВС в одиночных контурах и при их параллельной работе согласуются между собой.

Результаты проведенных расчетов по модифицированному коду SABENA-3D демонстрируют противофазные пульсации расхода теплоносителя в параллельных ТВС, межканальную неустойчивость, характеризующиеся значительным возрастанием амплитуды пульсаций расхода теплоносителя в параллельных ТВС по сравнению с одиночными ТВС, периодическим падением расхода теплоносителя в ТВС практически до нуля и с возможным осушением ТВС.

Показано, что результаты расчетов по кипению натрий-калиевого сплава в системе параллельных модельных ТВС быстрых реакторов с использованием модифицированного поканального теплогидравлического кода SABENA-3D согласуются с результатами экспериментальных исследований.

Таким образом, модифицированный расчетный код SABENA-3D позволяет моделировать гидродинамическую устойчивость циркуляции теплоносителя и теплообмен при кипении жидкого металла как в одиночных ТВС, так и в системе параллельных ТВС в контурах с естественной конвекцией теплоносителя.

Влияние упругой деформации, создаваемой перепадом давления между контурами, на теплоотдачу в пластинчатых теплообменных аппаратах

Матяш А.С., Лычаков В.Д.

Открытое Акционерное Общество «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»,
(ОАО «НПО ЦКТИ»), Санкт-Петербург,
matyash-93@yandex.ru

Ключевые слова: пластинчатый теплообменный аппарат, упругая деформация теплообменных пластин, конденсация водяного пара, принудительная конвекция.

Разборные пластинчатые теплообменные аппараты (далее – РПТА) в настоящее время широко применяются в нефтехимической, пищевой промышленности, в сфере ЖКХ, а также во многих вспомогательных системах АЭС. РПТА заложены для использования во многих системах типовых проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ.

В Испытательном центре энергетического оборудования (ИЦЭО) ОАО «НПО ЦКТИ» на комплексном стенде КС10606 в период с 2015 по 2021 год были проведены испытания РПТА, изготовленных тремя различными производителями. В общей сложности был испытан 21 тип пластин различных типоразмеров и с различными углами наклона шевронной поверхности. Все испытания проводились при принудительной циркуляции воды в одном из контуров, в другом контуре осуществлялись различные режимы, а именно: принудительная циркуляция воды, конденсация чистого водяного пара, конденсация пара из паровоздушной смеси, охлаждение воздуха. На основании накопленного опыта лабораторных исследований было обнаружено, что при наличии разности давлений между контурами РПТА выше определенного предельного значения имеет место «эффект дыхания», то есть происходит упругая деформация теплопередающих пластин в направлении от контура с большим давлением к контуру с меньшим давлением.

Данный эффект приводит к изменению площадей проходного сечения контуров. Площадь проходного сечения контура с меньшим давлением снижается, что приводит к увеличению скорости среды, как следствие, к увеличению коэффициента теплоотдачи, но также к значительному увеличению гидравлического сопротивления (до 3,5 раз). Площадь проходного сечения контура с большим давлением увеличивается, что приводит к снижению скорости среды и, как следствие, снижению коэффициента теплоотдачи. Возможность возникновения данного эффекта вызвана тем, что при сборке РПТА в инструкциях производителей описано, что расстояние между стяжными плитами, то есть глубина собранного пакета пластин (далее – H) должна находиться в некотором диапазоне от H до $1,1 H$. Глубине пакета пластин H соответствует полная посадка вершин выступов шевронных поверхностей теплопередающих пластин, формирующих один контур на вершины выступов шевронных поверхностей теплопередающих пластин, формирующих второй контур. Данный запас по глубине пакета пластин необходим для возможности повторной сборки РПТА после очистки теплообменных пластин. В связи с накоплением остаточной деформации полимерных уплотнений после каждой сборки РПТА необходимо постепенное снижение глубины пакета пластин для достижения герметичности РПТА.

Стоит отметить, что методика расчёта влияния данного эффекта не описана в технической документации производителей и технической литературе. Однако, данный эф-

фekt наблюдался у большей части испытываемых образцов. Как было сказано ранее, полученные отличия коэффициентов сопротивления трения при течении в контуре с меньшим давлением достигали 3,5 раз по сравнению с коэффициентами сопротивления трения, полученными при равных давлениях в контурах. Настолько серьёзные отличия реальных потерь давления при эксплуатации от расчётных могут привести к значительному снижению расхода одной из сред, что может привести к невыполнению вспомогательной системы АЭС своей функции.

Анализ полученного в ИЦЭО ОАО «НПО ЦКТИ» массива экспериментальных данных показал, что при течении воды близких расходов в обоих контурах отличие экспериментального коэффициента теплопередачи (k) от расчётного минимально, так как уменьшение коэффициента теплоотдачи в контуре с большим давлением (α_6), вызванное снижением скорости среды, компенсируется увеличением коэффициента теплоотдачи в контуре с меньшим давлением (α_m). Однако, РПТА используются также для работы на средах, имеющих различные физические свойства. Например, для охлаждения водой турбинного масла, ведь в таком случае, снижение коэффициента теплоотдачи от масла, находящегося при меньшем давлении в пределах, вызываемых упругой деформацией пластин может снизить коэффициент теплопередачи до 25 %, что приведёт к невыполнению расчётных режимов работы РПТА.

Моделирование пространственной гидродинамики в активной зоне реакторной установки стенда КМ-1

Вакарин А.В., Грановский В.С., Грицай А.С., Румянцев С.Н.

*Федеральное государственное унитарное учреждение «НИТИ им. А.П. Александрова»,
Сосновый Бор, rumyantsev.sn@niti.ru*

Ключевые слова: реакторная установка, свинцово-висмутовый теплоноситель, активная зона, пространственная гидродинамика, контурная теплогидравлика, расчет, эксперимент.

Одним из перспективных направлений развития ядерной энергетики является применение установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ), в качестве которого может использоваться эвтектический сплав свинца и висмута. В 1978-1986 гг. во ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» на стенде КМ-1 проводились испытания реакторной установки (РУ) транспортного назначения со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ), результаты которых применимы, в частности, для валидации расчетных программ, предназначенных для численного моделирования теплогидравлических процессов в установках с ТЖМТ. Одной из таких программ является КОРСАР/ЖМТ – разработанный в НИТИ одномерный расчетный код (РК) контурной теплогидравлики, который позволяет осуществлять численное моделирование динамики теплогидравлических систем и РУ, включающих в себя циркуляционные контуры как с СВТ, так и с водяным теплоносителем, при различных составе и компоновке оборудования.

При проведении испытаний впервые была использована автоматизированная система, позволяющая регистрировать экспериментальные данные в цифровом формате. Наиболее информативным для анализа теплогидравлических процессов в активной зоне (а.з.) реактора, является поле температур на выходе а.з., измеренное с помощью 129 датчиков температуры, входящих в состав терморешетки.

Непосредственный анализ экспериментальных данных показал, что указанное температурное поле имеет сильную неравномерность с выраженными максимумами и минимумами. Эта неравномерность повторяется на разных уровнях мощности в различные моменты кампании, отражая пространственный характер течения СВТ, обусловленный затесненностью внутриреакторного пространства, многопетлевой схемой с азимутальной асимметричностью петель относительно реактора, бесчехловыми ТВС. С другой стороны, пространственный характер течения теплоносителя в пределах каждой ТВС связан, главным образом, с тем обстоятельством, что наряду с твэлами в состав ТВС входят размещенные в кессонах стержни ОР СУЗ, которые вносят существенную неравномерность в регулярную решетку твэлов.

Отмеченные пространственные эффекты затрудняют прямое применение одномерного РК для моделирования теплогидравлики а.з. и требуют для их учета проведения предварительного анализа с использованием расчетных программ, обеспечивающих пространственное моделирование гидродинамических процессов. С этой целью был применен программный комплекс STAR-CCM+.

Расчетная модель включала в себя весь проточный тракт реактора от входных до выходных патрубков, в том числе коллекторы, опорные плиты, плиту терморешетки, полости и фильтр. Для ряда элементов тракта, прежде всего а.з., использовалось приближение пористого тела. Необходимые для этого коэффициенты определялись либо путем проведения расчетов на моделях соответствующих элементов, либо с использованием справочных данных для коэффициентов гидравлического сопротивления.

При проведении расчетов в качестве граничных условий задавались экспериментальные расходы в петлях, и по результатам пространственных расчетов была установлена заметная неравномерность распределения расхода (скорости) СВТ по радиусу и высоте а.з.

Полученные результаты пространственного моделирования распределения расхода использовались для настройки поканальной модели а.з. на основе РК КОРСАР/ЖМТ. Данная задача решалась следующим образом. Ряд расчетных ячеек по высоте каждого из 37-ми каналов, моделирующих ТВС, связывался по теплогидравлике с ячейками соседних ТВС в соответствии с картограммой. Гидравлические сопротивления всех указанных связей принимались одинаковыми. Энерговыведение в ТВС задавалось в соответствии с результатами расчетов нейтронно-физической модели а.з., выполненных с помощью комплекса программ САПФИР_РФ&РС. В качестве граничных условий задавались температура СВТ на входе в а.з. и расходы на входе и выходе каждого канала, моделирующего ТВС, полученные по результатам пространственного гидродинамического расчета. При таком подходе в поканальной модели а.з. (с учетом несжимаемости среды), благодаря перетечкам, происходит самораспределение расходов по высоте а.з., соответствующее результатам трехмерного расчета.

Расчетная модель на основе STAR-CCM+ для анализа пространственного течения в пределах ТВС включала в себя части опорной плиты и плиты терморешетки, твэльный пучок и кессон со стержнями ОР СУЗ. Для конкретного экспериментального режима и конкретной ТВС задавались граничные условия по расходу СВТ на входе ТВС, полученные в пространственном расчете а.з., температура СВТ на входе и давление на выходе. Потвэльное распределение энерговыведения задавалось по результатам нейтронно-физического расчета.

В серии расчетов было проанализировано влияние следующих факторов: проточного кессона, протечек теплоносителя между плитами опор твэлов соседних ТВС, спиральной навивки на оболочках твэлов, теплопроводности твэлов, энерговыведения в стержнях регулирования. Сравнительными расчетами и сопоставлением расчетов с экспериментальными значениями температуры, зарегистрированной датчиками терморешетки, было установлено, что значимыми являются только два фактора из перечисленных – влияние проточной части кессона и энерговыведение в стержнях ОР СУЗ. Следовательно, только эти два фактора необходимо учитывать в одномерных расчетах ТВС.

Расчетная модель ТВС на основе РК КОРСАР/ЖМТ представляет собой систему идентичных параллельных каналов, в совокупности моделирующую межтвэльное пространство и связанные с ними теплопроводящие конструкции – твэлы, а также параллельных каналов, в совокупности моделирующих пространство, образованное оболочкой кессона и окружающими его твэлами. С этими каналами связан канал, моделирующий проточную часть кессона со стержнями ОР СУЗ. С определенной дискретностью расчетные ячейки каждого из каналов гидравлически связаны с ячейками соседних каналов в соответствии с картограммой. Энерговыведение задавалось так же, как в пространственных расчетах. В качестве граничных условий задавались отдельно расходы на входе в «твэльную» часть и в кессон, полученные пространственным расчетом, температура СВТ на входе и давление на выходе.

Сопоставление расчетов ТВС РК КОРСАР/ЖМТ с экспериментальными данными подтвердило их приемлемую точность – неопределенность расчета выходной температуры составила 10%.

Таким образом, анализ пространственной гидродинамики в активной зоне РУ стенда КМ-1 позволил обосновать методику моделирования указанных теплогидравлических процессов одномерным расчетным кодом КОРСАР/ЖМТ.

Исследование особенностей теплогидравлики в ТВС быстрого натриевого реактора с широким относительным шагом решетки

Бландинский В.Ю., Лубина А.С.

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

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

В данной работе представлены результаты исследования особенностей гидродинамики и теплообмена ТВС активной зоны реактора-бридера большой мощности с высоким темпом наработки вторичного ядерного топлива. С учётом ограничения по интегральному потреблению природного урана на уровне 20 млн т до 2100 г. к быстрым реакторам будут предъявляться довольно высокие требования: стартовая загрузка топливных нуклидов на уровне 3–4 т/ГВт(э), избыточная наработка делящихся нуклидов порядка 300 кг/ГВт(э)/год. Такие параметры могут быть достигнуты в быстром реакторе с активной зоной высокой энергонапряжённости (до 2500 ГВт/м³ топлива) при использовании плотного металлического топлива и натриевого теплоносителя.

Для обеспечения надежного теплосъёма при столь высокой энергонапряжённости топлива можно совместить использование в конструкции ТВС твэлов малого диаметра и прослабленной топливной решетки.

В качестве одного из возможных вариантов была рассмотрена конструкция ТВС, состоящая из твэлов уменьшенного диаметра (6,1 мм) в прослабленной твэльной решетке с $s/d = 1,336$. Для дистанционирования твэлов предполагалось использовать проволочные навивки типа «ребро-по-ребру».

Другой вариант ТВС был представлен в виде кассеты с такими же твэлами, но с еще более раздвинутой твэльной решеткой до $s/d = 1,395$. В этой ТВС предполагается использование дистанционирующих решеток.

Для варианта конструкции чехловой ТВС со 331 твэлами малого диаметра (6,1 мм), расположенными с шагом $s/d = 1,336$ и дистанционируемыми проволочными навивками типа «ребро-по-ребру» характерным является хорошая выровненность подогревов теплоносителя по ячейкам ТВС. Это качество позволяет снизить скорость потока в ТВС ниже 4 м/с. Так, при скорости 3,7 м/с подогревы в ТВС различаются не более, чем на 15 К. При среднем подогреве в максимально напряженной ТВС 234 °С максимальные температуры оболочек твэлов в кассете не превышают (без учета факторов неопределенности) 550 °С, а максимальные азимутальные неравномерности температур для центрального, периферийного и углового твэлов в варианте не превышают 2, 5,5 и 6 К, соответственно. Перепад давления на такой ТВС имеет довольно умеренное значение – 2,5 бар, благодаря невысокой скорости теплоносителя и прослабленной решетке твэлов. Таким образом, данная конструкция ТВС при умеренной скорости теплоносителя обеспечивает надежное охлаждение при очень больших тепловых потоках с поверхности твэлов, достигающих 2,5 МВт/м².

В чехловой ТВС с широким шагом ($s/d = 1,395$) расположения 469 твэлов, дистанционируемых решетками, можно добиться довольно хорошей выровненности температур теплоносителя и оболочек, за исключением угловых твэлов. Для снижения азиму-

тальных неравномерностей температур оболочек угловых твэлов был испытан способ, а именно, предложено увеличение площади угловой ячейки ТВС за счет либо выдавливания канавки в углу чехла, либо проточки в углу чехла, шириной 7 мм и глубиной не более 0,4 мм. В таком оптимизированном варианте конструкции ТВС максимальные температуры наружной поверхности оболочек углового, периферийного и центрального твэла оказываются довольно близкими и составляют 591, 587 и 586 °С соответственно. При этом азимутальная неравномерность температуры оболочки углового твэла не превышает 5–10 °С, периферийных твэлов 10 °С и центральных твэлов 1,5 °С. Перепад давления на ТВС не превышает 1,9 бар, а средний подогрев (с учетом межкассетного зазора) составляет 227 °С.

Таким образом, данный вариант конструкции ТВС также позволяет обеспечить надежный теплоотвод от твэлов при больших тепловых потоках (2,5 МВт/м²). Кроме того, данный вариант конструкции ТВС имеет увеличенный размер «под ключ» при небольшой толщине чехла (2 мм). Вместе с тем, что в данной конструкции вместо проволок используются дистанционирующие решетки, доля стали в активной зоне снижается до 18 %, что улучшает нейтронный баланс и снижает положительный пустотный эффект реактивности.

Широкий шаг расположения твэлов в ТВС ($s/d = 1,395$) позволяет применить бесчехловую конструкцию кассеты. Однако, для снижения неравномерностей температур в ТВС требуется существенно увеличить скорость потока теплоносителя (до 5,6 м/с). При этом возрастает перепад давления на ТВС до 3 бар, а средний подогрев снижается до 150 °С. Для получения требуемых температур на выходе реактора при этом необходимо повысить входную температуру теплоносителя в реакторе до 400 °С. Поскольку периферия бесчехловой ТВС не экранируется от межкассетного зазора чехлом, то неравномерности температур вокруг периферийного ряда твэлов в такой ТВС заметно выше, чем в чехловом варианте этой кассеты, тем не менее масштаб неравномерностей температур оболочек твэлов периферийного ряда можно считать приемлемым. Так, в случае 2 мм межкассетного зазора неравномерности температур оболочек углового и периферийного твэлов достигали 24 и 28 °С соответственно, а в случае 1 мм межкассетного зазора они понизились до 13 и 14 К, соответственно. При этом возможное изменение межкассетного зазора в диапазоне 1–2 мм не существенно влияет на изменение максимальных температур в ТВС и неравномерностей температур оболочек твэлов.

Для варианта ТВС с шагом решетки 1,395 была выбрана картограмма активной зоны и проведены нейтронно-физические расчеты реактора. Активная зона состояла из двух областей с различным содержанием плутония: зоны малого содержания плутония (85 ТВС с U81,5-Pu12,5-Zr6,0 топливом) и зоны высокого содержания плутония (96 ТВС с U77,1-Pu16,9-Zr6,0 топливом). Доли плутония на данный момент подобраны таким образом, чтобы обеспечить равные средние линейные нагрузки в стартовом состоянии. Активная зона окружена тремя рядами боковой зоны воспроизводства (180 ТВС).

Расчеты топливной кампании показали, что в данной компоновке активной зоны достигается довольно высокий уровень избыточной наработки изотопов Pu-29 и Pu-241 – 504 кг/ГВт(эл)/год, что значительно превышает целевой ориентир в 300 кг/ГВт(эл)/год. Кроме того, данная компоновка характеризуется довольно высоким запасом реактивности, который может быть снижен за счет уменьшения содержания плутония, что приведет к дальнейшему повышению избыточной наработки топлива. В результате можно будет уменьшить количество ТВС бокового экрана до двух рядов.

Также нейтронно-физические расчеты показали, что максимальные линейные тепловые нагрузки в активной зоне не превышают допустимых пределов. Однако макси-

мальная повреждающая доза в оболочке твэлов за кампанию топлива 2×220 сут достигает значения 83 сна, что является довольно высокой величиной для стали ЧС-68. Расчеты теплогидравлики ТВС с широкими топливными решетками с учетом факторов неопределенностей показали, что температуры оболочек твэлов в ТВС с широкими твэльными решетками ($s/d = 1,395$) не превышают 650°C . Таким образом, в качестве конструкционных материалов в таких ТВС могут рассматриваться стали ферритно-мартенситного класса.

Экспериментальное исследование пространственной структуры поперечных течений в пучке имитаторов твэлов с проволоочной навивкой

Шестаков М.В., Токарев М.П.

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
maximvsh@gmail.com*

Ключевые слова: сборки с проволоочной навивкой, локальная гидродинамика, вихревые структуры, межканальное перемешивание, проволоочное дистанционирование, структура течения в межканальном пространстве ТВС, метод PIV.

Разработка современного высоконапряженного оборудования в тепловой и атомной энергетике требует знания о характеристиках течения теплоносителя: полей скорости, давления, температуры и др. Это является особо актуальным для проблем интенсификации теплообмена в активных зонах ЯЭУ. Производительность реактора, а также равномерность температуры теплоносителя и поверхностей твэлов сильно зависят от структуры турбулентного потока, формирующегося в ячейках ТВС и межтвэльном пространстве. Знание характеристик и особенностей турбулентного поперечного течения в пучках стержней имеет важное значение для точного прогнозирования характеристик реактора в условиях проектирования и постулируемых авариях.

В сборке тепловыделяющих элементов с проволоочной навивкой течение носит крайне сложный трёхмерный характер, обусловленный вихревыми структурами, локальными вторичными и отрывными течениями. Ввиду формирования столь сложного турбулентного течения большинство исследовательских работ проведено при помощи численного моделирования. Однако результаты численного моделирования нуждаются в верификации. В последнее время верификация 3D численных расчетов проводится по экспериментальным данным, полученным в модельных установках при помощи панорамных оптических методов, основанных на цифровой трассерной визуализации (метод PIV). Метод PIV позволяет измерять 2D и 3D мгновенные распределения скорости с высоким пространственным и временным разрешением, что обеспечивает верификацию данных численных расчетов как по времени, так и по пространству.

В данной работе исследуется структура поперечного течения, формирующаяся в сборке стержней (имитаторов твэлов), представляющей собой пучок из 7 стержней с дистанционирующими проволоочными навивками. Рабочий участок представлял собой оптически прозрачный цилиндр длиной 770 мм и внешним диаметром 50 мм, внутрь которого установлены семь стержней. Между собой стержни образуют гексагональную плотную упаковку с относительным шагом $P/D = 1,1$. Стержни представляют собой прозрачные трубки диаметром $D = 13$ мм, на поверхности которых установлена проволоочная навивка. Исследования структуры поперечного течения проводились вблизи центрального стержня в нескольких поперечных сечениях пучка. Измерения мгновенных двухкомпонентных полей скорости проводились при помощи метода PIV.

Результаты исследования позволили получить и проанализировать мгновенную структуру поперечных течений в пучке из 7 стержней, рассчитать поля средней скорости и пульсаций скорости. Показано, что наличие проволоочной навивки приводит к формированию локальных вторичных и отрывных течений, а также к генерации сдвиговых вихревых структур. Получена база экспериментальных данных по распределениям двух компонент скорости в поперечных сечениях пучка из 7 стержней, позволяющая верифицировать численные расчеты структуры турбулентных поперечных течений, реализующихся в ТВС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-19-00587)

Экспериментальные исследования влияния изменения геометрии основных элементов проточной части на напорно-расходные характеристики осевого насоса для перекачки свинцового теплоносителя

Волков Н.С., Бокова Т.А., Боков П.А., Маров А.Р., Кокшайский А.Д.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(ФГБОУВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), Нижний Новгород,
m16-ts@yandex.ru

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, рабочее колесо, осевой насос, ТЖМТ, проточная часть насоса, решетка профилей, подводящее устройство, отводящее устройство, втулочное отношение, напор насоса, подача насоса.

В настоящее время актуальной проблемой атомной энергетики является обеспечение циркуляции тяжелого жидкометаллического теплоносителя в контурах реакторов на быстрых нейтронах. В связи с отсутствием поверенных расчетных методик проектирования проточных частей насосов для перекачки ТЖМТ производится экспериментальный поиск оптимальных геометрических параметров, обеспечивающих максимальную энергетическую эффективность и ресурсные параметры.

Для этих целей в лаборатории «Реакторная гидродинамика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева проводится комплекс экспериментальных исследований, посвященных отработке и оптимизации конструкции осевого колеса в составе высокотемпературного циркуляционного стенда со свинцовым теплоносителем ФТ-4, который создан для экспериментального обоснования проточных частей осевого насоса в натурных условиях применительно РУ типа БРЕСТ.

Комплексные экспериментальные исследования проводились на спроектированных специалистами НГТУ моделях осевых рабочих колес, подводящих и отводящих устройств при температуре 400–500 °С, были получены и исследованы следующие зависимости расхода и напора:

- 1) от параметров выправляющего аппарата на выходе из рабочего колеса;
- 2) от закрутки потока на входе в рабочее колесо насоса относительно направления вращения рабочего колеса насоса;
- 3) от изменения угла входного участка лопатки относительно угла установки решетки профилей рабочего колеса;
- 4) от изменения угла выходного участка лопатки относительно угла установки решетки профилей рабочего колеса;
- 5) от втулочного отношения рабочего колеса
- 6) рабочее колесо с оптимальными параметрами, полученными экспериментально.

Подробно результаты проведенных исследований представлены в докладе. Основным результатом работы стало повышение увеличения подачи насоса на 10–15 %, увеличение напора насоса на 20–25 % и общее увеличение КПД установки на 10 % относительно ранее созданных и испытанных в НГТУ рабочих колес при скорости вращения вала 1000 об/мин, что позволяет рекомендовать учитывать результаты проведенных исследований при проектировании проточных частей осевых насосов для перекачки свинцового теплоносителя.

Анализ теплогидравлических характеристик модулей ПГН-272 при замене материала теплообменных труб

Алюнин А.Г., Халутин А.А., Лякишев С.Л.

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

Ключевые слова: АЭС, прямоточный парогенератор, жидкий натрий, испаритель, пароперегреватель, конструкционные материалы, теплообменные трубы, теплогидравлический расчет, потери давления, замещение модулей.

Как показал опыт эксплуатации парогенератора (ПГ) для реакторной установки (РУ) БН-600, сталь марки 10Х2М подвержена язвенной коррозии со стороны испаряемой воды. Образование коррозионных язв приводит к местному утонению стенки, соответственно, к снижению прочности теплообменных труб. Кроме того, при температурах свыше 500 °С, характерных для ПГ натриевого реактора большой мощности, длительная прочность стали марки 10Х2М резко снижается.

Для удовлетворения требованиям по обеспечению условий длительной прочности температура острого пара была снижена. Ресурс модулей парогенератора ограничен и в процессе эксплуатации потребуются их замена.

В статье обоснована возможность применения стали марки 07Х12НМФБ при производстве замещающих модулей ПГН-272, что позволит увеличить их срок службы. Для обоснования сохранения габаритных размеров модулей произведен расчет площади теплосымающей поверхности. При расчете теплообменной поверхности испарителя были выделены следующие участки: 1) теплоотдача при турбулентном движении воды; 2) теплоотдача при развитом поверхностном кипении воды; 3) теплоотдача при пузырьковом кипении; 4) теплоотдача в условиях ухудшенного режима кипения; 5) теплоотдача при турбулентном движении перегретого пара. Для расчета площади теплообменной поверхности модуля пароперегревателя в связи с существенным изменением свойств перегретого пара использован метод поинтервальной линеаризации. Также выполнен анализ изменения гидравлических потерь по трактам теплоносителя и рабочего тела при изменении материала теплообменных труб.

Секция 3.

Гидродинамика и теплообмен в водоохлаждаемых реакторах

Исследование процессов вихреобразования в первом контуре реакторов типа ВВЭР

Митрофанова О.В., Поздеева И.Г.

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

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор, импактное закрученное течение, коллекторная система реактора, вибрации, акустические колебания, теплогидравлический расчет.

Одним из ключевых направлений развития ядерной энергетики в России являются водо-водяные реакторы на тепловых нейтронах. Изучение механизмов вихреобразования в элементах конструкций ядерных энергетических установок типа ВВЭР позволит расширить информацию о процессах тепломассообмена. Образование вихревых структур в теплогидравлическом тракте может сопровождаться колебаниями расхода, давления и температуры. Кроме того, процессы вихреобразования, как правило, сопровождаются акустическими колебаниями, которые, при совпадении их частоты собственными частотами оборудования, могут приводить к превышению уровня вибраций и разрушению.

В качестве объекта исследований было выбрано импактное закрученное течение, которое реализуется, например, при петлевом подводе холодного теплоносителя в активную зону корпусного ядерного реактора с водой под давлением. Геометрия этой области соответствует условиям образования импактного течения, а радиальная завихренность в потоке теплоносителя обусловлена работой ГЦН – главного циркуляционного насоса центробежного типа.

Экспериментальное моделирование гидродинамики импактного закрученного течения проводилось на газодинамическом стенде. В качестве рабочего участка использовалась вихревая камера с тангенциальным подводом сжатого воздуха. Закрученный воздушный поток выходил из вихревой камеры через небольшое отверстие в верхней крышке камеры и ударял в преграду, выполненную в форме плоского диска. Излучаемый в процессе вихрегенерации звук фиксировался с помощью микрофона. По характеру регистрируемых в процессе экспериментов акустических колебаний было выделено два режима истечения импактной закрученной струи: звуковой дорезонансный и резонансный. Было установлено, что основным источником возбуждения пульсаций давления в потоке являлась система крупномасштабных вихреобразований, генерируемых на выходе из вихревой камеры.

Тип колебаний, соответствующий звуковому дорезонансному режиму, относится к вынужденным колебаниям при наличии затухания. В рассматриваемом случае в качестве вынуждающей силы выступает сила, связанная с колебаниями звукового давления.

Было установлено, что устойчивая спирально-вихревая структура потока формируется при возбуждении собственных колебаний крышки вихревой камеры. Описываемый процесс соответствует условию акустического резонанса, сопровождаемого резким усилением акустических колебаний на частоте, совпадающей с собственной частотой колебательной системы.

В результате обработки амплитудно-частотных характеристик звуковых колебаний была рассчитана мощность акустической энергии для набора преград диаметром 30–90 мм (с шагом 10 мм) и определены коэффициенты затухания δ . Резонансный режим истечения импактной закрученной струи наблюдался на преградах диаметром 50, 60 и 70 мм при частоте $f_0 = 2800$ Гц, что соответствовало частоте собственных колебаний плексигласовой крышки вихревой камеры. На преградах диаметром 30 и 40 мм, а также 80 и 90 мм резонансный режим не наблюдался. Построение резонансных кривых для набора преград с рассчитанными в результате обработки экспериментальных данных коэффициентами затухания показало, что резонансный режим уверенно фиксировался при увеличении амплитуды колебаний минимум в 2 раза по сравнению с дорезонансным режимом, то есть при коэффициенте затухания $\delta < 0,25 f_{\text{рез}}$.

Полученные на газодинамическом стенде экспериментальные результаты использовались для анализа вихреобразования в первом контуре реактора типа ВВЭР. Для расчетов использовались размеры и характерные режимы эксплуатации реакторной установки ВВЭР-1000, а также некоторые характерные частоты собственных колебаний элементов ее оборудования. Было исследовано два процесса вихреобразования – при петлевом подводе холодного теплоносителя от ГЦН и вихреобразование в напорном коллекторе.

В первом случае поток поступает из трубопровода диаметром 850 мм, натекает на обечайку активной зоны и поворачивает на 90° , стекая вертикально в щелевой зазор между корпусом реактора и обечайкой. В области поворота при этом образуется торoidalный вихрь, который закручивает поток холодного теплоносителя в спиральный рукав с характерным винтовым распределением скорости. Кроме этого, при несинхронной работе ГЦН возможно возникновение радиальной завихренности по периметру опускного участка. Второе рассматриваемое вихреобразование возникает в застойной зоне внизу опускного участка под активной зоной, где поток теплоносителя поворачивает на 180° . Возникновение вихреобразования в этой области способствует усилению радиальной закрутки и повышению устойчивости крупномасштабного вихря в напорном коллекторе перед входом в активную зону. Полученные ранее авторами экспериментальные данные по сопоставлению частот акустических колебаний и размеров вихревых структур при истечении импактного закрученного потока позволили оценить масштаб вихреобразований в первом контуре реакторной установки ВВЭР-1000 и рассчитать частоты вращения потока теплоносителя в указанных областях.

В результате расчета было получено значение частоты акустических колебаний, генерируемых из-за вихреобразования в нижней части кольцевого канала. Эта частота 17,8 Гц оказалась близка к оборотной частоте ГЦН 16,6 Гц. При графическом сложении колебаний изменения расхода холодного теплоносителя во времени наблюдалась характерная картина биений, частота которых совпадала с частотой колебаний расхода из-за резонанса компенсатора давления 0,6 Гц. Подобное хорошее совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на действующей установке ВВЭР-1000, указывает на правильность принятых при расчете допущений и справедливость разработанной модели течения теплоносителя в первом контуре реактора. Сделанные авторами расчетные оценки указывают также на колебания температуры теплоносителя внутри активной зоны и локальное нарушение теплоотвода с поверхности тепловыделяющих элементов.

Исследование влияния вихреобразований на уровень вибраций оборудования ядерных энергетических установок и акустический мониторинг состояния потоков теплоносителей позволят повысить качество виброакустического контроля работы установок и, как следствие, безопасность их работы. Особенно актуален такой мониторинг для переходных режимов эксплуатации ЯЭУ, в которых возможно возникновение резонанса между собственными частотами вибраций оборудования и частотами, генерируемыми вихревыми структурами теплоносителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00223).

Моделирование теплогидравлических процессов в каналах паропроизводящих установок

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

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

Ключевые слова: ядерные энергетические установки, парогенераторы, змеевиковые трубные системы, экономайзерный участок, теплогидравлическая эффективность, закрученное течение, акустические колебания, кризис закрученного потока, вибрационные процессы.

В результате проведенного анализа эксплуатации транспортных ЯЭУ различных поколений, включающих как прямоточные парогенерирующие системы блочного типа, так и интегральные, возникла необходимость моделирования сложных вихревых течений с целью оптимизации характеристик надежности и безопасности данных установок. Как показали практические результаты, несмотря на многолетний опыт эксплуатации ЯЭУ, проблемы, возникающие при работе парогенерирующего оборудования, требуют проведения дополнительных научных исследований на основе совершенствования методов моделирования теплогидравлических процессов в каналах сложной геометрии.

В транспортных ЯЭУ преобразование ядерной энергии в механическую осуществляется за счет использования паросилового цикла в парогенераторах змеевикового и каскадного типов. В представленной работе рассмотрены прямоточные парогенераторы ледоколов 3-го поколения. В качестве теплообменных трубопроводов в них используются каналы змеевикового типа круглого поперечного сечения с большим количеством изгибов различного направления и крутизны на подводящих участках.

Ледокол «Арктика» 4-го поколения вошел в состав «Росатомфлота» 21 октября 2020 года. Это первый проект ледокола, на борту которого функционируют две ЯЭУ интегрального типа РИТМ-200. В качестве теплообменного оборудования в них установлены прямоточные парогенераторы каскадного типа. Усложнение конструкции парогенерирующих каналов в парогенераторах каскадного типа не привело к устранению проблем, выявленных при эксплуатации змеевиковых трубных систем, создав при этом дополнительные сложности в их изготовлении и ремонтопригодности. К тому же, так как параметры перегретого пара на выходе из парогенератора у них практически идентичны, реализовать возможность повышения термического КПД ядерной энергетической установки не удастся.

Характерным для всех рассматриваемых парогенерирующих систем является эффект снижения теплогидравлической эффективности судовой парогенерирующей установки при повышении мощности ядерного реактора. Если в интервале мощностей от 10 до 50 % от номинальной температура перегретого пара растет линейно, следуя за повышением температуры теплоносителя первого контура, то при повышении мощности выше 50 %, зависимость приобретает нелинейный характер. При этом разница между температурой 1 и 2 контуров резко возрастает при приближении к 100 % мощности. В то же время, увеличение мощности ЯР связано с ростом давления питательной воды на входе во второй контур при неизменном давлении перегретого пара на выходе, что говорит о существенном росте гидравлических потерь.

Целью исследований, проводимых в настоящей работе, является моделирование теплогидравлических процессов в трубопроводах многорядной конструкции парогенератора ПГ-28 судовой ЯЭУ. Результаты расчетов помогли выявить ряд факторов, учет которых необходим при проектировании теплообменного оборудования нового поколения.

Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена на рассмотренных участках осуществлялось с помощью универсального программного обеспечения ПК ANSYS, включающего расчетный пакет CFX. На основе предварительно проведенного анализа в качестве рабочей расчетной модели была использована модель турбулентности SST, которая хорошо зарекомендовала себя в описании вихревого течения жидкости с высокими числами Re. Она представляет собой комбинацию k - ϵ и k - ω моделей, обеспечивающую сочетание их лучших качеств. Так k - ϵ модель показывает хорошие результаты при расчете свободных и струйных сдвиговых течений, а k - ω модель обеспечивает существенно более точное описание пристеночных пограничных слоев.

В процессе исследований были рассмотрены особенности закрученного течения теплоносителя и их влияние на гидродинамику, теплообмен и генерацию акустических колебаний в условиях изменения направления движения жидкости, а также переменного диаметра канала. Расчеты были выполнены для различных уровней мощности ЯЭУ 3-го поколения на экономайзерном участке парогенерирующей трубопроводной системы.

Как показали результаты, последовательная система гибов в вертикальной плоскости на подводящем к змеевику участке трубопровода генерирует в его поперечном сечении два вихря с противоположным направлением вращения, переходящие затем после диффузорного расширения и отклонения канала в горизонтальном направлении в крупномасштабную закрутку потока. Такая структура движения жидкости, при условии достаточной скорости и закрутки потока, а также наличие диффузора может приводить к явлению кризиса закрученного потока. Условием его возникновения является режим, когда расходная скорость потока достигает скорости распространения длинных центробежных волн, при этом происходит такое перераспределение давления в канале, при котором продольный градиент давления сравнивается с радиальным. Образованная при таких условиях область реверсивного спирально-винтового течения занимает большую часть проходного сечения канала, создавая существенное нерасчетное гидравлическое сопротивление.

Данный эффект не только неблагоприятно воздействует на течение теплоносителя, вызывая застойные зоны в канале, что приводит к повышению мощности на прокачку, но также усиливает низкочастотную составляющую акустического спектра, которая является негативным фактором с точки зрения резонансных эффектов и вибрационных процессов. Поле распределения частот теплоносителя в области после кризиса демонстрирует, что диапазон низких частот близок к собственным частотам оборудования ЯЭУ, что может приводить к резонансным явлениям и тем самым отрицательно влиять на прочность и шумность установки.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, грант № 19-08-00223 и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор №. 02.а03.21.0005).

Экспериментальные и расчетные исследования гидродинамической картины течения теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР

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

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

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

Одним из приоритетных направлений развития атомной энергетики Российской Федерации является создание стационарных реакторов ВВЭР с высокими эксплуатационными качествами и значительным экспортным потенциалом. В АО «ОКБМ Африкантов» и других отечественных проектных организациях ведутся активные работы по увеличению максимально допустимой мощности реактора для увеличения выработки электроэнергии. Это осуществимо только при гарантированном обеспечении надежной и безаварийной работы активной зоны. Обеспечение проектного обоснования безаварийной работы реактора невозможно без проведения комплексных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на повышение эксплуатационного ресурса, надежности активных зон и тепловыделяющих сборок (ТВС).

Решение указанных задач невозможно без изучения гидродинамических процессов в теплоносителе первого контура реактора. Построение полноценной гидродинамической картины течения потока в активных зонах реакторов ВВЭР невозможно без детального изучения такого важного процесса как поперечное перетекание и перемешивание теплоносителя между соседними ТВС. Таким образом, экспериментальное и расчетное исследование гидродинамических особенностей течения теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР является актуальной задачей, решение которой поможет в обосновании теплотехнической надежности вновь проектируемых активных зон.

Для изучения закономерностей течения водо-водяного теплоносителя используется исследовательский аэродинамический стенд. На данном стенде течение водяного теплоносителя в пучке твэлов моделируется воздушным потоком согласно теории гидродинамического подобия. Течение потока теплоносителя изучалось в специально спроектированных и изготовленных в виде каналов шестигранной формы моделях, в продольном и поперечном сечениях геометрически подобных фрагментам штатного твэльного пучка смешанной и однородной активной зоны. Фрагмент пучка твэлов смешанной активной зоны включал три граничащих друг с другом сегмента тепловыделяющих сборок типа ТВСА-Т различной конструкции (один сегмент ТВСА-Т и два сегмента ТВСА-Т mod.2). Принципиальным отличием имитируемых ТВСА-Т является разный шаг установки решеток со значительно отличающимся коэффициентом гидравлического сопротивления. Моделируемый фрагмент активной зоны увеличен относительно штатного элемента конструкции реактора на коэффициент геометрического подобия 4,4.

Давление воздушного потока в канале модели измерялось пневмометрическим датчиком, который предварительно тарировали в воздушном потоке с заранее известными аксиальной скоростью, полным и статическим давлением в точке его позиционирования.

Измеренное давление согласно полученным тарировочным зависимостям пересчитывали в скорость. На основе локальной скорости воссоздавалась картина течения потока. Значение скорости определялось с погрешностью не более 7 %.

Гидродинамика течения теплоносителя в пучке твэлов изучалась в области поперечного сечения моделей, включающей пять рядов твэлов каждой из соседних тепловыделяющих сборок, а также зазор между ними. В продольном сечении твэльного пучка для исследования гидродинамических характеристик потока были выбраны три фрагмента, характеризующиеся индивидуальной схемой расположения решеток. Все измерения проводились при среднерасходной скорости воздушного потока равной 27,5 м/с и числе Рейнольдса 80000. Анализ течения теплоносителя в пучке твэлов проводился на основе графиков и картограмм распределения скорости, построенных из безразмерных величин (локальное значение нормировалось на среднерасходную скорость потока).

Гидродинамика теплоносителя исследовалась в зоне автомодельного течения воздушного потока, которая характеризуется идентичностью безразмерных профилей скорости в каналах как для воздушной, так и для водяной среды, что позволяет использовать результаты экспериментов при изучении течения теплоносителя в штатной активной зоне. Также экспериментально был определен коэффициент гидравлического сопротивления всех типов макетов решеток. Измерения показали, что полученные величины соответствуют коэффициентам гидравлического сопротивления штатных решеток. Следовательно, выполняется условие соблюдения равенства коэффициентов штатных и модельных решеток, что также подтверждает представительность исследований.

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил выявить основные закономерности формирования течения потока в смешанной активной зоне и определить:

- интенсивность поперечных течений теплоносителя между смежными ТВСА-Т различной конструкции;
- области образования поперечных течений по длине пучка твэлов;
- глубину распространения поперечных течений в сечении каждой из соседних тепловыделяющих сборок;
- зависимость локализации и интенсивности поперечных потоков от схемы взаимного расположения решеток;
- выявлены эффекты нарастания и ослабления поперечных течений по длине пучка твэлов смешанной активной зоны;
- определено влияние поперечных течений на перераспределение аксиального потока через смежные ТВСА-Т различной конструкции.

Полученные экспериментальные и расчетные результаты являются значимым вкладом в разработку современных методик обоснования теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР, отличающихся более высокой реалистичностью и используются сотрудниками АО «ОКБМ Африкантов» в инженерной практике.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Исследование процессов перемешивания петлевых потоков теплоносителя в опускной камере ЯЭУ

**Дмитриев С.М., Рязанов А.В., Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н.,
Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Демкина Т.Д., Доронкова Д.С.,
Снегирева А.С., Шадрин В.С., Шуваева М.Ю.**

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

Ключевые слова: теплоноситель, перемешивание потоков, вычислительная гидродинамика, энергетическая установка.

Создание новых водо-водяных ядерных энергетических установок требует проведения комплекса научно-исследовательских работ по обоснованию безопасности как новых конструкторских решений, так и режимов работы ЯЭУ. Обоснование теплотехнической надежности во многом базируется на теплогидравлическом расчете, что требует информативности и достоверности параметров теплоносителя с учетом их локального распределения внутри реактора.

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

Проведение изотермического и неизотермического аэродинамического эксперимента с использованием модели напорного тракта водо-водяного ядерного реактора дает возможность исследовать особенности течения потока и смоделировать температуру теплоносителя на входе в активную зону в процессе перемешивания петлевых потоков. Такие исследования позволяют уточнить распределение температуры на входе в активную зону и в петлях теплообмена, что особенно важно в режимах работы реакторной установки с несимметричной нагрузкой. Также результаты таких исследований необходимы для расчета распределения концентрации борной кислоты в активной зоне при инъекции ее в теплоноситель первого контура.

Экспериментальный стенд ФТ-50 НГТУ им. Р.Е. Алексеева представляет собой аэродинамический разомкнутый контур. Стенд предназначен для проведения исследований локальных значений скорости и давления потока, а также перемешивания теплоносителя в моделях основного оборудования ядерных реакторов. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная ёмкость, подводной гидравлический коллектор, экспериментальная модель, измерительный комплекс.

Процесс перемешивания петлевых потоков теплоносителя внутри модели опускной камеры ядерного реактора последовательно изучался в ходе двух серий экспериментов на одной и той же масштабной модели ядерного реактора, обладающей конструктивными элементами, характерными для петлевых ядерных установок (радиальный подвод,

опускной кольцевой тракт, нижняя напорная камера, осевой выход). Экспериментальные исследования были проведены в диапазоне чисел Рейнольдса (Re) от 20 000 до 50 000.

Первая серия экспериментов – изотермическая. При помощи пневмометрического зонда в экспериментах исследовано поле осевых скоростей на входе в имитатор активной зоны модели реактора. Для изучения температурного поля в эксперименте использовался метод диффузии примесей. Моделирование потока с отклоняющимися характеристиками осуществляется введением в одну из петель контрастного трассера. Контроль за пассивной примесью осуществлялся при помощи инфракрасного газоанализатора. Концентрация на входе в имитатор активной зоны даёт возможность оценивать степень перемешивания потоков. В качестве пассивной примеси применялся пропан (C_3H_8).

Вторая серия экспериментов – неизотермическая. Температурное поле исследовалось методом горячего следа. По одной из подводных петель происходил перегрев потока рабочей среды, дальнейшее распределение горячего пятна в камере реактора отслеживалось при помощи комплекта термопар и термосопротивлений с индивидуальной градуировкой.

Проведён комплекс исследований процессов турбулентного перемешивания потоков теплоносителя в напорной камере реактора в двух областях: опускном кольцевом канале и нижней напорной камере с применением принципиально различных подходов к моделированию изучаемых процессов с учётом масштабируемости процесса по критерию Рейнольдса.

В ходе исследований получены данные о распределении концентрации пассивной примеси и горячего пятна рабочей среды в характерных областях модели. Результаты исследований показывают очень хорошую качественную и количественную сходимость. Во всех моделируемых режимах контрастное пятно было обнаружено в области противоположной его вводу, что является следствием наличия закрутки потока теплоносителя относительно патрубка подачи. При этом наибольший вклад в спиральное движение теплоносителя вносит опускная камера.

В результате комплексных расчетно-экспериментальных исследований было установлено:

- распределение относительной температуры по входам в каналы-имитаторы активной зоны неравномерно;
- наибольшая относительная температура наблюдается со стороны патрубка, противоположного патрубку инъекции контрастного пятна;
- в нижней части модели напорной камеры наблюдается явление закрутки потока более чем на 180° .

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Экспериментальные исследования гидродинамики теплоносителя в топливных кассетах атомных станций малой мощности и перспективных плавучих энергоблоков

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

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

Ключевые слова: кассетная активная зона, топливная кассета, дистанционирующая решетка, твэльный пучок, поток теплоносителя гидродинамическая картина, поле скорости, поперечная скорость, осевой расход.

Одной из важных задач для развития Российской Федерации является освоение минерально-сырьевых ресурсов Арктики и удаленных районов Сибири. Важным условием успешного освоения данных территорий является бесперебойной энергоснабжение объектов, создаваемых в этих районах. Для решения этой задачи Госкорпорацией «Росатом» реализуются проекты по созданию атомных станций малой мощности (АСММ) наземного и плавучего исполнения.

В настоящее время АО «ОКБМ Африкантов» ведутся конструкторские работы по созданию АСММ с новейшей реакторной установки (РУ) РИТМ-200С. Прототипом для новой реакторной установки является установка РИТМ-200, которая успешно эксплуатируется на атомных ледоколах нового поколения. Проектом РУ предусматривается новая кассетная активная зона с топливом повышенной ураноёмкости, измененной геометрией твэльного пучка, измененной формой центрального вытеснителя и новой конструкцией дистанционирующих решеток. Эти конструктивные особенности обусловили изменение полей аксиальных и поперечных скоростей потока теплоносителя, а также его осевого расхода, что в свою очередь может повлиять на теплофизические и нейтронно-физические характеристики активной зоны и сказаться на её теплотехнической надежности. Следовательно, открытым остаётся ряд вопросов, влияющих на теплотехническую надёжность новой активной зоны.

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева были проведены исследования, направленные на изучение гидродинамических характеристик потока теплоносителя в активной зоне реакторной установки РИТМ-200С. Исследования проводились на аэродинамическом моделировании течения теплоносителя потоком воздуха на основе теории гидродинамического подобия. Экспериментальная модель представляет собой масштабную модель кассеты ТВС и включает в себя имитаторы твэлов, имитаторы стержней выгорающего поглотителя, центральный вытеснитель и три дистанционирующих решетки. Масштаб модели выбирался из условий обеспечения требуемых значений чисел Рейнольдса (Re) и уменьшения влияния средств измерения на распределение потока.

В результате проведенных исследований были выявлены следующие особенности течения теплоносителя за дистанционирующими решетками ТВС реакторной установки РИТМ-200С:

- возникающие за дистанционирующей решеткой поперечные течения теплоносителя расположены в основном внутри внешней обечайки решетки на расстоянии менее одного гидравлического диаметра от пластин;

- в поперечном сечении топливной кассеты величины поперечных скоростей отличаются ввиду особенностей конструкции дистанционирующей решетки, а именно различной толщины пластин и различного затеснения проходного сечения элементарных ячеек;

- в зависимости от конфигурации пластин дистанционирующей решетки относительная аксиальная скорость теплоносителя в стандартных ячейках варьируется в диапазоне от 0,9 до 1,2.

На основании полученных результатов была проведена валидация программы инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС. Для проведения расчетных исследований была создана расчетная модель, повторяющая экспериментальную модель с небольшими упрощениями некоторых деталей. В расчетной модели отсутствовали прорезы под соединения пластин, а также устранены выступы от загибов пластин во внешней и внутренней обечайках. Расчеты проводились для следующих дискретизаций сеточной модели: 12,3 млн ячеек; 20,7 млн ячеек; 33,3 млн ячеек; 41,4 млн ячеек.

Сравнение результатов, полученных в ходе экспериментальных и расчетных исследований, показало, что в обоих случаях гидродинамические картины течения теплоносителя качественно совпадают. Отклонение максимальных величин аксиальной скорости потока по ячейкам топливной кассеты, полученных расчетным и экспериментальным путем, не превышает 15 %. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения пакета программ численного моделирования ЛОГОС к моделированию гидродинамики теплоносителя в топливных кассетах активной зоны реактора типа РИТМ.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик потока однофазного теплоносителя при неизотермическом смешении в тройниковом узле типа «встречный впрыск»

Рязанов Р.Р., Мамаев А.В., Соборнов А.Е., Кусков А.М., Кудашкин И.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(ФГБОУВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), Нижний Новгород,
ryazapov.renat@gmail.com

Ключевые слова: пульсации температуры, термопульсации, неизотермическое смешивание, ресурс, долговечность, трассер, теплоноситель, энергетическая установка, тройниковый узел.

Неизотермическое перемешивание потоков рабочих сред, происходящее в оборудовании водоохлаждаемых реакторных установок (РУ) сопровождается термопульсациями. Наиболее значительные пульсации возникают при подпитке парогенераторов, в теплообменниках смешивающего типа и пр. Высокая интенсивность колебаний температуры, а, следовательно, и температурных напряжений, может приводить к преждевременному истощению ресурса элементов оборудования РУ в результате усталостного разрушения. Во избежание негативных эффектов, связанных с наличием термопульсаций необходимо учитывать их характеристики на стадии проектирования энергоустановок. Активное развитие суперкомпьютеров в последние десятилетия позволяет получать статистические и спектрально-корреляционные характеристики пульсаций с применением численных методов. Однако, результаты расчетов трехмерных кодов вычислительной гидродинамики (английская аббревиатура CFD) требуют экспериментального подтверждения. Таким образом, проведение экспериментального исследования теплогидравлических характеристик однофазного теплоносителя при неизотермическом смешении в тройниковом узле типа «встречный впрыск» актуально и решает задачи получения исчерпывающего представления о механизме возникновения и характеристиках термопульсаций.

Исследование проводилось на учебно-исследовательском стенде, представляющем собой гидравлически замкнутый контур. Установка включает в себя следующие единицы оборудования: бак нагревательный ТЭНом, циркуляционный насос, теплообменник-охладитель, экспериментальная модель, запорно-регулирующие клапаны, измерительные преобразователи, дозатор трассера. В качестве теплоносителя в стенде применена дистиллированная вода. Экспериментальная модель представляет собой тройниковый узел типа «встречный впрыск», состоящий из основной и расположенной под углом периферийной труб. Материал модели – прозрачное органическое стекло. В ходе эксперимента в модели смешивались «холодный» (температура 20 °С) и «горячий» (температура 80 °С) потоки теплоносителя. Массовая скорость «горячего» потока поддерживалась постоянной на уровне 739 кг/(с·м²), массовая скорость «холодного» варьировалась в диапазоне от 8,8 до 18,7 кг/(с·м²) с шагом 2,2 кг/(с·м²). Визуализация процесса смешения осуществлялась путем инъекции в модель контрастного трассера, обладающего схожей со смешиваемыми средами плотностью. Введение трассера проводилось последовательно в четырёх различных точках с последующей видеофиксацией процесса смешения с частотой 30 Гц. Для измерения температуры в исследуемой области устанавливались пять хромель-алюмелевых термопар с изолированным спаем с диаметром чувствительной части 0,5 мм.

В ходе проведения исследования получены фрагменты видеозаписи процесса смешения, а также синхронные с ними экспериментальные реализации пульсаций температуры. Отслежено образование вихревых потоков в зоне смешения, определены масштабы вихрей, осредненные по времени профили температуры потока, профили интенсивности пульсаций температуры. Совместный анализ структуры и температурного состояния потока позволил объяснить характер пульсаций температуры во фронтальной относительно периферийной трубы области.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Исследование поведения оболочки толерантного твэла ВВЭР из сплавов Э110 с защитным покрытием и 42ХНМ при аварии LOCA

**Ананич Р.О., Базюк С.С., Беспечалов Б.Н., Киселев Д.С.,
Полунин К.К., Стойков К.В., Ягнятинский Д.А.**

*Акционерное общество «НИИ НПО «ЛУЧ», Подольск,
bazukss@sialuch.ru*

Ключевые слова: АЭС, безопасность, защитная оболочка твэла, толерантный твэл, хромовое покрытие, термомеханических нагрузках, термоциклические нагрузки, термогравиметрическое исследование, пластичность, охрупчивание.

Повышение безопасности АЭС – важнейшее условие устойчивого развития атомной энергетики. В настоящее время ведущими мировыми поставщиками ядерной энергии и отраслевыми лабораториями разрабатываются кратко- и долгосрочные концепции толерантного топлива для уменьшения эффекта экзотермической паро-циркониевой реакции при авариях с потерей теплоносителя (LOCA) [1].

Эффективным подходом с точки зрения минимизации финансово-временных затрат на НИОКР по разработке толерантного твэла РУ ВВЭР-1000 представляется нанесение защитного покрытия на внешнюю поверхность циркониевой оболочки. Наиболее перспективным из материалов рассматривается хром ввиду высокой теплопроводности ($\lambda = 50\text{--}75 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) и близости термического коэффициента линейного расширения с цирконием ($11,3 \cdot 10^{-6}$ и $13,4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ соответственно) [2], антикоррозионных свойств [3] при относительно низкой нейтрон-поглощающей способности ($\sigma_{\text{полг}} = 2,9 \text{ барн}$) [4]. Однако вопрос о толщине покрытия, живучести при многократных термомеханических нагрузках, качестве адгезии к поверхности оболочки не решен.

Альтернативным вариантом материала оболочки твэла РУ ВВЭР-1000 рассматривается сплав 42ХНМ (42 % Cr, ~57 % Ni), хорошо зарекомендовавший себя при эксплуатации в составе транспортных РУ и поглощающих стержней ПС СУЗ ВВЭР [5]. Известно, что при температуре более 550 °С сплав 42ХНМ охрупчивается и теряет пластичность [6]. Кроме того, при превышении температуры 1345 °С двухфазная система Ni-Cr претерпевает плавление. Возможность применения сплава 42ХНМ в качестве материала оболочки толерантного твэла требует подробного расчетно-экспериментального обоснования.

В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование на стенде ГАЗПАР (АО «НИИ НПО «ЛУЧ») поведения образцов штатных (Э110) и с Cr покрытием (Э110-Cr) оболочек твэлов, изготовленных с применением электролитического и губчатого Zr, в среде водяного пара в диапазоне температур 900–1450 °С и временах выдержки 150–14400 с. Проведено исследование эффективности применения хромового покрытия толщиной до 10 мкм против ВТ окисления на основе данных по удельному привесу образцов оболочек. Оценена стойкость Cr покрытия при термоциклических нагружениях образцов оболочек кратностью до 5 раз в диапазоне температур 900–1200 °С и интегральных временах выдержек до 1000 секунд. По идентичной методике проведены испытания образцов оболочек из сплава 42ХНМ в температурном диапазоне 930–1350 °С.

Термогравиметрическое исследование ВТ окисления оболочек твэлов из сплавов Э110-Cr и 42ХНМ проведено на установке ГАЗПАР (рис. 1). Процесс окисления иници-

ировался размещением ВР 5/20 термопары с тремя образцами в кварцевой трубке с потоком перегретого пара и нагреваемой графитовым нагревателем в течение заданного времени. По достижении установленной выдержки образцы перемещались в холодную зону и расхолаживались аргоном способом заковки (сброс в воду).

В поддержку испытаний проводилось моделирование стационарных режимов окисления с использованием конечно-элементного (КЭ) программного обеспечения Ansys Fluent 16.0. Рассматривалась 2D осесимметричная задача с учетом осевой теплопроводности в твердых телах и паре и излучения от стенок керамического нагревателя (рис. 2). Характерные температурные данные для образцов Э110-Сг и 42ХНМ оболочек представлены на рисунках 3а и 3б соответственно.

Получены кривые кинетики окисления образцов оболочек и зависимости константы скорости паро-циркониевой реакции от температуры. Характеристики кинетики окисления сопоставлены с известными данными для штатных Э110 и Э110-Сг образцов оболочек.

Проведено материаловедческое исследование состояние образцов оболочек, в результате которого получены данные по толщинам слоев ZrO_2 , $\alpha_{Zr(O)}$ и $\epsilon\chi\text{-}\beta_{Zr}$ на внешней и внутренней поверхностях (рис. 4). Выполнены измерения пост-тестовой микротвердости и остаточной пластичности.



Рис. 1. Высокотемпературная установка ГАЗПАР

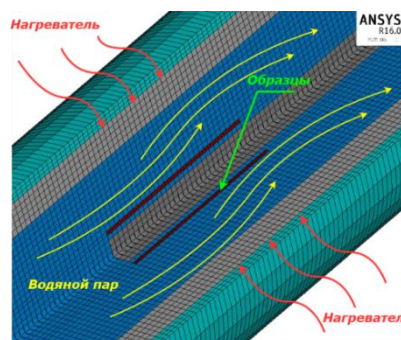
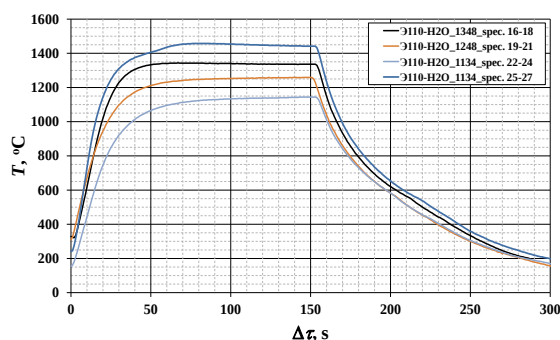
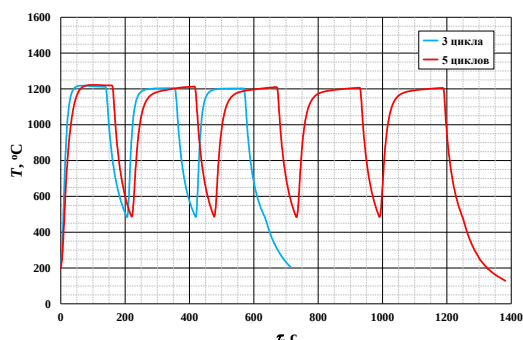


Рис. 2. КЭ модель рабочего участка стэнда ГАЗПАР



а)



б)

Рис. 3. Термограммы образцов оболочек при одиночном тепловом нагружении (а), Э110; при термоциклическом нагружении (б), Э110-Сг

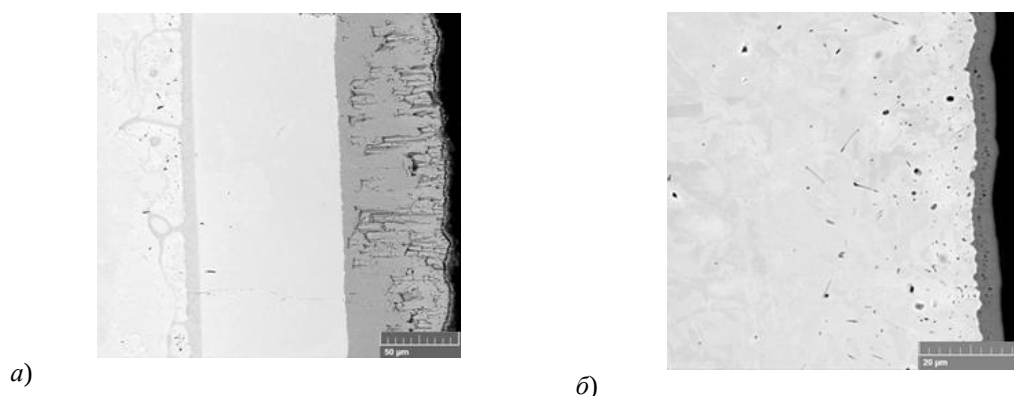


Рис. 4. Структура приповерхностной области оболочек, окисленных в водяном паре:
а – Э110-Сr, 1400 °С, 150 с; б – 42ХНМ, 1300 °С, 2400 с

Список литературы

1. Khatib-Rahbar M., Krall A., Yuan Z., Zavisca M. Review of Accident Tolerant Fuel Concepts with Implications to Severe Accident Progression and Radiological Releases. – NUREG/CR-7282, 2021
2. Лариков Л.Н., Юрченко Ю.Ф. Тепловые свойства металлов и сплавов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1985.
3. Войтович Р.Ф., Головки Э.И. Высокотемпературное окисление металлов и сплавов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1980.
4. Краткий физико-технический справочник / Под ред. К.П. Яковлева. Т. 1. – М.: Физматлит, 1960.
5. Кулаков Г.В., Ершов С.А., Коновалов Ю.В. и др. Основные свойства сплава 42ХНМ и перспективы его внедрения в качестве конструкционного материала элементов реакторов ВВЭР / XI Конференция по реакторному материаловедению, АО «ГНЦ НИИАР», 2019.
6. Сафонов Д.В. Структурно-фазовое состояние оболочечных материалов в условиях эксплуатации, сухого хранения, а также проектной аварии. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Москва, 2021.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований и ГК «Росатом», проект № 20-21-00076.

Методики оценочного расчета размера отложений в кольцевых каналах энергооборудования ЯЭУ по данным гидравлических испытаний

Писаревский М.И., Голяев Д.В., Федосеев В.Н.

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

Ключевые слова: шероховатость, естественная шероховатость, искусственная шероховатость, эквивалентная песочная шероховатость, отложения, коэффициент гидравлического сопротивления, кольцевой канал, прямоугольный канал, шероховатый слой.

Для ядерных энергетических установок характерны высокие скорости прокачки теплоносителя, питательной воды и пара, при которых на гидравлическое сопротивление каналов энергетического оборудования существенное влияние начинает оказывать шероховатость стенок этих каналов.

Шероховатые поверхности принято классифицировать по типу на искусственные и естественные. Естественная шероховатость обусловлена технологией производства или появляется в процессе эксплуатации из-за осаждения на стенках каналов твердых примесей потока, коррозии и эрозии материалов. Искусственная шероховатость наносится на поверхность канала специально. Примерами искусственной шероховатости являются резьбы, навивки, выступы, ямки и так далее.

В процессе эксплуатации ядерных реакторов на поверхностях тепловыделяющих элементов, конструктивных элементов ТВС, трубопроводов второго контура образуются отложения, увеличивающие естественную шероховатость стенок. В литературе отмечены исследования по измерению поверхностей трубопроводов обвязки подогревателя высокого давления, изготовленных из стали 12X18H10T, и трубопроводов стали 20, согласно которым высота образующейся естественной шероховатости может достигать 250 мкм. Другими исследователями так же обнаружено наличие отложений на тепловыделяющих и конструктивных элементах ТВС на энергоблоках № 3, 4 Нововоронежской АЭС. Отложения состояли из продуктов коррозии, дебрис-частиц и органических веществ, они явились причинами снижения расхода теплоносителя через кассеты в процессе эксплуатации АЭС.

В результате проведенного исследования разработана методика оценочного расчета размера отложений на поверхности конструктивных элементов теплообменного оборудования. В качестве определяемого размерного параметра используется значение эквивалентной песочной шероховатости $k_{\text{экв}}$, которое присутствует в большинстве инженерных формул для расчета коэффициента гидравлического сопротивления. В качестве исследуемого канала выбран концентрический кольцевой, выбор объясняется следующим. Во-первых, кольцевые каналы широко применяются в качестве теплообменных поверхностей энергооборудования, например, теплообменники типа «труба в трубе». Через стенку внутренней трубы передается тепло от горячего потока к холодному. Находящиеся под тепловой нагрузкой стенки трубы наиболее подвержены коррозии и образованию на них отложений. Во-вторых, концентрический кольцевой канал рассматривается как имитационная модель эквивалентной ячейки тепловыделяющего элемента.

В основу методики положена идея разделения кольцевого канала на два не взаимодействующих слоя линией нулевых касательных напряжений. Каждый слой имеет свою толщину, среднюю скорость потока теплоносителя и закон изменения коэффициента

гидравлического сопротивления. Для слоев записаны геометрический баланс, балансы расходов и градиентов давления, а также условие сшивки профилей скоростей. В результате решения задачи получено расчетное соотношение для определения размеров шероховатости в единицах эквивалентной песочной шероховатости.

В работе представлены результаты валидации методики. Проведены сравнения расчетов по методике и табличных значений размеров отложений в единицах эквивалентной песочной шероховатости. Максимальное отклонение составляет 19 %, которое сказывается на коэффициенте гидравлического сопротивления λ в 9 %. Построены зависимости увеличения давления в кольцевом канале от чисел Рейнольдса и размеров отложений. С помощью графиков по показаниям увеличения давления в сравнении с гладким каналом можно судить о размере естественной шероховатости.

Работа выполнена при финансовой поддержке приоритетных программ НИЯУ МИФИ.

Инженерная методика оценки повышения давления при конденсационном гидравлическом ударе

Чуркин А.Н.

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

Ключевые слова: конденсационный гидравлический удар, трубопровод, повышение давления, скорость пробки жидкости, инженерная методика расчета, ВВЭР.

В реакторной установке (РУ) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) при нормальной эксплуатации насыщенный пар в объеме первого контура находится только в компенсаторе давления (КД), а также может находиться в трубопроводах, соединенных с паровой частью КД (трубопроводы основного и аварийного впрыска, трубопроводы сброса пара). В аварийных режимах с потерей теплоносителя первого контура, возможно появление пара в верхней части реактора, в главном циркуляционном трубопроводе и в других трубопроводах, присоединенных к первому контуру.

Наличие пара в трубопроводах может служить причиной возникновения опасного явления – конденсационного гидравлического удара (КГУ), в случае попадания в трубопровод холодной воды.

Под гидравлическим ударом (ГУ) понимают резкое увеличение давления в трубопроводах при быстром изменении скорости текущей жидкости. Классический ГУ наблюдается при быстром закрытии трубопроводной арматуры, когда энергия движущейся жидкости за короткое время преобразуется в потенциальную энергию сжатой жидкости, что приводит к резкому повышению давления.

Явление КГУ связано с возникновением изолированного объема пара, окруженного холодной жидкостью. Быстрая конденсация пара с соответствующим снижением давления приводят к коллапсу парового объема, то есть к резкому ускорению объемов жидкости, окружающих паровой пузырь. При столкновении этих объемов друг с другом или со стенками трубопровода в зоне конденсации возникает ГУ.

В трубопроводах КГУ возникают, когда при расслоенном (стратифицированном) режиме течения недогретой до температуры насыщения жидкости и пара возникает пробка жидкости, полностью перекрывающая проходное сечение трубы.

Возникновение КГУ определяется геометрией трубопровода и режимами течения пара и жидкости. Для предсказания возникновения КГУ разрабатываются инженерные методики, основанные на имеющихся экспериментальных данных, и достаточно сложные математические модели, основанные на анализе устойчивости границы раздела жидкость-пар.

Другой важной практической задачей является оценка повышения давления при КГУ, необходимая для учета нагрузки на трубопроводы и оборудование.

Как в классическом, так и в конденсационном ГУ повышение давления Δp определяется по формуле Жуковского, которая дополнена коэффициентом K :

$$\Delta p = K \rho_l c w, \quad (1)$$

где K принимает значение 1,0, если жидкость соударяется с твердой стенкой, и значение 0,5, если жидкость соударяется с жидкостью; ρ_l – плотность жидкости; c – скорость распространения ударной волны в трубопроводе; w – это скорость жидкости в момент закрытия арматуры при классическом ГУ или скорость пробки жидкости в момент полного коллапса парового объема.

Из формулы (1) следует, что для определения повышения давления при КГУ необходимо знать скорость пробки жидкости в момент полного коллапса парового объема.

Знание скорости пробки жидкости позволяет определить её кинетическую энергию, которая преобразуется в потенциальную энергию сжатия среды при торможении. Часть этой энергии тратится на деформацию трубопровода и на его возможное разрушение. Именно энергия в большей степени, а не давление в пике КГУ, определяет – разрушится трубопровод или нет.

В докладе представлена инженерная консервативная методика расчета скорости пробки жидкости при КГУ и анализ влияния параметров на результаты расчетов.

Исследование процессов теплопередачи при конденсации пара из парогазовой смеси для поддержания работоспособности парогенераторов ВВЭР в аварийном режиме

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

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

Ключевые слова: ВВЭР, пассивные системы, теплообмен, конденсация, пар, неконденсирующиеся газы, теплообменник, струи, недогретая жидкость.

На сегодняшний день в атомной энергетике одной из основных задач, требующих особого внимания, является недопущение расплавления активной зоны реактора 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 АЭС в работу включаются системы безопасности, которые отводят тепло от активной зоны путем вынужденной циркуляции с помощью аварийных насосов. Такие системы принято называть активными. Помимо их, существуют пассивные системы безопасности, принцип действия которых основан на естественных законах природы. Они обеспечивают непрерывный отвод тепла реактора 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).

В реакторной установке ВВЭР-1200, реализованной на Нововоронежской АЭС-2, используются пассивные системы безопасности. За счет работы системы пассивного отвода тепла (СПОТ) и системы пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени (системы ГЕ-2), парогенератор переводится в режим конденсации пара из парогазовой смеси, поступающей из активной зоны во время аварии. Генерация неконденсирующихся газов в первом контуре и активной зоне в значительной мере оказывает влияние на конденсационную мощность парогенератора, и, соответственно, на длительность эффективной работы СПОТ. Первые 24 ч после начала аварии данная проблема решается путем самопроизвольного оттока неконденсирующихся газов из трубного пучка парогенератора в гидроемкости системы ГЕ-2, в результате истечения из них запасенного раствора борной кислоты. После излива гидроемкостей второй ступени, отвод газов прекращается, что в конечном итоге приводит к снижению конденсационной мощности парогенераторов и теплообменников системы пассивного отвода тепла.

В реакторной установке проекта ВВЭР-ТОИ описанная выше проблема частично решается следующим образом: отток газов из трубного пучка парогенератора происходит самопроизвольно в объем гидроемкостей третьей ступени в течение 48 ч после прекращения работы системы ГЕ-2. Однако ситуацию осложняет тот факт, что при работе системы гидроемкостей третьей ступени возможно повышение концентрации борной кислоты в активной зоне, что может привести к кристаллизации последней на элементах ТВС и другом внутриреакторном оборудовании.

Таким образом, проблемы накопления неконденсирующихся газов в трубном пучке парогенератора ВВЭР и повышения концентрации борной кислоты остаются не решенными окончательно. В связи с этим, в перспективных проектах отечественных реакторов с водой под давлением рассматриваются различные способы модернизации существующих или создания новых пассивных систем безопасности, решающих данные проблемы.

В рамках одной из концепций рассматривается система, позволяющая отводить парогазовую смесь из трубного пучка парогенератора в объем гидроемкостей второй ступени за счёт процесса контактной конденсации пара на струях недогретой жидкости.

Вторая концепция, исследованная в рамках данной работы, представляет собой систему теплообменников-конденсаторов, подключенных параллельно к гидроемкостям ГЕ-2 и размещаемых в межоболочечном пространстве защитной оболочки. Теплообменники-конденсаторы образуют с гидроемкостями второй ступени контур естественной циркуляции, в котором организовано движение парогазовой смеси. Согласно данной концепции работа системы должна отводить парогазовую смесь из парогенератора, тем самым обеспечивая работоспособность системы пассивного отвода тепла.

В докладе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса теплообмена при конденсации пара из парогазовой смеси на струях недогретой жидкости и внутри пучка вертикальных оребренных труб, проведенных в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» на экспериментальной установке с двумя рабочими участками: «Устройство удаления газов» и «Конденсация на струях». Исследования проводились с целью обоснования перспективных методов продления автономной работы пассивных систем безопасности в аварийной ситуации.

Экспериментальное моделирование течения потока теплоносителя за смесительными решетками ТВС-КВАДРАТ

**Снегирёва А.С., Хробостов А.Е., Добров А.А., Доронков Д.В., Доронкова Д.С.,
Пронин А.Н., Рязанов А.В., Демкина Т.Д.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(ФГБОУВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), Нижний Новгород,
angelinasneg87@gmail.com

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, перемешивающая решетка-интенсификатор, твэл, направляющий канал, область исследований, характерная ячейка, гидродинамика теплоносителя, перемешивание теплоносителя, вихревое течение потока.

В статье приведены результаты исследований течения теплоносителя за перемешивающими решетками-интенсификаторами тепловыделяющих сборок ТВС-КВАДРАТ реакторов PWR. Целью работы является оценка эффективности перемешивания теплоносителя за решетками-интенсификаторами различных конструкций и выбор их оптимальной конструкции. Для достижения поставленной цели проведен ряд экспериментов на аэродинамическом исследовательском стенде с масштабными моделями фрагментов твэльного пучка тепловыделяющих сборок с перемешивающими решетками-интенсификаторами, которые оснащались турбулизирующими дефлекторами различной формы профиля. В качестве области исследований выбраны ячейки, расположенные возле направляющего канала и регулярные ячейки. Выбор области исследований обусловлен не только необходимостью получения гидродинамической картины течения теплоносителя в характерных ячейках и выбором оптимальной формы дефлектора, но и оценкой влияния поперечных течений теплоносителя из области направляющего канала на движение потока в смежных с ними ячейках. Картина течения теплоносителя представлена векторными полями поперечных скоростей, картограммами распределения поперечных и аксиальных скоростей, а также графическими зависимостями распределения компонент скорости потока. Анализ пространственного распределения поперечных и осевых скоростей потока позволил изучить и детализировать картину течения теплоносителя. Оценка эффективности перемешивания теплоносителя за решетками и определение оптимальной формы профиля дефлектора проводились на основе комплексного анализа гидродинамической картины течения теплоносителя и параметров внутриячейкового вихреобразования и межячейкового перемешивания. Результаты экспериментов используются при инженерном обосновании конструктивных решений при проектировании активных зон реакторов PWR с ТВС-КВАДРАТ. Накопленная база опытных данных используется для верификации CFD программ (как зарубежной, так и отечественной разработки), а также программ теплогидравлического поэлементного расчета активных зон.

Работа выполнена при финансовой поддержке национального проекта «Наука и университеты» в рамках программы Минобрнауки РФ по созданию молодёжных лабораторий (научная тема: «Гидродинамические и тепломассообменные процессы в элементах ядерных энергетических установок»).

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Исследование влияния тепломассообменных процессов на работу пассивных систем безопасности ВВЭР в случае аварийной ситуации

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

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

Ключевые слова: ВВЭР, пассивные системы безопасности, ГЕ-2, система пассивного отвода тепла, теплообмен, неконденсирующиеся газы.

Реакторные установки водо-водяных реакторов нового поколения ВВЭР-1200 являются результатом многолетнего эволюционного развития и совершенствования действующих реакторов. Новые проекты ВВЭР характеризуются повышенной мощностью, а также более высоким уровнем безопасности за счет использования пассивных систем. Авария на АЭС «Фукусима» (Япония) показала недостаточность только активных систем охлаждения активной зоны. При использовании пассивных систем обеспечиваются останов и длительный отвод остаточного энерговыделения от реактора при значительном числе сценариев аварии. При этом для их запуска в работу не требуется вмешательство оперативного персонала, а также подача энергии от внешних источников в течение длительного времени (до 24 ч).

Пассивные системы охлаждения активной зоны реактора ВВЭР-1200, сооруженного на площадке Нововоронежской АЭС включают в себя системы пассивного залива активной зоны из гидроемкостей первой и второй ступеней (ГЕ-1 и ГЕ-2), а также систему пассивного теплоотвода к окружающему воздуху (СПОТ).

СПОТ предназначена для 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 аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода СПОТ обеспечивает перевод горизонтальных парогенераторов на работу в режиме конденсации пара первого контура, поступающего в трубчатку ПГ из активной зоны, тем самым обеспечивая подпитку активной зоны.

На работу парогенератора в данном режиме отрицательное влияние оказывает присутствие в первом контуре реактора неконденсирующихся газов: азота, поступающего в контур при срабатывании гидроемкостей первой ступени, е продуктов радиолиза воды и разложения гидразингидрата растворенного в воде, так же возможно поступление паровоздушной смеси через разрыв ГЦТ. Поступая вместе с паром из реактора в трубный пучок парогенератора, неконденсирующиеся газы могут значительно уменьшить интенсивность процесса конденсации.

Для исследования процессов теплопередачи в парогенераторе ВВЭР, работающем в аварийном конденсационном режиме, в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» был сооружен стенд ГЕ-2М. На стенде были выполнены три серии экспериментов с различными сценариями и начальными параметрами. Основной задачей было определение влияния неконденсирующихся газов на теплообменные процессы, происходящие в трубном пучке ПГ.

В ходе первой серии опытов было определено, что мощность модели парогенератора не снижается ниже 80 % от уровня при работе на чистом паре из-за поступления неконденсирующихся газов в трубный пучок, даже в наихудшем моделируемом сценарии. Было выявлено наличие отрицательных обратных связей между накоплением

неконденсирующихся газов и температурным перепадом между контурами. В дальнейшем было определено влияние состава неконденсирующихся газов на происходящие в парогенераторе теплообменные процессы.

В ходе заключительной серии экспериментов исследовалась работа парогенератора в аварийном режиме без отвода неконденсирующихся газов. При этом была определена максимальная длительность автономной работы пассивных при моделировании различных сценариев аварий.

Для исследования влияния процессов массопереноса между защитной оболочкой и реакторной установкой стенд ГЕ-2М был модернизирован путем добавления рабочего участка с имитаторами защитной оболочки и реактора. На стенде была проведена серия опытов с имитацией разрыва на «холодной» и «горячей» ветках главного циркуляционного трубопровода. Также в экспериментах исследовалась максимально возможная продолжительность работы парогенераторов в конденсационном режиме после прекращения отвода неконденсирующихся газов в объем гидроемкостей системы ГЕ-2.

Проведенная комплексная экспериментальная работа позволила обосновать работоспособность пассивных систем охлаждения активной зоны реактора ВВЭР.

Исследование интенсификации теплосъёма в канале с одиночным подвижным турбулизатором

Перепелица Н.И.

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

Ключевые слова: кризис теплообмена, критическая плотность теплового потока, перепад давления, подвижный турбулизатор, фреон-12.

В докладе представлены результаты исследований влияния подвижного одиночного турбулизатора, расположенного в поперечном сечении экспериментального канала на кризис теплообмена и перепад давления в области дисперсно-кольцевого режима течения фреона-12. Экспериментальным каналом являлась вертикально установленная труба внутренним диаметром $d = 8$ мм из стали ОХ18Н10Т, на которой создавались две зоны независимого электрического обогрева. Первая зона соответствовала входному участку, а вторая – выходному, контрольному участку трубы.

Между этими участками с помощью фланцевого соединения закреплялась диафрагма, в которой предварительно устанавливался исследуемый турбулизатор в виде двухстороннего клина в подвижном или неподвижном состоянии. Подвижность двухстороннего клина обеспечивалась расположением его на оси, проходящей через его центр тяжести.

Эксперименты проведены при давлениях: 1,06, 1,55 и 2,3 МПа и массовых скоростях 1000, 1500, 2000 кг/(м²·с). Указанные давления эквивалентны давлениям на воде 6,9, 10,09 и 13,7 МПа. Для фиксации кризиса теплообмена использовались термопары типа хромель-копель, приваренные к стенке трубы, как в конце её входного участка, так и на выходном её участке, на заданных расстояниях – z от турбулизатора.

Проведение опытов состояло из двух этапов. На первом подготовительном этапе при подаче электрической мощности на входной участок и заданных давлении, расходе и температуре входа теплоносителя создавался требуемый режим течения парожидкостного потока перед турбулизатором: заданное массовое паросодержание с наличием расхода в подтекающей к турбулизатору плёнки жидкости или без него.

Второй этап опытов начинался с подачи электрической мощности и её постепенного увеличения на контрольном участке канала вплоть до фиксации кризиса теплообмена (критической мощности) по термопаре, расположенной на наибольшем расстоянии от турбулизатора. Путём дальнейшего увеличения мощности исследовался характер изменения величины критической плотности теплового потока $q_{кр}$ в зависимости от расстояния до турбулизатора z .

Для оценки влияния подвижности турбулизатора проводились опыты с неподвижным его закреплением на угол 0° , $27,6^\circ$ и $42,4^\circ$ относительно оси трубы. Также проводились опыты с отсутствием турбулизатора, в которых определялась величина критической плотности теплового потока для гладкого канала $q_{кр}^0$.

Проведённая обработка полученных опытных данных в виде зависимостей величины $q_{кр}$ от z показала, что они качественно совпадают с аналогичными, полученными ранее в опытах для неподвижных одиночных турбулизаторов в виде обычного ребра, диска и ребра с впадинами или отверстиями. Максимальная величина $q_{кр}$ для контрольного участка наблюдается в непосредственной близости от турбулизатора. С увеличением расстояния от него величина $q_{кр}$ монотонно уменьшается. Зависимость прироста критической плотности теплового потока $\Delta q = q_{кр} - q_{кр}^0$ от z аналогична зависимости $q_{кр}$

от z . Наличие плёнки жидкости как перед подвижным, так и неподвижными турбулизаторами не сказывается на величине $q_{кр}$.

Обработка части полученных опытных данных в системе координат $(\Delta q^{-0,5}, z/d)$ и в виде зависимостей полного перепада давления (потерь напора) на контрольном участке от выходного паросодержания представлена на соответствующих рисунках. Указанная система координат позволяет описать опытные данные прямолинейными зависимостями.

Для сравнения на этих рисунках приведены также ранее полученные опытные данные на этом канале с неподвижными турбулизаторами в виде диска диаметрами 3,6 и 5,3 мм, имеющими коэффициент перекрытия канала соответственно 0,234 и 0,43. Первое значение этого коэффициента соответствовало двухстороннему клину, закреплённого вдоль оси трубы, а второе – двухстороннему клину, закреплённого под углом $42,4^\circ$ относительно оси трубы.

Показано, что наличие колебательных движений у турбулизатора по сравнению с закреплением его вдоль оси трубы вызывает положительное воздействие на теплосъём за счёт более интенсивного осаждения капель жидкости на стенку трубы. При давлениях 1,06 и 2,3 МПа повышение величины Δq составляет соответственно 83% и 140%, а сопутствующее этому увеличение полного перепада давления для выходного паросодержания $\sim 0,3$ составляет соответственно $\sim 46\%$ и 51% .

На основе проведенного анализа полученных опытных данных выявлено, что угол поворота исследованного подвижного двухстороннего клина относительно продольной оси трубы находится в диапазоне от $27,6^\circ$ до $42,4^\circ$, что существенно влияет на нежелательное увеличение величины потерь напора.

Для создания эффективного воздействия данного двухстороннего клина на осаждение капель жидкости на стенку достаточно ограничить величину его угла поворота $(28-30)^\circ$, что можно сделать, например, увеличением длины его хвостовой части. Это будет способствовать как уменьшению потерь напора, так и повышению дальности действия двухстороннего клина на интенсивность процесса осаждения капель, а, следовательно, и интенсификации теплосъёма.

При сравнении опытных данных для неподвижного двухстороннего клина и дисков диаметром 3,6 мм и 5,3 мм, обнаружено влияние формы турбулизатора на эффективность интенсификации теплосъёма при одинаковой величине коэффициента перекрытия проходного сечения канала. Так некоторое преимущество клина над диском проявлялось в меньших величинах полного перепада давления при коэффициенте перекрытия канала 0,234 и в небольшом повышении величины Δq на 27% при коэффициенте перекрытия канала 0,43.

Расчетно-экспериментальное исследование критического теплового потока на моделях ТВС реакторов PWR с аксиальной неравномерностью энерговыделения на стенде КС в НИЦ «Курчатовский институт»

**Зубков А.Г., Олексюк Д.А., Щербинин А.А., Домрачев П.А.,
Анохин Ю.М., Вертиков Е.А.**

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

Ключевые слова: критический тепловой поток, PWR, многостержневая модель, аксиальная неравномерность, валидация.

В работе представлены некоторые предварительные результаты цикла исследований, выполненных на полновысотных многостержневых моделях ТВС-КВАДРАТ конструкции «ОКБМ Африкантов» для реакторов PWR, обладающих аксиальной и радиальной неравномерностью энерговыделения, а также имитатором направляющего канала. Исследования были направлены на исследование влияния неравномерного аксиального поля энерговыделения, наличия в потоке решеток интенсификаторов теплоотдачи, а также имитатора направляющего канала стержней СУЗ на величину критического теплового потока. Модели были оснащены пластинчатыми дистанционирующими решетками (ПДР) и перемешивающими решетками (ПР). Кроме того, исследовались перемешивание теплоносителя и гидравлическое сопротивление при различных режимных параметрах потока теплоносителя.

Результатом выполненных экспериментов является банк данных по величине КТП, распределению температур теплоносителя в ячейках экспериментальных моделей и перепаду давления на различных высотных участках зоны тепловыделения моделей. Полученные данные рекомендованы для валидации расчетных методик для КТП в ТВС водоохлаждаемых ядерных реакторов.

Представлены результаты расчетов по модернизированной на массиве экспериментальных данных ячейковой корреляции RNC-SUB, использованной для предтестовых расчетов КТП в выполненных экспериментах. Сравниваются между собой результаты определения координаты кризиса и величины КТП по различным методикам, таким как RNC-SUB и корреляция Безрукова.

Анализ влияния различных параметров на эффективность использования водного аэрозоля для охлаждения воздушных теплообменников СПОТ ВВЭР

Смирнов А.М., Морозов А.В.

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

Ключевые слова: ВВЭР, система пассивного отвода тепла (СПОТ), воздушные теплообменники, оптимизация, водный аэрозоль, объёмный расход, диаметр капель, режим кипения.

Текущая ситуация в мировой атомной энергетике свидетельствует о том, что кризис, вызванный авариями на ЧАЭС и АЭС «Фукусима» и выражающийся в страхе ответственности перед ядерными технологиями, прошёл, и всё большее количество стран готовы строить у себя атомные электростанции. В настоящее время существует ряд компаний, предлагающих свои проекты на экспорт. Среди них можно выделить американский концерн Westinghouse с проектом AP-1000, китайские корпорации CGNPC и CNNC с реактором Hualong One, а также корейскую компанию KHNP с проектом APR-1400. Государственная корпорация «Росатом» является главным поставщиком энергоблоков на мировой рынок. Её основным экспортным продуктом является ЯЭУ с реактором ВВЭР-1200. При этом конкурирующие с ГК «Росатом» зарубежные компании стремятся сделать свои проекты более привлекательными для потенциальных покупателей, снижая стоимость оборудования и одновременно выполняя критерии безопасности, прописанные в нормативных документах. Следовательно, для Госкорпорации становится довольно актуальной проблема оптимизации стоимости предлагаемых на экспорт ядерных энергетических установок.

Довольно значительную долю в цене современного энергоблока составляет стоимость систем безопасности. Одной из них является система пассивного отвода тепла (СПОТ) реактора ВВЭР-1200, которая обеспечивает отвод остаточных тепловыделений от реактора при запроектных авариях. В реакторах ВВЭР-1200 применяются СПОТ двух конструкций. Первая из них предусматривает отвод тепла от активной зоны реактора через теплообменники, погружённые в воду (референтным блоком является ЛАЭС-2). Во втором варианте данной системы в качестве конечного поглотителя тепла используется воздух (реализован на площадке НВАЭС-2). Для этой концепции СПОТ был предложен вариант оптимизации, который заключается в уменьшении площади поверхности воздушных теплообменников и одновременном применении водного аэрозоля для сохранения мощностных характеристик, заложенных в проекте (последнее необходимо для выполнения критериев безопасности). Данный вариант оптимизации имеет как экономические, так и эксплуатационные преимущества, заключающиеся в снижении стоимости теплообменников и одновременном повышении их эффективности за счёт передачи тепла от трубного пучка к каплям испаряющейся жидкости, которая характеризуется высокими значениями теплоты парообразования. Являясь гибридным проектом на базе воздушной и водяной СПОТ, данная система устраняет недостатки обоих вариантов.

В работе была проведена расчётная оценка эффективности использования водного аэрозоля в оптимизированной СПОТ ВВЭР для определения значений основных эксплуатационных параметров работы системы. Также был проведён анализ основных физических параметров водного аэрозоля с целью нахождения оптимальных диапазонов их значений для достижения максимальной эффективности теплоотвода. К таким параметрам относятся средний диаметр капель, объёмный расход жидкости для создания водного аэрозоля и режим её кипения на поверхности.

Секция 4.

Тепломассообмен, магнитная гидродинамика, вибрации и акустика в энергетических установках

Экспериментальное исследование механизмов гидродинамического возбуждения вибраций твэлов в ТВС ВВЭР-440

Перевезенцев В.В., Солонин В.И.

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

Ключевые слова: ТВС ВВЭР, твэлы, гидродинамика, возбуждение вибраций, пульсации давления, тракт подвода теплоносителя, дроссельные шайбы, вихревые структуры, спектры пульсаций давления и виброперемещений.

ТВС водоохлаждаемых реакторов в эксплуатационных условиях гидродинамически нагружены потоком теплоносителя, колебаниями внутрикорпусных устройств и механически фиксируются от всплытия опорными конструкциями. Турбулентные и акустические воздействия потока теплоносителя вызывают вибрации твэлов. Как показывают измерения пульсаций давления в первом контуре ВВЭР, вибрации твэлов в ТВС связаны с работой ГЦН, которые сообщают потоку импульсы давления на оборотной, лопаточной и кратных частотах, а также с турбулентностью потока на входе в ТВС, определяемой геометрией тракта подвода теплоносителя к пучку твэлов. Гидродинамические нагрузки $\vec{f}_g(z, \tau)$ на единичную длину пучка твэлов в сечении z в момент времени τ в плоскости перпендикулярной оси ТВС определяется распределением мгновенных значений пульсаций давления $p'(z, P, \tau)$ по периметру P внешней границы пучка твэлов ($\vec{n}$ – нормаль к внешней границе пучка)

$$\vec{f}_g(z, \tau) = \int_P p'(z, P, \tau) \cdot \vec{n} \cdot dP$$

Следовательно, для анализа вибраций твэлов в турбулентном продольном потоке теплоносителя необходимо располагать информацией о полях пульсаций давления на обтекаемых поверхностях. Пульсации давления в пучке твэлов в настоящее время могут быть получены только экспериментальным путем.

Экспериментальные исследования проводились на гидродинамическом стенде «Э7-ЭЛЕМАШ» с использованием полномасштабного (со свинцовыми имитаторами топливных таблеток) макета ТВС ВВЭР-440 второго поколения. Полученные результаты подтвердили определяющую роль в возбуждении вибраций твэлов не только скорости, но и интенсивности и спектрального состава турбулентности поступающего в макет потока на вибрации твэлов, особо значимую в пределах первого пролета между опорной и дистанционирующей решетками. С целью существенного изменения структуры течения на входе в макет ТВС размещались дроссельные шайбы с диаметрами 45; 48,5

и 52 мм, которые устанавливаются и в РУ ВВЭР-440. На начальном гидродинамическом участке (в области первого пролета пучка твэлов) уровни пульсаций давления при различных условиях на входе в ТВС существенно различаются. Соответственно и виброперемещения на начальном гидродинамическом участке для этих условий оказываются различными: для больших уровней пульсаций давления характерны и более высокие виброперемещения. При скорости течения в пучке 3,5 м/с уровни пульсаций увеличиваются с ~2 кПа для невозмущенного потока до ~12 кПа при размещении на входе дроссельной шайбы 45 мм. Соответствующие уровни виброперемещений составляют 20 и 120 мкм. Вклад в виброперемещения пучка твэлов колебаний элементов конструкции гидродинамического стенда (колонки размещения макета ТВС) не превышает 5 мкм, то есть составляет не более 25 %. Размещение на входе в ТВС возмущающих поток дроссельных шайб приводит не только к увеличению среднеквадратичных значений, но и качественному изменению спектрального состава пульсаций давления. При всех исследованных гидродинамических условиях на входе в ТВС более 90 % энергии пульсаций давления сосредоточено в частотном диапазоне до 200 Гц. Вдали от входа в пучок твэлов возмущающее воздействие дроссельных шайб снижается, а уровни виброперемещений для различных гидродинамических условий отличаются незначительно. Эта особенность подтверждается полученными распределениями интенсивности пульсаций давления по длине пучка твэлов. Влияние возмущающих поток входных устройств (в частности, дроссельных шайб) распространяется на сравнительно короткий начальный гидродинамический участок. Для дроссельной шайбы 45 мм интенсивность пульсаций давления снижается по длине пучка более чем в 2 раза. Для слабо возмущенного потока наблюдается практически равномерное распределение пульсаций давления по длине пучка твэлов.

Размещение перед хвостовиком ТВС дроссельных шайб, существенным образом влияет на распределения и развитие скоростей осредненного течения в пучке твэлов. Этот процесс сопровождается перераспределением расхода по сечению пучка с образованием поперечных по отношению к твэлам течений. Поперечное обтекание цилиндрических элементов обладает более высокой способностью возбуждения вибраций по сравнению с продольным обтеканием. В связи с этим проводились исследования распределений осредненных скоростей при наличии на входе в ТВС различных входных устройств. Развитие профилей поперечных скоростей по длине пучка вместе с данными по продольным распределениям пульсаций давления позволяют оценить область пучка твэлов, подвергающуюся повышенным гидродинамическим нагрузкам. В условиях невозмущенного турбулентного потока неравномерность распределения скорости перед нижней опорной решеткой составляет 40...50 %. При этом непосредственно в пучке неравномерность распределения скорости течения существенно снижается и не превышает 20 %. Стабилизация профилей скорости наступает в пределах первого пролета пучка. Нижняя опорная решетка является основным элементом ТВС, обеспечивающим существенное выравнивание полей скоростей и устранение локальных неоднородностей скоростей теплоносителя. При размещении дроссельных шайб неравномерность полей скоростей перед нижней опорной решеткой заметно возрастает. Причем даже на значительном удалении от дроссельной шайбы перед нижней опорной решеткой проявляется ее влияние, заключающееся в формировании центральной струи. Связанная с этим более высокая неравномерность распределения перед нижней опорной решеткой сохраняется и в области пучка твэлов. гидродинамическом участке возможно формирование поперечных перетоков теплоносителя из периферийной области пучка в центральную при отсутствии дроссельных шайб, и из центральной области на периферию пучка при раз-

мещении на входе в ТВС дроссельных шайб. На основании результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод об определяющем влиянии такой гидродинамической характеристики турбулентного потока как пульсации давления на вибрации твэлов ТВС ВВЭР. Скорость турбулентного потока в пучке не может служить единственной гидродинамической характеристикой, определяющей вибрационные характеристики пучков твэлов в ТВС. Наличие возмущающих поток различных элементов тракта подвода теплоносителя к пучку твэлов существенным образом влияет на вибрационные характеристики.

Для снижения интенсивности вибраций пучков твэл необходимо гидродинамическое профилирование тракта подвода теплоносителя к ТВС. Выравнивание распределения осредненных скоростей перед нижней опорной решеткой и отсутствие возмущающих поток и формирующих крупномасштабную вихревую структуру течения элементов конструкции позволит снизить уровни пульсаций давления, а, следовательно, и интенсивность вибраций пучков твэлов в турбулентном потоке теплоносителя.

Анализ характеристик, связанных резонаторов Гельмгольца

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

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

Ключевые слова: резонатор Гельмгольца, связанные резонаторы, термоакустика, программа DeltaEC, расчетная модель, резонансная кривая, диафрагма, присоединенная масса, амплитуда колебаний, давление, скорость, расход.

Резонаторы Гельмгольца широко используются в настоящее время для снижения шума двигателей, работающих в автомобильной, авиационной и других отраслях промышленности, а также для гашения колебаний в различных трубопроводных системах. Такие резонаторы являются основным элементом различных шумозащитных устройств. Акустические свойства элементов ядерных реакторов часто рассчитываются с использованием модели резонатора Гельмгольца. Так, при верификации системы контроля вибрации, успешно работающей на Нововоронежской АЭС, показано, что акустические свойства ядерного реактора, подобны свойствам группы одновременно функционирующих резонаторов Гельмгольца. Резонатор Гельмгольца является также одной из составных частей устройств, использующих термоакустический эффект: двигателей, холодильников и тепловых насосов, которые в настоящее время активно разрабатываются и выводятся на рынок.

При проектировании термоакустических устройств широко используется программа DeltaEC. С целью освоения этой программы авторами ранее была создана расчетная модель, позволяющая рассчитать акустические характеристики системы, состоящей из двух резонаторов Гельмгольца, связанных отверстием в общей диафрагме. Экспериментальная модель состояла из двух цилиндрических камер, сообщающихся между собой через отверстие в тонкой диафрагме с острой кромкой. Гармонические колебания давления создавались с помощью подвижного поршня виброэлектродинамического стенда ВЭДС-200.

В докладе приведено краткое описание экспериментальной и расчетной моделей. Измерения и расчеты были выполнены для широкого диапазона диаметров отверстий (от 0,057 до 0,488 от диаметра камеры резонаторов) при уровне звукового давления в резонансе от 110 до 150 дБ. Приведено сопоставление рассчитанных резонансных кривых давления в камерах резонаторов с экспериментальными данными. Выполнено сопоставление результатов расчетов частот резонансов и антирезонансов давления с экспериментальными данными. Согласие рассчитанных характеристик по давлению с полученными ранее экспериментальными данными позволило сделать вывод применимости программы, адекватности расчетной модели и о достоверности результатов расчетов.

В докладе приведены и обсуждаются распределения амплитуды колебаний давления и расхода воздуха по высоте экспериментальной модели, полученные в результате расчетов при различных частотах воздействия.

Приведены результаты расчета резонансных кривых расхода и колебательной скорости воздуха в отверстии диафрагмы, не измерявшиеся в экспериментах.

Анализ рассчитанных резонансных кривых скорости воздуха показал, что при резонансе амплитуда колебательной скорости в отверстии, связывающем камеры резонаторов, не зависит от его диаметра. Получена линейная зависимость квадрата резонансной амплитуды скорости от амплитуды колебаний поршня. Приведено объяснение полученных результатов.

Выбор и обоснование конструкции термоакустического холодильника

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

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

Ключевые слова: термоакустика, термоакустический холодильник, термоакустический двигатель, бегущая волна, стоячая волна, регенератор, программа DeltaEC, математическое моделирование, расчетная модель.

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

Одним из способов утилизации ПНГ является технология «Gas-to-liquids» – химическая переработка ПНГ в топливо, которая целесообразна на распределительных станциях, где перерабатывается до 3 миллиардов кубометров сырья в год. В то же время непосредственно на месторождениях наиболее целесообразным представляется сжижение ПНГ с использованием небольших холодильных установок.

Для небольших нефтяных месторождений представляется целесообразным использовать устройства, работающие на обратном термоакустическом эффекте, в которых для генерации холода используется энергия акустической волны. Основными элементами термоакустических холодильных установок являются: теплообменники подвода и отвода тепла, регенератор и устройство, создающее акустическую волну. По сравнению с парокомпрессионными холодильными установками, термоакустические установки обладают рядом преимуществ: не содержат вредный хладагент, имеют минимум подвижных механических узлов и деталей, позволяют использовать при работе любые источники энергии, в том числе возобновляемые. Так как в термоакустических устройствах осуществляется внешний подвод тепла, то их термодинамический цикл близок к обратному циклу Стирлинга.

Для расчета основных параметров термоакустических устройств обычно используется свободно распространяемый программный комплекс DeltaEC, разработанный в Лос-Аламосской национальной лаборатории. Ранее авторами доклада с целью освоения DeltaEC была создана расчетная модель и выполнен цикл расчетов акустических характеристик связанных резонаторов Гельмгольца. Получено хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными ФЭИ.

В докладе рассмотрены физические принципы работы термоакустических холодильников и подходы к их проектированию. Приведены конструктивные параметры разрабатываемого термоакустического охладителя с приводом от термоакустического двигателя. Показано, что предложенная система имеет характеристики, сравнимые с парокомпрессионными холодильными установками, широко применяемыми в настоящее время.

О некоторых свойствах пульсаций температуры в жидких металлах

Осипов А.А., Ниязов С-А.С.

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

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

Благодаря сочетанию теплофизических и физико-химических свойств расплавы тяжелых (свинец, эвтектика свинец-висмут) и щелочных (натрий) металлов традиционно рассматриваются в качестве теплоносителей перспективных ядерных энергетических установках на быстрых нейтронах. Эксперимент показывает, что в условиях вынужденной или естественной конвекции жидкого металла изменения его температуры носят пульсационный характер. В связи с чем, возникает вопрос о связи свойств пульсаций температуры с процессами тепломассообмена в жидких металлах, что имеет как фундаментальное, так и практическое значение, например, при разработке новых и совершенствовании существующих измерительных систем с применением статистических методов.

В рамках данной работы приводятся результаты экспериментального и расчетного исследования пульсаций температуры в жидком натрии, а также расплавах тяжелых металлов на основе свинца и висмута в условиях свободной и вынужденной конвекции. На основании анализа структурных и корреляционных функций установлено, что пульсации температуры в жидком металле связаны с его конвективным движением и характеризуются сильными корреляциями, в частности установлено влияние эжекции водорода на структуру пульсаций в эвтектическом расплаве свинец-висмут. Показано, что для моделирования пульсаций температуры в расплавах тяжелых металлов могут быть использованы мультифрактальные модели.

Исследование влияния магнитного поля на динамику струйного течения жидкого металла

**Миронов И.С.¹, Беляев И.А.¹, Листратов Я.И.¹,
Лучинкин Н.А.^{1, 2}, Свиридов Е.В.^{1, 2}**

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

2 – Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ МЭИ), Москва,

bia@ihed.ras.ru

Ключевые слова: струя, эксперимент, жидкий металл, магнитная гидродинамика, измерение профиля скорости, турбулентность, ртуть, обработка данных, численный эксперимент, датчики.

В данной работе проведено экспериментальное исследование погружения плоского струйного потока жидкого металла в квадратный канал под действием поперечного магнитного поля. Рассмотрены два случая, когда магнитное поле прикладывается параллельно к исходному направлению струи (компланарному) или поперек него. Основной целью настоящей работы является исследование усредненных характеристик и этапов экспериментов по преобразованию струи при условии возможности наблюдения сигналов продольной скорости потока. Скорость потока измеряется с помощью датчиков разности электрических потенциалов. Детальное изучение потока в поперечном сечении трубопровода около семи диаметров струи ниже по потоку от входного отверстия показывает динамику, которая является неустойчивой и в которой преобладают колебания высокой амплитуды, возникающие в результате неустойчивости струи. Структура потока и свойства колебаний в значительной степени определяются значением числа Стюарта N . При умеренном N профиль средней скорости сохраняет центральную струю с трехмерными возмущениями, которые все больше подавляются магнитным полем по мере роста N . При более высоких значениях N поток становится квазидвумерным и приобретает форму асимметричного макророта с возобновлением высокоамплитудных колебаний скорости. Термоядерный синтез считается будущим источником чистой энергии. Это не связано с ядерными отходами, характерными для деления. Топливо для термоядерного синтеза, представляющее собой комбинацию изотопов водорода дейтерия и трития, либо содержится в изобилии в морской воде, либо может быть получено (выведено) в качестве побочного продукта реакции. В реакторе эти изотопы нагреваются до температуры в несколько миллионов Кельвинов до тех пор, пока не начнется реакция синтеза. Горящая плазма в реакторе удерживается очень сильным магнитным полем 5–10 Т. Плазменная камера окружена защитными оболочками, в которых могут использоваться жидкие металлы, литий или алюминий, и которые одновременно действуют как теплообменники, отводящие энергию реакции во внешний контур, экраны и размножители трития. Поскольку жидкие металлы являются электропроводными, на их поток сильно влияет магнитогидродинамическое (МГД) взаимодействие.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 0-69-46067).

Исследование особенностей смешанной конвекции расплавов солей в условиях, характерных для реакторов нового поколения

Белавина Е.А.^{1, 2}, Пятницкая Н.Ю.¹

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

2 – Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ МЭИ), Москва,
belavinaea@gmail.com

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

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

Жидкосолевые теплоносители имеют высокую температуры плавления, поэтому рабочий диапазон температур, в котором возможно их использование, является достаточно узким и составляет около ста градусов. Очевидно, что подобная эксплуатационная специфика требует достаточно точного знания не только средних, но и локальных характеристик теплообмена.

К особенностям работы с жидкосолевым теплоносителем можно отнести существенное влияние свободной конвекции на поля скорости и температуры при течении в обогреваемых или охлаждаемых трубах. Для случая подъемного течения с обогреваемой стенкой этот эффект характеризуется значительной деформацией полей скорости и температуры, тогда как опускное течение обусловлено возможностью развития вторичных течений, которые способствуют появлению опасных пульсаций, которые создают существенные термические напряжения в материале стенки трубы. В горизонтальной трубе в случаях однородного обогрева, течение характеризуется образованием вторичных турбулентных вихрей, вызванными силами плавучести в условиях вынужденной конвекции. Вторичные токи образуют два продольных вихря в направлении движения жидкости, нарушая осевую симметрию температурных полей, что приводит к образованию точек локального перегрева вблизи стенки. Влияние магнитного поля в данной конфигурации приводит к подавлению основного потока и вторичных продольных вихрей. Для горизонтальных прямоугольных каналов в условиях одностороннего обогрева при наложении компланарного магнитного поля заметно характерное расслоение профилей температуры, однако, данный перепад сопоставим с погрешностью эксперимента. Подобный эффект наблюдался в исследовании теплоотдачи при смешанной конвекции под воздействием сильного поперечного магнитного поля в горизонтальной трубе и был вполне ожидаем. Для вертикальных прямоугольных каналов при одностороннем обогреве и компланарном магнитном поле, значительного снижения коэффициентов теплоотдачи не происходит, а наблюдаемое расслоение сопоставимо с погрешностью эксперимента. Следовательно, в исследуемых режимах значимого подавления турбулентности не происходит. Описанные выше эффекты необходимо учитывать в расчетах прочности и безопасности.

Для ответа на поставленные вопросы и дальнейшего численного моделирования вышеупомянутых процессов необходима надёжная экспериментальная информация о пространственном (трёхмерном) распределении скорости и температуры в потоке расплавленной соли. Технически такую информацию можно получить только на модельных жидкостях (с теплофизическими свойствами, близкими к свойствам расплавов солей), к которым относятся, в частности, вода и водные растворы электролитов.

В рамках данной работы, коллективом авторов НИУ «МЭИ» – ОИВТ РАН, был рассмотрен ряд численных и экспериментальных исследований особенностей теплообмена в условиях смешанной и естественной конвекций под действием массовых сил различной природы. В качестве модельной жидкости рассматривались водные растворы КОН с массовой концентрацией в 3, 4, 20 и 30 процентов. Также был проведен ряд опытов по подбору кандидатных жидкостей с 10-ти процентными водными растворами ZnSO_4 , MgSO_4 , K_2SO_4 , CuCl , Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , NaCl со схожими теплофизическими свойствами к реальным теплоносителям. В рамках работы сделан анализ существующей литературы, подтверждающий актуальность дальнейших исследований. Для изучения поведения естественной конвекции был создан экспериментальный стенд, состоящий из тестовой ячейки и медных платин, пропускание тока через которые моделируют объемное тепловыделение. Максимальная тепловая нагрузка, реализуемая в эксперименте, составила 800 кВт/м^3 . В ходе работы была выявлена сильная зависимость электропроводности от температуры, что может привести к неоднородности тепловыделения и соответственно получению сложной картины неудобной для дальнейшей интерпретации. Были построены распределения поля потенциала и температурного поля для кандидатных жидкостей, которые показали, что все рабочие среды имеют монотонно растущую зависимость значений электропроводности от температуры, а наиболее перспективным вариантом остается раствор КОН.

С целью анализа особенностей смешанной конвекции в условиях, приближенных к реальным термоядерным и гибридным установкам, проведена серия экспериментальных исследований в вертикальном и горизонтальном положениях трубы в условиях однородного обогрева ($\text{Gr} = 2,7 \cdot 10^6 - 3,9 \cdot 10^7$) и поперечного магнитного поля ($\text{Ha} = 17$) при режимных параметрах, соответствующих переходным режимам течения ($\text{Re} = 3000-7000$) и развитой турбулентности ($\text{Re} = 14000-20000$) с использованием модернизированного солевого контура РК-3. Модельная жидкость – 30 % водный раствор КОН. Вторичные вихревые структуры обладают неустойчивостью в каналах прямоугольной геометрии. С целью верификации данных выводов, было проведено исследование в вертикальном канале с односторонним обогревом ($\text{Gr} = 1,7 \cdot 10^9 - 1,1 \cdot 10^{10}$) и компланарным магнитным полем ($\text{Ha} = 15-30$) при переходных режимах течения ($\text{Re} = 8000$) и развитой турбулентности ($\text{Re} = 12000$). Модельная жидкость – 20-процентный водный раствор КОН. С целью сопоставления результатов, полученных для горизонтальной трубы с результатом для прямоугольных каналов, проведено исследование в области развитой турбулентности ($\text{Re} = 11000-12000$), а также в переходных режимах ($\text{Re} = 8000$) с заданным тепловым потоком на обогреваемой стенке ($\text{Gr} = 1,7 \cdot 10^9 - 1,0 \cdot 10^{10}$). Полученные зависимости качественно совпадают с прогнозируемыми результатами и с численным моделированием.

Была проведена оценка достижимости в рамках экспериментального исследования границы начала влияния термогравитационной конвекции на поток расплава соли в вертикальных каналах под действием поперечного магнитного поля, применительно к реакторным установкам нового поколения. Выводы согласуются с численными экспериментами в этой области.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и Высшего Образования Российской Федерации (Госзадание № 075-01056-22-00)

Гидродинамика и теплообмен при подъёмном течении жидкого металла в трубе в поперечном магнитном поле при смешанной турбулентной конвекции

Лучинкин Н.А.¹, Разуанов Н.Г.¹, Полянская О.Н.¹, Соколов М.А.², Шенягин Е.М.²

1 – Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ МЭИ), Москва,

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

Ключевые слова: жидкие металлы, смешанная конвекция, МГД-теплообмен, зондовые измерения, круглая труба, поперечное магнитное поле, эксперимент, пульсации температуры, коэффициенты теплоотдачи, термогравитационная конвекция.

Тяжелые жидкие металлы (ЖМ) рассматриваются как перспективные теплоносители и рабочие среды в ядерных и термоядерных реакторах (ТЯР). В ТЯР чистого синтеза и гибридных ЖМ предполагается использовать как для охлаждения blankets и дивертора, так и для наработки трития. Для строящегося международного ТЯР ИТЭР разрабатываются ЖМ-модули blankets, предназначенные, главным образом, для наработки трития, а также для отработки технологий эксплуатации ЖМ. В предлагаемых проектах ЖМ-модулей предпочтение оказывается выбору литий-свинцовой эвтектики Pb-Li и течению в полоидальных каналах. Для гибридных реакторов – термоядерных источников нейтронов крайне привлекательны ЖМ, так как они практически не замедляют нейтроны, или расплавы солей. Помимо трудностей эксплуатации ЖМ систем охлаждения (из-за высоких рабочих температур и физико-химических проблем коррозии и окисления), основная проблема использования ЖМ в ТЯР – большие потери давления в трактах охлаждения при прокачке электропроводной среды в сильном МП, удерживающем плазму. Также специфичен теплообмен в магнитно-гидродинамических (МГД) каналах и будет сильно отличаться от закономерностей при течении традиционных теплоносителей. Для проектирования надежных и эффективных решений важны экспериментальные данные позволяющие верифицировать численные методики и прогнозировать поведение систем охлаждения в условиях ТЯР.

Объединенная группа МЭИ – ОИВТ РАН проводит комплексные экспериментальные исследования и численное моделирование процессов магнитной гидродинамики (МГД) и теплообмена жидкого металла применительно к условиям термоядерных реакторов типа ТОКАМАК. В различных конфигурациях течения в обогреваемых трубах и каналах обнаружены особенности и неожиданные эффекты, связанные с развитием термогравитационной конвекции (ТГК) и влиянием на МГД и теплообмен. На данном этапе работ авторы исследовали характеристики гидродинамики и теплоотдачи при подъёмном течении ртути в круглой трубе в поперечном магнитном поле. В этой конфигурации в экспериментах также наблюдаются некоторые особенности.

Исследования проводились зондовыми методами: шарнирным в сечении канала и продольным зондом типа «гребенка» по длине. Выполнены серии экспериментов по измерению полей осредненной температуры и скорости, распределений температуры стенки по периметру канала и по длине, статистических характеристик пульсаций температуры в двух вариантах обогрева стенок трубы: односторонний обогрев $q_1 = 0$ и двусторонний симметричный обогрев $q_1 = q_2$. Результаты получены в диапазоне режимных параметров: чисел Рейнольдса $Re = (10-80) \times 10^3$, Грасгофа $Gr_q = (0,35-1,2) \times 10^8$, Гартмана $Ha = 0-550$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-29-00878).

Магнито-конвективные пульсации при опускном течении жидкого металла в вертикальной трубе

Сардов П.А.^{1, 2}, Листратов Я.И.², Беляев И.А.¹

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

*2 – Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ МЭИ), Москва,
sardov.pa@yandex.ru*

Ключевые слова: теплообмен, экспериментальные исследования, численное моделирование, DNS, гидродинамика, МГД, зондовые измерения, смешанная конвекция, жидкий металл, измерения температуры.

Одним из возможных теплоносителей для термоядерных реакторов типа ТОКАМАК могут стать жидкие металлы. Жидкий металл должен будет циркулировать в теплообменных трактах под влиянием высоких градиентов температуры и сильного поперечного магнитного поля. Такие условия являются сложными, с точки зрения постановки эксперимента – воспроизведение высоких тепловых потоков и магнитных полей. В большинстве режимов сильное поперечное магнитное поле стабилизирует поток, выравнивая профиль скорости и подавляя турбулентность; однако, силы плавучести, создаваемые градиентами температуры, генерируют в магнитном поле специфические структуры, которые проявляются в виде крупномасштабных магнито-конвективных пульсаций (МКП) скорости, и, температуры. Было обнаружено, что даже сильные магнитные поля (в эксперименте до 1 Тл) не всегда могут подавить высокоамплитудные пульсации температуры. Характер пульсаций при опускном течении жидкого металла в трубах и каналах существенно различается.

Предполагаемые МГД-конфигурации, близкие к условиям термоядерных и гибридных реакторов, экспериментально и численно изучаются объединённой научной группой НИУ «МЭИ» – ОИВТ РАН, с использованием ртути в качестве модельного теплоносителя. В рамках данной работы, было проведено комплексное исследование с использованием метода прямого численного моделирования (DNS – Direct Numerical Simulation), а результаты сопоставлялись с данными полученным экспериментально. DNS код, обеспечивает решение системы уравнений магнитной гидродинамики с помощью вычислительной схемы, основанной на методе конечных разностей.

Так как жидкие металлы обладают высокой теплопроводностью, а соответственно, роль сил плавучести в смешанной конвекции значительно возрастает. За счёт роста градиента температуры влияние сил плавучести распространяется за пристенными областями и проникает в ядро потока. В вертикальных каналах это влияние может быть различным и определяется направлением вынужденного течения и конфигурацией обогрева. В опускном течении, влияние сил плавучести провоцирует снижение скорости, а также может приводить к образованию возвратных течений вблизи обогреваемых стенок. То есть, в такой конфигурации возможно образование струй вблизи стенок, которые двигаются в противоположном направлении ядру потока. Основываясь на результатах экспериментов, было проведено численное моделирование методом DNS при опускном течении в вертикальной неоднородно обогреваемой трубе под влиянием сильного поперечного магнитного поля.

Рассматривалось опускное течение вязкой несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами в неоднородно обогреваемой трубе (53 калибра) под влиянием поперечного магнитного поля. Жидкость движется под действием приложенного градиента давления. Высокие тепловые нагрузки позволяют оценить влияние сил плавучести на поток жидкого металла. Для определения компонент скорости и

электрического потенциала решается уравнение Пуассона. Магнитное поле и обогрев моделировались максимально приближенно к конфигурации эксперимента. Число Прандтля (Pr) принималось равным 0,025, число Рейнольдса (Re) – 10^4 , числа Грасгофа (Gr) фиксировались в диапазоне – 10^7 – 10^8 , а числа Гартмана (Ha) – 50–900. Полезными при анализе структуры потока являются также число Ричардсона ($Ri = Gr/Re^2$), характеризующее соотношение между силами плавучести и инерции, число Стюарта ($N = Ha^2/Re$), характеризующее соотношение между силами Лоренца и инерции, и число Рейнольдса ($Rh = Re/Ha = (\mu_0 \sigma H)/\nu$) рассчитанное по толщине слоя Гартмана.

Процесс деформации поля скорости, следовательно, как и развития вихревых структур под действием магнитного поля прослеживается на полученных продольных полях скорости. Можно выделить три характерных картины течения. При $Ha = 50$ влияние магнитного поля незначительно и структура потока соответствует турбулентной. При $Ha = 300$ – 500 в потоке образуются крупномасштабные вихревые структуры, характеризующие высокоамплитудные низкочастотные МКП. Дальнейшее увеличение магнитной индукции до $Ha = 700$ – 900 формирует в потоке устойчивые вихревые структуры, однако их кинетическая энергия ниже, а частота генерации выше, что позволяет полностью сформироваться пристенному слою нагретой жидкости.

Попадая в область влияния магнитного поля в потоке сразу образуются неустойчивости, что генерирует МКП. Далее по потоку формируется систематизированная область из крупномасштабных вихревых структур. Однако, как только поток покидает область влияния магнитного поля, упорядоченные структуры разрушаются, и происходит турбулизация потока.

Для анализа обнаруженных границ генерации и подавления магнито-конвективных пульсаций использовалась, нормированная на турбулентный уровень, безразмерная интенсивность температурных пульсаций σ^* . Из-за возникающего рядом с обогреваемой стенкой возвратного течения формируется струя нагретой жидкости, которая теряет устойчивость и (отрывается от обогреваемой стенки), приводя к образованию крупномасштабных структур, устойчивых в магнитном поле и приводящих к возникновению в потоке МКП. Увеличение тепловой нагрузки способствует развитию МКП при меньших числах Гартмана, а область подавления МКП магнитным полем смещается в область больших чисел Гартмана, что соответствует результатам, полученным ранее в эксперименте.

Представленные результаты исследования, демонстрируют уникальную природу канальных течений под сильным комбинированным воздействием тепловых нагрузок и магнитного поля. Процессы в таких течениях коренным образом отличаются от всего, что наблюдалось ранее в гидродинамике. Ключевыми особенностями трансформации течения являются высокоамплитудные низкочастотные магнито-конвективные пульсации (МКП) температуры.

Характер течения изменяется в зависимости от многих факторов, таких как ориентация канала по отношению к силе тяжести, направление потока, ориентация и пространственная форма наложенного магнитного поля, схемы нагрева, длина сегментов канала с обогревом и магнитное поле, форма поперечного сечения канала и, конечно же, значения определяющих параметров: Gr , Ha и Re .

Работа выполнена при финансовой поддержке Мега Гранта МИНОБР (проект № 14.Z50.31.0042).

Численное моделирование выполнено с использованием Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.

Секция 5.

Расчетные модели, коды и результаты численного моделирования

Согласованное моделирование тепловых и нейтронно-физических параметров в активной зоне реактора с водяным теплоносителем сверхкритического давления

Зборовский В.Г.^{1, 2}, Хоружий О.В.^{1, 2}, Лиханский В.В.^{1, 2}, Елкин Н.Н.¹,
Чернецкий М.Г.¹, Аверченко П.А.^{1, 3}, Грачев Д.С.^{1, 3}, Хорохорин М.В.^{1, 3},
Белоусов В.И.¹, Давиденко В.Д.¹, Дьячков И.И.¹,
Иоаннисиан М.В.¹, Малков М.Р.¹

1 – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва,
2 – ФГБУН Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва,
3 – ФГАОУВО «Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет)», Москва,
Zborovskiy_VG@nrcki.ru

Ключевые слова: водяной теплоноситель, сверхкритическое давление, теплоотдача, плотность, профиль энерговыделения, программный модуль, связанные расчёты, итерационные методы.

Одним из перспективных вариантов энергоблоков Поколения IV являются реакторы с водным теплоносителем сверхкритического давления (СКД). Особенностью теплоносителя СКД является существенная зависимость его свойств от температуры, что приводит к заметной неоднородности плотности теплоносителя в различных частях активной зоны, а, следовательно, и к различию характеристик нейтронного спектра. В результате, обратные связи между нейтронно-физической и теплофизической частями задачи оказываются настолько существенными, что ни одна из этих задач не может быть решена отдельно от другой так, чтобы результат её решения можно было использовать в качестве заданных условий, например, по мощности тепловыделения, выгоранию и т. п., как это реализуется в существующих установках с водным и металлическим теплоносителем.

Решение этой проблемы требует развития согласованных расчётных кодов, корректно учитывающих обратные связи между нейтронно-физической и теплофизической частями задачи. Степень проявления данных связей в различных режимах работы реактора с теплоносителем СКД в настоящее время мало исследована. К тому же отсутствуют готовые алгоритмы связывания различных расчётных модулей применительно к условиям СКД. Естественным первым шагом является разработка упрощённого одноканального теплофизического модуля, позволяющего при относительно небольших вычислительных затратах исследовать широкий спектр различных условий и режимов, а также способов организации обратных связей.

В докладе представлена текущая версия теплофизического модуля ТК-СКД, результаты его тестирования, демонстрация согласованных теплофизических и нейтронно-физических расчётов. Модуль ТК-СКД предназначен для расчёта

температурного поля в твэле и охлаждающем его водяном теплоносителе СКД в условиях вынужденной конвекции. В модуле решаются сопряжённые задачи тепломассопереноса в эквивалентном канале и теплопроводности в твэле.

Течение теплоносителя моделируется в одноканальной одномерной стационарной постановке. Для нахождения скоростей, давлений и температур в канале решаются уравнения баланса массы, импульса и энергии. В качестве замыкающих соотношений в рамках настоящей работы использовались корреляции Курганова, Деева и Грасса.

Сечения ядерных реакций в топливе зависят от температурного поля в твэле. Модель теплопередачи в твэле, реализованная в модуле ТК-СКД, учитывает влияние на температуру топлива и оболочки теплофизических свойств таблеток, которые определяются составом, выгоранием и компоновкой твэла.

Для тестирования программного модуля ТК-СКД было проведено моделирование ряда экспериментов по теплоотдаче к водяному теплоносителю СКД в обогреваемых трубах. Были выбраны эксперименты, достаточно полно описанные в открытой литературе с указанием всех определяющих параметров. Результаты тестирования показывают, что в режимах нормального теплообмена модуль ТК-СКД хорошо описывает экспериментальные данные.

Для проведения согласованных теплофизических и нейтронно-физических расчётов программный модуль ТК-СКД был сопряжён с кодом КИР, который основан на методе Монте-Карло. Определён формат обмена входными и выходными данными между модулями. Связка между модулями реализована на динамических языках Python и Lua.

В работе обсуждаются различные итерационные методы для совместного решения теплофизической и нейтронно-физической задачи. Итерации проводятся по профилю тепловыделения и теплофизическому состоянию твэла и теплоносителя, включая его плотность. Рассматриваются приёмы для определения подходящего начального приближения для итераций.

Результаты проведенных исследований показали возможность самосогласованного моделирования теплофизических и нейтронно-физических процессов в реакторе с водой СКД, в том числе, в области псевдофазового перехода. Представлены демонстрационные расчёты состояния теплоносителя и профиля тепловыделения по мере повышения мощности реактора.

Исследование гидродинамики и тепломассопереноса в малоразмерных макетах ТВС применительно к активной зоне РУ БРЕСТ-ОД-300

Крапивцев В.Г., Марков П.В., Солонин В.И., Гетья С.И.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет МГТУ им. Н.Э. Баумана), Москва*

Ключевые слова: макеты ТВС, цилиндрические имитаторы твэлов двух диаметров, ячеистые дистанционирующие решетки, опорная решетка, чехол макетов, входное устройство, линейный нагреватель потока, комбинированный измерительный зонд, распределения средней скорости и температурного следа за нагревателем, статическое давление, гидравлические потери, коэффициенты гидравлического сопротивления, числа Рейнольдса потока воздуха.

Получены экспериментальные данные о формировании распределений продольной компоненты скорости и теплового следа в зазорах между слоями имитаторов цилиндрических твэлов, образующих с применением опорной и трех ячеистых дистанционирующих решеток 37 стержневые пучки в шестигранном чехле. Шаг имитаторов твэлов одинаков и равен 28,5 мм, а их диаметры различны: меньший 20,8 мм и больший 22,5 мм, что соответствует геометрии, принятой для ТВС центральной и ТВС периферийной зоны (ЦЗ, ПЗ) РУ БРЕСТ-ОД-300, обеспечивающей выравнивание мощностей, максимальных температур твэлов и подогрев теплоносителя по радиусу активной зоны.

Диаметры имитаторов твэлов, в 2,14 раза превышающие натурные диаметры твэлов, определены размером используемого шестигранного чехла «под ключ» 173,5 мм. Опорная решетка имеет проливные цилиндрические отверстия и пористость по потоку 0,47, дистанционирующие решетки (ДР) выполнены по технологии прототипирования, имеют в регулярных ячейках решетки имитаторов твэлов по три пуклевки, а в периферийных ячейках решетки 6 ячеек имеют по три пуклевки и 12 по две пуклевки, что создает неоднородность в проходных сечениях ячеек имитаторов твэлов, расположенных вдоль периметра чехла. Толщина материала ячеек решетки 1,0...0,9 мм, высота шестигранного обода решетки 42 мм, размер обода «под ключ» 171,8 мм. Дистанционирующие решетки размещены на расстояниях 120, 522 и 922 мм от выхода из опорной решетки, перед которой в 15 мм от торца размещен цилиндрический (диаметр 8 мм) нагреватель, создающий линейный тепловой след за опорной решеткой с максимальным превышением температуры в потоке не более 5,5 °С, что обеспечивало малое влияние изменения плотности воздуха в следе на течение в макетах ТВС. Высота имитаторов твэлов 1200 мм, высота чехла 1240 мм. Числа Рейнольдса потока воздуха в макетах, определенные по гидравлическому диаметру регулярной решетки имитаторов твэл, составляли от $0,6 \cdot 10^4$ до 10^5 .

Измерения распределений средней скорости и температуры выполнены в шести поперечных сечениях перед и после каждой из трех ДР. В каждом сечении комбинированный измерительный зонд диаметром 3 мм перемещался в зазорах между слоями твэлов (6 зазоров) с шагом 1,25 мм координатным устройством электротермоанометра фирмы «Dantes Dynamics». Зонд фиксировался в уплотнениях на противоположных гранях чехла и имел импульсное отверстие диаметром 0,5 мм, полное давление набегающего потока в котором измерялось датчиком фирмы «Honeywell», и расположенное в той же осевой плоскости сквозное отверстие диаметром 0,1 мм, на оси которого помещен спай термопары К-типа диаметром 0,5 мм. Тарировками подтверждена корректность измерения использованным зондом. Статическое давление измерялось на внутренней поверхности

чехла в 27 точках вдоль двух граней чехла. Время измерения в точке принято равным 3 с, что достаточно для получения статически средних значений сигналов.

Оценены погрешности определения расходов (2,5 %), средней расходной скорости в макетах (4 %), локально средней в точке скорости потока (7 %), чисел Рейнольдса (8 %), температурной разности в следе за нагревателем 0,2К (по отношению к максимумам температур в следе от 5 до 20 %).

Распределения средней скорости во всех 36×2 сечениях имеют локальные максимумы на координатах траектории зонда, ближайших к центрам ячеек решетки имитаторов твэлов, и локальные минимумы при движении зонда в области минимального расстояния между имитаторами твэлов. На выходе из опорной решетки сохраняется пограничный слой, сформировавшийся на поверхности входного устройства, но уже после первой ДР влияние пограничного слоя снижается.

За дистанционирующими решетками различия в локальных максимумах скорости в области регулярных ячеек увеличиваются из-за влияния на проходные сечения между имитаторами твэл геометрии ДР, имеющей между соседними имитаторами твэл либо сквозные каналы, либо соприкасающиеся ободья ячеек. Аналогичное влияние геометрии ячеек ДР отмечено и для периферийных, прилежащих к чехлу, ячеек решетки имитаторов твэл.

При максимальных значениях локальных скоростей в экспериментах 80...100 м/с, изменение скорости между максимумами и минимумами составляет 20...25 м/с для течения в макетах, имитирующих пучки ЦЗ и ПЗ соответственно.

Распределение температуры потока в тепловом следе, ориентированном нормально по направлению движения зонда, имеют вид симметричной функции, которая для анализа развития процессов тепломассопереноса в пучках имитаторов твэлов характеризовалась значением максимума и поперечным размером при превышении температуры вдвое меньшем максимального (ΔT и d). Уменьшение ΔT и увеличение d при течении в макетах ТВС при равных значениях чисел Рейнольдса близки по величине: для ЦЗ в сечениях, расположенных в 120 и 887 мм от опорной решетки $\Delta T = 4,8$ и 2 °С, $d = 15,4$ и $40,4$ мм, для ПЗ в аналогичных сечениях $\Delta T = 5$ и $2,2$ °С, $d = 16,7$ и 46 мм. Обработка данных о расширении теплового следа привела к оценке для коэффициентов турбулентного переноса теплоты в макетах ЦЗ $0,054$ м²/с, ПЗ $0,08$ м²/с.

Определены коэффициенты гидравлического сопротивления трения, составившие для ЦЗ (гидравлический диаметр макета 17,8 мм) 0,0265 при числе $Re \sim 9 \cdot 10^4$, а для ПЗ (гидравлический диаметр макета 14,0 мм) 0,0255 при $Re \sim 7,5 \cdot 10^4$. Коэффициенты гидравлического сопротивления ДР ЦЗ и ПЗ равны $\sim 1,4$.

Интенсификация поперечного обмена и увеличение потерь на трение в потоке связаны с турбулизацией течения регулярными ячейками ДР, влиянием геометрии периферийных ячеек ДР, создающих пограничные слои у поверхности чехла с повышенной турбулентностью.

Применение CFD-программы ЛОГОС для получения граничных условий для программы поячейкового расчета ТВС активной зоны

Дмитриев С.М., Добров А.А.

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

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, тепловыделяющая сборка, ЛОГОС, активная зона, поячейковый расчет, РИТМ-200, входной участок, теплоноситель, пучок твэлов, ядерный реактор.

Модернизация конструкции кассетной активной зоны реактора РИТМ-200 с целью увеличения энергоресурса, повышения показателей теплотехнической надежности и общего ресурса для применения ее в составе серийных универсальных атомных ледоколов и оптимизированных плавучих энергоблоков требует детального учета локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя, как в пучке топливных стержней, так и в концевых элементах ТВС.

Задачей теплогидравлического расчета активной зоны РИТМ-200 с ТВС кассетного типа является проведение анализа теплотехнических характеристик активной зоны в течение всей кампании по всему спектру эксплуатационных режимов с целью обоснования теплотехнической надежности активной зоны и обеспечения теплотехнических условий работы элементной базы, соответствующих принятым критериям. В настоящее время такие расчеты проводятся с использованием поячейковых программ.

Важным этапом вычислений является процедура получения значений расходов теплоносителя в каждой ячейке на каждом высотном участке ТВС, т.к. от этого будут зависеть значения коэффициентов теплоотдачи в ячейках ТВС, подогревы и энтальпии теплоносителя, а также значения коэффициентов запаса до кризиса в них. Определение расходов теплоносителя по ячейкам модели происходит за счет решения уравнений сохранения массы и импульса, записанных для каждой ячейки ТВС.

Решение данной системы уравнений проводится итерационным методом, при этом для определения потерь давления используются замыкающие соотношения для коэффициентов трения и местного гидравлического сопротивления. Итерационный процесс предполагает задание некоторого начального распределения расхода теплоносителя по всем ячейкам, которое в ходе расчета уточняется. Однако для первого (входного) по высоте ТВС расчетного слоя это распределение будет определено входным граничным условием, то есть заданным профилем скорости на входе в пучок твэлов или значениями расходов по ячейкам на входе.

Оценка степени влияния конструкции входного участка ТВС на распределение профиля скорости потока теплоносителя на входе в твэльный пучок является важной и актуальной задачей, поскольку от неравномерности распределения расхода теплоносителя по ячейкам твэльного пучка будут зависеть условия охлаждения отдельных твэлов. Это в свою очередь напрямую влияет на выбор уровня мощности реакторной установки, поскольку он выбирается из условия обеспечения надежной и безопасной работы твэлов в стационарных и аварийных режимах и связан с отсутствием кризиса теплообмена в наиболее энергонапряженном твэле реактора.

В докладе представлены результаты CFD-моделирования течения теплоносителя во входном участке ТВС, а также приведено их сравнение с результатами эксперимента.

Показано, что переход с круглого на шестигранное сечение в конструкции хвостовика ТВС реактора РИТМ-200 обуславливает существенную неравномерность расхода теплоносителя на входе в пучок твэлов. Поэтому при обосновании теплотехнической надежности активной зоны с повышенным энергоресурсом для РУ РИТМ-200 и активной зоны с увеличенной высотой топливного столба для РУ РИТМ-200М необходимо учесть неравномерность распределения расхода на входе в ячейки пучка твэлов в программе теплогидравлического поячеечного расчета. Это снизит уровень консерватизма при расчетах и позволит более реалистично спрогнозировать локальные теплогидравлические характеристики теплоносителя, коэффициенты запаса до кризиса теплоотдачи в ячейках и температурное состояние оболочек твэлов.

Кроме того, необходим расчетный инструмент и разработка методики, способной учитывать влияние возможных оптимизационных изменений в конструкции входного участка ТВС на распределение расхода теплоносителя в твэльном пучке. Такой подход позволяет отказаться от большого числа однотипных экспериментальных исследований, снизить стоимость и сроки конструкторских проработок и расширить спектр узлов ТВС, изменение конструкции, оптимизацию которых можно рассмотреть в сжатые сроки. В данной работе в качестве такого инструмента предлагается использовать программу вычислительной гидродинамики ЛОГОС, разработки ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ».

Целью данной работы являлось проведение численного моделирования течения потока теплоносителя в модели входного участка кассетной ТВС с использованием программы вычислительной гидродинамики ЛОГОС, а также формулировка на основе полученных результатов граничных условий по распределению расходов теплоносителя в ячейках на входе в твэльный пучок для программы поячеечного теплогидравлического расчета активной зоны.

В докладе представлен разработанный автоматизированный алгоритм обработки данных CFD моделирования в программе ЛОГОС, в результате выполнения которого были получены значения скоростей теплоносителя в сечении, соответствующему началу активной части твэльного пучка во всех ячейках. Полученные данные были автоматически обработаны и использованы в качестве входного граничного условия для программы поячеечного расчета активной зоны.

В докладе показано, что подстановка реалистичного профиля скорости на входе в расчетную поячеечную модель твэльного пучка, полученная по результатам CFD расчета, позволила значительно снизить неточность определения расхода теплоносителя по ячейкам модели, что в свою очередь ведет к повышению точности и достоверности расчета остальных теплотехнических параметров.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Расчётное исследование в программе для ЭВМ FlowVision трёхмерного течения теплоносителя в реакторе БН при расхолаживании через межпакетное пространство активной зоны

**Диденко Д.В.¹, Никаноров О.Л.¹, Рогожкин С.А.¹, Шепелев С.Ф.¹,
Аксенов А.А.², Жестков М.Н.², Щеляев А.Е.²**

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

2 – Общество с ограниченной ответственностью «ТЕСИС», Москва

Ключевые слова: расчётное исследование, FlowVision, вычислительная гидродинамика, CFD, теплообмен, быстрый натриевый реактор, расхолаживание реактора, межпакетное пространство, система аварийного отвода тепла, расчётная модель, интегральная компоновка, активная зона.

Ключевым элементом, обеспечивающим необходимый уровень безопасности перспективной реакторной установки на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН) является система аварийного отвода тепла (САОТ). В настоящее время в качестве альтернативного рассматривается вариант САОТ, в котором расхолаживание реактора осуществляется через пространство между тепловыделяющими сборками (ТВС) активной зоны, так называемое межпакетное пространство. Использование данного варианта расхолаживания реактора, по сравнению с проектным вариантом расхолаживания через обратные клапаны автономных теплообменников (АТО), улучшает технико-экономические характеристики реакторной установки в целом, но требует дополнительного обоснования эффективности и безопасности отвода тепла от активной зоны жидкометаллическим теплоносителем.

Для расчётного исследования варианта расхолаживания через межпакетное пространство был разработан методический подход и расчётная модель на базе программы для ЭВМ FlowVision, которые позволяют с помощью обоснованных упрощений с приемлемой точностью выполнять исследования характеристик трёхмерного течения теплоносителя в реакторе. Моделирование процесса расхолаживания выполнено с учётом тепловой инерции промежуточных теплообменников (ПТО). Работа АТО, обеспечивающих основной отвод тепла при расхолаживании, моделировалась при помощи одномерной математической модели, реализованной в FlowVision посредством подключаемой библиотеки.

Расчётные исследования в программе для ЭВМ FlowVision выполнены для номинального режима работы реактора и режима расхолаживания. Результаты, полученные для номинального режима, использованы в качестве начального состояния для последующих режимов расхолаживания реактора.

В докладе представлены постановка задачи, краткое описание расчётной модели, расчётных режимов, а также результаты численного моделирования трёхмерного течения теплоносителя в реакторе, которые позволили оценить уровень температур в различных участках реактора и проследить процесс формирования характерных трактов циркуляции теплоносителя на протяжении всего процесса расхолаживания.

Полученные результаты расчётных исследований будут использованы при сравнительном анализе эффективности вариантов расхолаживания реактора через межпакетное пространство и с помощью обратных клапанов АТО.

Расчетное исследование критического теплового потока на моделях ТВС реакторов PWR

Вертиков Е.А., Олексюк Д.А., Зубков А.Г., Осирко В.А.

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

Ключевые слова: критический тепловой поток, PWR, аксиальная неравномерность, решетки-интенсификаторы, валидация.

В работе представлены результаты цикла исследований течения теплоносителя в пределах полновысотных многостержневых моделей ТВС реакторов PWR. Целью исследований была оценка степени влияния неравномерного аксиального профиля энерговыделения, наличие имитатора направляющего канала и дистанционирующих решеток, обладающих значительными перемешивающими и интенсифицирующими свойствами, на величину критического теплового потока.

Используемые в данной работе данные для валидации являются результатами серии экспериментов, проведенных на стенде КС в НИЦ «Курчатовский институт».

В качестве первого этапа расчетного исследования выступает проверка корректности учета перемешивания при моделировании субканальным теплогидравлическим кодом SC-INT, разработанным в отделе теплофизических исследований НИЦ «Курчатовский институт». Прохождение данного этапа достигается за счет сравнения с экспериментальными значениями таких локальных параметров, как температура теплоносителя в ячейке и перепад давления.

Второй этап расчетного исследования заключается в получении значений критического теплового потока и координат возникновения кризиса теплоотдачи путем использования корреляции Безрукова. Также предлагается поправка, учитывающая интенсифицирующее влияние дистанционирующих решеток и улучшающая получаемые при использовании корреляции Безрукова результаты.

Заключительным этапом является модернизация ячейковой методики определения величины критического теплового потока RNC-SUB, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт», применительно к исследуемой квадратной упаковке тепловыделяющих элементов с учетом наличия решеток-интенсификаторов тепломассообмена.

Моделирование течения воздуха в системе охлаждения блока верхнего РУ ВВЭР с применением CFD

Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А., Кудрявцев О.В.

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

Ключевые слова: ВВЭР, CFD, блок верхний, математическое моделирование, привод системы управления и защиты.

Одним из важнейших элементов реакторной установки с ВВЭР является блок верхний (БВ) реактора, который служит для уплотнения реактора, размещения приводов системы управления и защиты (СУЗ), выводов датчиков внутриреакторного контроля (ВРК), сигнализаторов течи и т.д. Основными элементами БВ являются: крышка реактора с приваренными патрубками, металлоконструкция с траверсой для транспортировки БВ, приводы СУЗ.

Надежная и безопасная эксплуатация оборудования БВ во многом обусловлена возникающими при этом температурными нагрузками на важные и чувствительные к температуре элементы. Следует отметить, что непосредственный контакт некоторых элементов БВ с теплоносителем первого контура не позволяет использовать теплоизоляцию для уменьшения подвода тепла, что обуславливает применение принудительной циркуляции воздуха для охлаждения приводов СУЗ и разъемов датчиков ВРК.

В системе воздушного охлаждения вытяжного типа воздух из центрального зала поступает в область БВ, где на высоте электромагнитов вокруг каждого привода СУЗ установлены шестигранные трубы (патрубки СУЗ), которые организуют проток охлаждающего воздуха вокруг электромагнитов, также обеспечивается проток воздуха для охлаждения разъемов датчиков ВРК. После охлаждения элементов конструкции БВ нагретый воздух через систему коллекторов и коробов снова отводится в центральный зал, где направляется в специальную систему охлаждения.

В настоящей работе рассмотрена разработка и применение CFD модели системы воздушного охлаждения БВ РУ АЭС-2006 – типового проекта атомной станции нового поколения «З+» с улучшенными технико-экономическими показателями. Сложность геометрии проточного тракта системы воздушного охлаждения БВ и необходимость учета нескольких влияющих друг на друга коллекторов, работающих при разной температуре, обуславливают необходимость применения нестандартных методов работы с исходной геометрией (технология пространственной морфологической фильтрации), а также необходимость применения расчетных сеток размерностью до 300 млн. ячеек. Для CFD-моделирования данной задачи применялся высокопроизводительный вычислительный кластер, насчитывающий 2000 ядер (IntelXeon E5-2698 v4 2,2 Гц) и 5 Тб оперативной памяти.

В результате расчетного моделирования при различных расходах воздуха в системе воздушного охлаждения БВ были получены распределения расходов охлаждающего воздуха в патрубках СУЗ и ВРК, определяющие температурные условия работы расположенных в них элементов. Дополнительно был выполнен анализ чувствительности результатов расчетного моделирования к способу задания граничных условий.

Валидация программы THOR в области естественной циркуляции теплоносителя в целях расчетного обоснования РУ нового поколения «СВЕТ-М»

Новикова Г.С., Аулов И.В., Рогов А.А.

*Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР
опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск,
galina.novikovva@yandex.ru*

Ключевые слова: СВЕТ-М, THOR, программное средство, валидация, погрешность, неопределенность, свинцово-висмутовый теплоноситель, естественная циркуляция, HELIOS, NACIE, трубка Фильда, обоснование безопасности.

С конца 2021 года в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» активно ведутся работы по расчетному обоснованию эскизного проекта модульного реактора малой мощности с естественной циркуляцией «СВЕТ-М». РУ «СВЕТ-М» представляет собой двухконтурную установку с реактором интегрального типа на быстрых нейтронах. В качестве теплоносителя первого контура используется эвтектический сплав свинца и висмута (Pb – 44,5 %, Bi – 55,5 %). Тракты циркуляции первого контура формируются в пределах корпуса моноблока реакторными элементами внутрикорпусных устройств без использования трубопроводов и арматуры. Второй контур с рабочей средой вода/пар включает в себя независимые петли контура многократной циркуляции. Движение теплоносителей в первом и втором контурах в пределах РУ осуществляется за счет естественной циркуляции (ЕЦ).

В связи с этим возникает потребность в обосновании применимости теплогидравлического расчетного кода THOR, предназначенного для расчета параметров сред первого и второго контуров РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем, в области естественной циркуляции.

Для валидации расчетного кода THOR в области естественной циркуляции свинцово-висмутового теплоносителя выполнено моделирование бенчмарк-экспериментов, проведенных на интегральных неядерных стендах с естественной циркуляцией свинцово-висмутового теплоносителя HELIOS (Южная Корея) и NACIE (Италия), а также сравнение результатов расчета с экспериментальными данными с учетом неопределенности исходных данных и погрешностью самих экспериментов. В общем случае интегральный неядерный стенд является замкнутым контуром, заполненным сплавом свинец-висмут и включающим в себя имитатор активной зоны, расширительный бак, теплообменник и соединительные трубопроводы. Имитатор активной зоны представляет собой пучок стержней с нагревательными элементами, закрепленными дистанционирующими решетками в канале. Теплообменник представляет собой набор коаксиально расположенных труб разной толщины с противоточным движением сред первого и второго контура.

Для валидации расчетного кода THOR в области естественной циркуляции рабочей среды второго контура вода/пар проведена кросс-верификация с расчетным кодом КОРСАР/ГП. Задача по исследованию уровня естественной циркуляции рабочей среды вода/пар представляла собой контур многократной циркуляции, состоящий из вертикального теплообменника с теплообменной поверхностью, набранной из труб Фильда, на поверхности которых задавалось граничное условие третьего рода (постоянные коэффициент теплоотдачи и температура среды), и трубопроводов котловой воды и пароводяной смеси. В качестве граничных условий использовались постоянные

давление и энтальпия среды на входе в контур многократной циркуляции и постоянное давление на выходе из него.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что программа THOR применима для моделирования режимов с естественной циркуляцией свинцово-висмутового теплоносителя и рабочей среды второго контура (вода/пар).

Моделирование обменных расходных характеристик макета напорного коллектора БРЕСТ-ОД-300

Афремов Д.А.¹, Сапожников И.С.¹, Солонин В.И.²

1 – Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежаля» («НИКИЭТ»), Москва,
i.sapozhnikov@nikiet.ru;

2 – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет МГТУ им. Н.Э. Баумана), Москва

Ключевые слова: напорный коллектор, активная зона, БРЕСТ-ОД-300, коэффициент обмена, хвостовик, ТВС, БО, вычислительная гидродинамика, CFD, модель турбулентности.

В лаборатории «Реакторная теплофизика» кафедры Э7 МГТУ им. Н.Э. Баумана создан аэродинамический макет напорного коллектора РУ БРЕСТ-ОД-300, представляющий из себя сегмент напорного коллектора активной зоны (АЗ) РУ, выполненный в масштабе 1:5, и включающий опускной участок, входную камеру напорного коллектора, размещенные вертикально в опорной плите 18 хвостовиков блоков отражателя (БО) и 30 хвостовиков тепловыделяющих сборок (ТВС), а также соответствующие им упрощенные имитаторы твэльных пучков ТВС (БО отсутствовали).

С целью валидации расчетных методик, а также для определения коэффициентов обмена между хвостовиками макета с использованием средств вычислительной гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics) разработана расчетная модель гидравлического тракта течения модельного теплоносителя (воздуха) в макете. В качестве средства численного моделирования применялся CFD-код STAR-CCM+. Численная модель описывает близкое к изотермическому турбулентное течение сжимаемого воздуха в гидравлических трактах макета, и базируется на уравнениях Рейнольдса, дополненных уравнениями модели турбулентности « k - ϵ Realizable». Отклонение расчетных значений статического давления в 96-ти точках отбора статического давления в макете от экспериментальных показаний не превышает 7,2 % и составляет в среднем 1,4 %.

С использованием методики моделирования переноса пассивной примеси проведен расчет обмена расходами между хвостовиками в перераспределительной камере между опорной плитой и твэльной частью ТВС. Диффузионный перенос примеси не моделировался. Коэффициенты обмена между хвостовиками в перераспределительной камере напорного коллектора зависят как от конфигурации, так и от расположения хвостовиков. По результатам моделирования 58 % расхода, поступающего на вход хвостовиков БО, распределяется посредством перетечек через боковые проливные окна хвостовиков по ТВС ПЗ, 12 % – по ТВС ЦЗ, 31 % по ТВС с рабочими органами (РО) системы управления защитой (СУЗ). Порядка 4 % расхода, поступающего на вход хвостовиков ТВС ПЗ, распределяется по ТВС ЦЗ дальше по направлению потока во входной камере, 12 % – по рядом стоящим ТВС с РО СУЗ. Порядка 8 % расхода, поступающего на вход хвостовиков ТВС ЦЗ, распределяется по ТВС с РО СУЗ, причем направление перетока не зависит от направления течения во входной камере напорного коллектора. Перетоки между хвостовиками ТВС ЦЗ не превышает 0,2 %, распределение давления в поперечном направлении перераспределительной камеры в центральной зоне близко к изобарному.

Расход на входе хвостовиков ТВС с РО СУЗ в 6,2 раза меньше расхода на входе хвостовиков ТВС ЦЗ и ПЗ, поскольку их вход затеснен пеналом РО. На выходе из хвостовиков ТВС с РО СУЗ расход увеличивается в 4,1 раза за счет перетока модельного теплоносителя из других хвостовиков (для хвостовика ТВС с РО СУЗ рядом с ПЗ – на 20 % из хвостовиков БО, на 80 % из хвостовиков ТВС, для хвостовика ТВС с РО СУЗ во втором ряду от ПЗ – на 6 % из хвостовиков БО, на 94 % из хвостовиков ТВС).

**Выполнение претестовых расчетов и разработка
экспериментальной программы стенда ПСБ-ВВЭР
в рамках международного проекта АЯЭ ОЭСР «ETHARINUS»**

Латкин Д.Ю., Петкевич И.Г.

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

Ключевые слова: АЯЭ ОЭСР, ETHARINUS, ВВЭР, ПСБ-ВВЭР, несимметричная однофазная естественная циркуляция, потеря теплоотвода, расхолаживание реакторной установки, экспериментальная база данных, претестовое моделирование, КОРСАР/ТП, валидация расчетных кодов.

В 2020-м году стартовал международный проект «ETHARINUS», организованный под эгидой АЯЭ ОЭСР. В проекте запланирован большой объем экспериментальных работ на стендах PKL, RASTEL и ПСБ-ВВЭР. Результаты экспериментальных данных будут использованы при валидации расчетных кодов, применяемых для анализов безопасности реакторных установок типа ВВЭР. Российскую сторону в данном проекте представляют специалисты АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и АО «ЭНИЦ».

В ходе проекта планируется выполнение следующих экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР:

- 1) параметрическое исследование расходов в первом контуре РУ в условиях однофазной естественной циркуляции при разной отводимой мощности через парогенераторы;
- 2) постепенное закрытие всех отсечных клапанов на парогенераторах вплоть до полной потери теплоотвода от первого контура;
- 3) потеря теплоотвода от первого контура в холодном состоянии стенда;
- 4) расхолаживание стенда в условиях несимметричной естественной циркуляции (полной потери теплоотвода через один парогенератор) с разными скоростями расхолаживания – 15, 30, 60 °С/ч.

Наибольший интерес для Российской стороны представляет расширение экспериментальной базы данных в области явлений, связанных с несимметричной естественной циркуляцией. Ситуация с несимметричной циркуляцией характерна для проектных аварий в условиях обесточивания блока АЭС и отказов элементов систем. Несимметричная циркуляция возможна в результате нарушения отвода тепла через один из парогенераторов. Нарушение отвода тепла может быть связано с отказом подачи основной или аварийной питательной воды, ложным закрытием быстродействующего запорного отсечного клапана или другого отсечного элемента на паропроводе, отказом быстродействующей редуцирующей установки сброса пара в атмосферу при расхолаживании и прочими событиями.

В докладе представлены сценарии экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР, а также результаты претестового моделирования экспериментов 1, 2 и 4. Претестовые расчеты были выполнены в отечественном программном комплексе КОРСАР/ТП.

Расчетная оценка выхода радиолитического водорода из бассейна выдержки ЭГП-6 Билибинской АЭС при запроектной аварии

Казанцев А.А., Супотницкая О.В., Сергеев Вл.В., Астахова Н.Э.

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

Ключевые слова: Билибинская атомная электростанция (БиАЭС), Энергетический Гетерогенный Петлевой реактор с 6 петлями циркуляции теплоносителя (ЭГП-6), водородная взрывобезопасность, растворимость водорода в воде, запроектная авария (ЗПА), бассейн выдержки (БВ), отработанное ядерное топливо (ОЯТ), отработанная тепловыделяющая сборка (ОТВС), реакторная установка (РУ), испарение с зеркала бассейна.

В работе описана методика, предназначенная для расчета выхода радиолитического водорода из бассейна выдержки ОТВС при запроектных авариях Билибинской АЭС. Рассматривается ЗПА, начинающейся с исходного события – прекращения теплоотвода при отказе системы вентиляции и отказе систем электроснабжения.

Решение задачи тепломассопереноса в БВ с ОТВС выполняется в точечной модели. Процессы тепломассопереноса в БВ описываются системой, состоящей из трех уравнений. В качестве двух первых уравнений используется система обыкновенных уравнений сохранения массы и энергии воды в БВ. Для описания испарения пара с поверхности воды используем стандарт VDI-2089 взамен часто используемого подобия процессов тепло и массообмена.

В течение ЗПА при отказе систем электроснабжения подпитки БВ не происходит. Консервативно рассмотрим случай, когда течь воды из БВ отсутствует. Тогда уравнение сохранения массы жидкости в БВ запишется как:

$$\frac{dM_{H_2O}}{d\tau} = -G_{vap}(\tau), \quad (1)$$

где M_{H_2O} – масса воды в бассейне, кг; τ – время, с; $G_{vap}(\tau)$ – испарение пара с поверхности воды БВ, кг/с.

Уравнение сохранения энергии рассмотрено для ЗПА с учетом отсутствия подпитки и не работающего теплообменника. Пренебрежем тепловыми потерями к стенкам и тепловыми потерями конвекцией от поверхности воды БВ, по сравнению с теплотой испарения, получим:

$$M_{H_2O} C_p \frac{dT}{d\tau} = N_{ост}(\tau) - N_{vap}(\tau), \quad (2)$$

где C_p – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг К); T – средняя температура воды в бассейне, К; τ – время, с; $N_{ост}(\tau)$ – суммарная мощность остаточного тепловыделения всех ОТВС, Вт; $N_{vap}(\tau) = G_{vap}(\tau) \cdot r$ – мощность, потребляемая на испарение, Вт; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Уравнение сохранения массы водорода в газовом объеме бассейна выдержки в условиях обесточивания и отказа приточной системы вентиляции, когда вытяжная система обеспечивает естественный уход смеси в атмосферу за счет превышения давления над атмосферным записывается:

$$\frac{dM_{H_2}}{d\tau} = G_{\text{зеркало}}(\tau) + G_{\text{радиолиз}}(\tau) - G_{\text{вытяжка}}(\tau), \quad (3)$$

где $G_{\text{зеркало}}(\tau) = \frac{dM_{H_2}^{\text{вода}}(\tau)}{d\tau}$ – образование водорода при испарении воды за счет нагрева при уменьшении предела растворимости водорода в воде, кг/с; $G_{\text{радиолиз}}(\tau) = \frac{2}{3} \cdot Q_{\text{г.с.}}^{\text{ост}}(\tau) \cdot \rho_{H_2}$ – образование водорода в результате радиолиза воды БВ, кг/с; ρ_{H_2} – плотность водорода при нормальных условиях; $G_{\text{вытяжка}}(\tau)$ – уход водорода в атмосферу через вытяжную вентиляцию, кг/с.

Объёмный расход радиолитических газов, образующихся в водяном теплоносителе, приведенный к нормальным условиям, определяется по формуле:

$$Q_{\text{г.с.}}^{\text{ост}}(\tau) = 0,35 \cdot 10^{-5} \varepsilon \times N_{\text{ост}}(\tau) \left(0,44\varphi_f + 8 \frac{\rho_v}{\rho_f} \varphi_g \right), \quad (4)$$

где $Q_{\text{г.с.}}^{\text{ост}}$ – скорость выхода радиолитических газов (водорода и кислорода), $\text{н} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; $\varepsilon = 0,04$ – доля энергосодержания в теплоносителе за счет поглощенного γ -излучения; $0,35 \cdot 10^{-5}$ – размерный коэффициент, определяющий удельный выход радиолитических газов, $\text{нм}^3/(\text{с} \cdot \text{кВт})$; $N_{\text{ост}}(\tau)$ – суммарная тепловая мощность ОТВС в БВ, кВт; ρ_v, ρ_f – плотности пара и воды, соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; φ_f, φ_g – объемные доли жидкой и газовой фаз (для однофазной воды без кипения $\varphi_g = 0, \varphi_f = 1$).

Применительно к бассейну выдержки Билибинской АЭС для момента максимума мощности (11 лет после начала выгрузки ОТВС в БВ) выход водорода $G_{\text{радиолиз}}(\tau) = 0,0000036 \text{ н} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. На момент минимума мощности (48 лет после начала выгрузки ОТВС в БВ) выход водорода $G_{\text{радиолиз}}(\tau) = 0,00000061 \text{ н} \cdot \text{м}^3/\text{с}$.

Выход водорода с поверхности воды БВ с учетом зависимости предела растворимости водорода $g[T(\tau)]$ от температуры записывается как:

$$G_{\text{зеркало}}(\tau) = \frac{dM_{H_2}^{\text{вода}}(\tau)}{d\tau}.$$

Интенсивность испарения с 1 м^2 поверхности описывается международным стандартом VDI 2089: интенсивность испарения с поверхности обусловлена градиентом парциального давления между поверхностью воды и давлением пара в газовом объеме:

$$W = \varepsilon \cdot F_1 [P_{\text{sat}}(T) - P_{\text{part}}] \varepsilon \cdot F_1 [P_{\text{sat}}(T) - \varphi P_{\text{sat}}(T_{\text{air}})] \approx \varepsilon \cdot F_1 \cdot P_{\text{sat}}(T) (1 - \varphi), \quad (5)$$

где W – массовый расход испаряющейся воды, кг/с; F_1 – площадь поверхности воды БВ, м^2 ; ε – эмпирический коэффициент испарения, принят $\varepsilon = 13, \text{с}/\text{м}$; $P_{\text{sat}}(T)$ – давление насыщения пара при $T(\tau)$ температуре воды в БВ, Па; $P_{\text{part}} = \varphi P_{\text{sat}}(T_{\text{air}})$ – парциальное давление пара над поверхностью воды в БВ, Па; φ – относительная влажность воздуха.

До начала кипения суммарная тепловая мощность ОТВС полностью идет на испарение, поэтому скорость испарения воды в бассейне выдержки выглядит:

$$W \approx \varepsilon \cdot F_1 \cdot P_{\text{sat}}(T) (1 - \varphi) \leq W_{\text{max}}(\tau) = \frac{N_{\text{ост}}(\tau)}{r}. \quad (6)$$

На основании выполненных расчетных исследований получено, что для бассейна выдержки Билибинской АЭС имеется два режима выхода водорода в зависимости от суммарной тепловой мощности отработавших ТВС в бассейне выдержки.

Выход водорода в результате процесса радиолиза воды происходит постоянно до начала осушения БВ. Выход водорода за счет превышения предела растворимости газа в воде при нагреве происходит только на начальном режиме прогрева воды от начальной температуры до момента нагрева до 80 °C. Так как полная дегазация происходит только при закипании воды, небольшая часть водорода остается в воде. Дальше выделяется только радиолитический водород. Дополнительный водород на начальном этапе учитывается при обосновании водородной взрывобезопасности бассейна выдержки.

Для момента времени спустя 48 лет после начала заполнения БВ суммарная тепловая мощность всех ОТВС в БВ небольшая и охлаждения за счет испарения с поверхности бассейна выдержки достаточно. В этом случае единственным источником водорода является выход радиолитического водорода.

Сравнение расчетных программ RELAP5/Mod3.4 и КОРСАР (V3.038.002) на примере системы пассивного отвода тепла реакторной установки с ВВЭР-1000

Менюк Д.С.

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Севастополь,
d.menyuk@mail.ru

Ключевые слова: система пассивного отвода тепла, бассейн выдержки, двухфазный термосифон, теплогидравлическая программа RELAP5/Mod3.4, водо-водяной энергетический реактор, теплогидравлическая программа КОРСАР (V3.038.002).

Постановка задачи

Была поставлена задача: сравнить расчетные результаты, которые были получены с помощью программ КОРСАР (V3.038.002) и RELAP5 (Mod3.4). Помимо этого, при выявлении значительного разброса полученных результатов, необходимо было найти причину возникновения разбросов.

Моделируемая система

Данная система является моделью одного канала предлагаемой системы пассивного отвода тепла от реакторной установки с ВВЭР-1000, подключаемой непосредственно в патрубки ГЕ САОЗ первого контура.

Теплообменник с двухфазными термосифонами позволяет надежно изолировать первый контур от промконтура даже при условии появления течи в одном или нескольких ДТС. В данном случае дополнительным барьером защиты является замкнутый промконтур.

При проведении сравнительного моделирования были допущены следующие упрощения:

1. Были исключены элементы MJ-757 и P-757, то есть не была учтена рециркуляция в теплообменнике-испарителе по промконтуру, что позволило использовать только базовые возможности гидравлических кодов, которые были изначально заложены разработчиками.

2. Элементы первого контура полной модели РУ, использованной ранее для программы RELAP5, а именно элемент P-610 и связанные с ним, заменены граничными условиями для температуры на внешней стенке испарительного участка ДТС (элемент 700, тепловая структура HS1-740-0, внешняя граница по отношению к объёму ОДТС). Температура в начальный момент времени выбиралась из условия устойчивого старта того или иного кода (к чему сильно требовательна программа RELAP5). В дальнейшем, в интервале времени от 0 до 200 секунд, разность температур между первым контуром и конечным поглотителем устанавливалась равной $+170\text{ }^{\circ}\text{C}$ и после поддерживалась постоянной в течение всего времени расчёта до полной стабилизации всех параметров модели. Это условие было принято общим и идентичным в моделях для обеих расчётных программ.

3. Модель конечного поглотителя создавалась также с фиксированной температурой на внешней стенке. Для обоих кодов она была постоянно на протяжении всего расчёта и равнялась $+101\text{ }^{\circ}\text{C}$. Что соответствует кипению на поверхности теплообменного пучка при условии, что конечным поглотителем является емкость с водой, которая находится за пределами гермооболочки.

Все элементы сборки 700, то есть каждый ДТС, моделировался с разбиением по высоте на 16 элементарных расчетных объемов. 10 нижних объемов представляют собой

испарительный участок, общая длина которого составляет 1,50 м. Объем 11 является транспортным участком с длиной, равной 0,20 м. Объемы с 12 по 16 – конденсационный участок, который состоит из 5 объемов, которые равны между собой по длине. Суммарная длина элементарных объемов конденсационного участка равна 1,0 м.

Далее, с целью проведения анализа чувствительности, в моделях для обоих кодов конденсационный участок был поделен на 10 расчетных объемов вместо 5, с высотой 0,10 м вместо 0,20. Такому же изменению подвергся элемент 750 и структура HS1-740-1. Внесенные изменения не привели к хоть какому-то значимому изменению результатов.

ДТС представляет собой трубку внутренним диаметром 0,02 м с толщиной стенки 5 мм. ДТС собраны в вертикальный трубный пучок, количество ДТС в нём принято равным 1519. Отношение шага между осями соседних трубок к внешнему диаметру трубки равно 1,34.

Результаты расчётов

Результаты расчетов показали существенные различия в скоростях фаз теплоносителя и давления в элементе 700 на участке конденсации.

Выводы

Основное отличие наблюдается в значениях давления и, соответственно, температуре насыщения внутри самих ДТС. Это отличие обусловлено тем, что коды имеют существенные отличия в алгоритме расчета скоростей противотока фаз и, как следствие, коэффициента теплопередачи от двухфазной среды к внутренней стенке ДТС в процессе конденсации. Величина различия составляет приблизительно один порядок, при этом Relap5 предсказывает более высокие коэффициенты теплоотдачи, нежели КОРСАР: $\sim 10^4$ и $\sim 10^3$ Вт/(м²·К) соответственно.

При этом, результаты расчета параметров промконтура оказываются близкими при расчёте обеими программами. Так, давление пароводяной смеси в промконтуре составляет ~ 2 – $2,5$ бар, расход теплоносителя при естественной циркуляции в промконтуре ~ 20 кг/с. Хорошо согласуются между собой и величины отводимой мощности. Это объясняется тем, что более низкие коэффициенты теплоотдачи внутри ДТС на его конденсационном участке компенсируются большей разнице температур между двухфазной средой в ДТС и температурой теплоносителя в промконтуре.

Существенных различий в расчётных значениях прочих параметров, характерных для процессов тепломассопереноса в моделируемом контуре, не было выявлено.

Таким образом, весьма актуальной становится задача непосредственного экспериментального определения режимов течения двухфазного теплоносителя и коэффициентов теплоотдачи от пароводяной смеси к стенкам сосуда при конденсации в ДТС с отношением $L/D \gg 1$ при геометрических размерах и в той области теплофизических параметров внутри ОДТС, которые были характерны для выполненного расчётного моделирования.

Восстановление полей внутри активной зоны реакторных установок по показаниям надзонных датчиков

Болнов В.А., Богданова Е.В., Малкин С.А., Ушатиков А.С., Емелина А.С.

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

Ключевые слова: реакторная установка, безопасность эксплуатации РУ, активная зона, органы СУЗ, возмущение нейтронного поля, интерполяция, режимы НЭ и ННЭ, надзонные датчики, реактивность, методика обработки сигналов датчиков.

Необходимость повышения безопасности является одной из приоритетных задач при проектировании новых и эксплуатации действующих реакторных установок. Современные средства контроля параметров, в силу особенности конструкции, позволяют получить достаточно ограниченные данные о динамических процессах внутри активной зоны. Восстановление температурного поля и поля энерговыделений внутри активной зоны по имеющимся показаниям ионизационных камер и надзонных термопар позволит повысить безопасность эксплуатации реакторной установки, особенно в режимах, связанных с перемещением органов воздействия на реактивность.

В рамках данного исследования был проведен расчётный анализ режимов НЭ и ННЭ, связанных с перемещением органов СУЗ, на основе которого была сформирована и проанализирована база данных сигналов датчиков, включающая в себя:

- данные по возмущениям нейтронного поля при перемещении стержней СУЗ;
- данные по уровням нейтронного излучения на ИК (ионизационные камеры);
- данные по показаниям надзонных термопар.

С помощью полученных результатов был проведен анализ влияния деформации распределения плотности нейтронного потока под ИК на контроль мощности, который показал, что отклонения параметров установки находятся в пределах погрешности их измерения. Также проводился анализ возможности восстановления полей энерговыделения по показаниям надзонных термопар в режимах НЭ и ННЭ, связанных с перемещением органов СУЗ, показавший принципиальную возможность восстановления полей с определенной точностью.

На основе полученных в ходе анализа данных, была разработана и опробирована методика восстановления поля тепловыделений в активной зоне реакторной установки типа БН, основанная на численной интерполяции с применением тонкоплечного сплайна, базирующая на показаниях надзонных термопар, обработанных при помощи нескольких последовательных дифференциальных звеньев. Разработанная методика была верифицирована на экспериментальных данных режимов срабатывания предупредительной защиты на реакторных установках БН-600 и БН-800. Результаты анализа и верификации показали, что разработанная методика позволяет восстановить характер относительного изменения поля энерговыделений в активной зоне и обеспечить контролируемое состояние активной зоны.

Результаты валидации моделей, разработанных на базе программы BURAN

Болнов В.А., Богданова Е.В., Малкин С.А.

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

Ключевые слова: валидация, программа, BURAN, реакторные установки, БН, эксперимент, динамика, температура, топливо, отклонения, результаты.

Программа BURAN используется для расчета нормальных и аварийных динамических режимов широкого класса реакторных установок типа БН (БН-600, БН-800, БОР-60, БН-350, БН-1200) с системой аварийного расхолаживания через воздушные теплообменники.

В 2011 г. программа BURAN была верифицирована и аттестована. В 2021 г. связи с окончанием срока действия аттестационного паспорта и расширением области применения потребовалась перееаттестация программы.

Наибольшая представительность валидации модели программного средства достигается при расчете переходных процессов натурального объекта, для которого оно предназначено (при наличии достаточного количества экспериментальных режимов и соответствующем оснащении измерительными средствами по перечню регистрируемых параметров и точности измерений). Поэтому для валидации модернизированной версии программы BURAN использовалась вся доступная информация о поведении параметров в различных режимах на работающих установках БН-600 и БН-800. По результатам сопоставления расчетных и экспериментальных данных, при необходимости, вносились соответствующие корректировки в методику расчетов.

Для валидации модели программы BURAN по результатам теплогидравлических процессов в установке БН-600 были выбраны следующие режимы:

- останов энергоблока в результате срабатывания БАЗ по факту отключения двух из трех ТГ при мощности реактора 95 % $N_{ном}$;
- комплексное опробование САРХ-ВТО;
- отвод остаточных тепловыделений за счет тепловых потерь с корпуса реактора и со второго контура при отсутствии циркуляции в третьем контуре.

Выполненные валидационные расчеты показали, что в области применения программа BURAN с достаточными для инженерных расчетов точностью описывает изменения критериальных параметров (температуры натрия в первом и втором контурах, температур топлива и оболочки ТВЭЛ), принятых для РУ БН.

Показана возможность использования программы BURAN для расчета переходных процессов в установках с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем в режимах нормальной эксплуатации, в режимах с нарушением нормальной эксплуатации, требующих экстренного перевода установки на пониженные уровни мощности, при обосновании безопасности в режимах длительного расхолаживания за счет потерь тепла с корпуса реактора, с оборудования и трубопроводов второго контура, связанных с полным отказом систем принудительного отвода тепла.

Расчетное исследование теплогидравлических характеристик ядерного реактора на быстрых нейтронах, охлаждаемого CO₂

Семишин В.В., Кавун О.Ю.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет МГТУ им. Н.Э. Баумана), Москва,
kavun@secnrs.ru*

Ключевые слова: газоохлаждаемый реактор, углекислый газ, пассивный отвод тепла, модель энергоблока, ТРП, теплогидравлическая модель.

В данной работе исследуется возможность создания ядерного реактора повышенной безопасности на быстрых нейтронах, охлаждаемого углекислым газом при пониженном давлении в первом контуре. В качестве турбоустановки предполагается использование турбины на закритических параметрах К-800-240.

Основным требованием, поставленным при разработке концепции данного реактора, была возможность пассивного отвода тепла от активной зоны атмосферным воздухом при разгерметизации первого контура и потере теплоносителя. Для проведения расчетных исследований была разработана теплогидравлическая модель на основе программ ТРП, Десна и МВТУ. Данная модель позволяет проводить динамические связанные нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты с учетом ввода в работу или отказов различных элементов оборудования.

После проведения вариантных расчетов для определения допустимых компоновок теплообменного оборудования, для обеспечения затрат мощности на прокачку теплоносителя был выполнен анализ аварийных режимов с полной потерей электроснабжения. Расчеты проводились как с углекислым газом в первом контуре, так и с атмосферным воздухом. Проведенные расчеты показали, что выбранная компоновка позволяет осуществлять отвод тепла от активной зоны через воздушные теплообменники в режиме естественной циркуляции теплоносителя первого контура в течение длительного времени. В данный момент ведутся работы по разработке модели с трехмерной нейтронно-физической моделью активной зоны и полноценной моделью турбины для анализа поведения реакторной установки в различных динамических режимах с учетом работы турбоустановки.

О подходах к проведению натурных тепловых испытаний для обоснования безопасности ТУК с ОЯТ

Курындин А.В., Киркин А.М., Каримов А.З., Карякин М.Ю.

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

Ключевые слова: тепловые испытания, тепловой расчет, обоснование безопасности, погрешность, неопределенность, моделирование, ANSYS, ТУК, ОТВС.

В настоящее время в Российской Федерации обновляется парк транспортных упаковочных комплектов (далее – ТУК), применяемых для осуществления межобъектовых перевозок отработавшего ядерного топлива (далее – ОЯТ) реакторных установок различных типов. ТУК нового поколения разрабатываются с учетом повышенных требований по вместимости, что позволяет осуществлять перевозку ОТВС с большими глубинами выгорания и малым временем выдержки. При этом конструкция ТУК нового поколения усложняется, а температурные режимы конструктивных элементов таких ТУК вплотную приближаются к ограничениям, установленным нормативной и эксплуатационной документацией.

В этой связи при разработке ТУК как технически сложных изделий особое внимание следует уделять анализу погрешности получаемых результатов, обусловленной неопределенностью исходных данных и применяемых расчетных методик, при этом в большинстве случаев такой анализ возможен только при проведении комплексных расчетно-экспериментальных исследований.

В настоящем докладе представлен опыт ФБУ «НТЦ ЯРБ» в области планирования и методического сопровождения натурных тепловых испытаний, проведенных при разработке ТУК с целью всестороннего обоснования безопасности.

Расчётный анализ аварии с блокировкой проходного сечения ТВС РУ БН

Анфимов А.М., Кирилов И.Н.

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

Ключевые слова: анализ безопасности, реакторная установка (РУ), натрий, авария с блокировкой проходного сечения, реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН), тепловыделяющая сборка (ТВС), кипение натрия, плавление топлива.

Необходимость анализа аварий с блокировкой проходного сечения для реакторов типа БН обуславливается требованиями НП-18-05 «Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности атомных станций с реакторами на быстрых нейтронах».

В условиях перекрытия проходного сечения одной ТВС в ней может реализовываться кипение натриевого теплоносителя, плавление оболочек и топлива твэл, чехла ТВС, а также распространение масштаба плавления на соседние ТВС, граничащие с аварийной сборкой.

Идентификация рассматриваемой аварии осуществляется по показаниям специальной системы контроля герметичности оболочек твэл. В случае успешной идентификации аварии происходит останов реактора, путем ввода стержней аварийной защиты, с последующим расхолаживаем в штатном режиме через третий контур РУ.

Расчетный анализ основных процессов в условиях аварии с полной блокировкой проходного сечения одной ТВС выполнялся с использованием аттестованного кода СОКРАТ-БН.

Нодализация схема РУ БН, используемая для выполнения расчетов, включает в себя первый и второй контуры, контуры системы аварийного расхолаживания, а также третий контур в границах парогенератора.

Для анализа аварии с блокировкой проходного сечения дополнительно была разработана детализированная расчетная модель, предназначенная для моделирования 19 ТВС а.з. (1 блокируемая ТВС, 6 ТВС соседнего ряда, 12 ТВС 2-го соседнего ряда), позволяющая в консервативных предпосылках моделировать процессы кипения натрия, плавления оболочек твэл и топлива, чехлов ТВС, перемещения расплава на соседние ТВС.

В докладе представлены основные результаты расчета аварии с блокировкой проходного сечения одной ТВС РУ БН, оценены времена реализации различных стадий аварийного процесса и масштаб повреждения а.з.

Анализ теплоотводной аварии РУ БН и мер по её управлению

Анфимов А.М., Кузнецов Д.В.

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

Ключевые слова: анализ безопасности, реакторная установка (РУ), натрий, теплоотводная авария, реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН), система аварийного расхолаживания (САРХ), пассивная аварийная защита с гидравлическим принципом срабатывания (ПАЗ-Г).

В докладе представлены результаты расчетных исследований теплоотводной аварии трехконтурной и трехпетлевой РУ типа БН с интегральной компоновкой первого контура с учетом реализации различных мер по управлению. Успешность организации мер по управлению аварией рассмотрена с точки зрения выполнения основных функций безопасности: перевод реактора в подкритическое состояние, обеспечение охлаждения активной зоны, ограничение радиоактивных выбросов в окружающую среду.

Для анализа протекания аварийного режима выбраны характеристики РУ БН, близкие к энергетическим установкам средней мощности. С целью выявления оптимальных сочетаний организационно-технических мер по управлению теплоотводной аварией проведен анализ различных сценариев ее протекания: (1) теплоотводная авария с отказами активных средств воздействия на реактивность и автоматического подключения САРХ; (2) теплоотводная авария с отказами автоматического подключения САРХ и автоматического срабатывания аварийной защиты.

Расчетный анализ реализации различных мер по управлению аварией проводился с использованием программного средства СОКРАТ-БН, который аттестован для подобных расчетов.

Результаты исследований теплоотводной аварии с учетом реализации различных мер по ее управлению показали:

1) срабатывание ПАЗ-Г ограничивает масштаб повреждения активной зоны разгерметизацией оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ). Для снижения количества разгерметизировавшихся ТВЭЛ необходимо увеличить эффективность стержней ПАЗ-Г либо повысить скорость их ввода в активную зону реактора;

2) при отсутствии автоматического подключения САРХ персонал имеет возможность поочередного запуска петель САРХ вручную. В данном случае отвод остаточных тепловыделений обеспечивается за счет естественной циркуляции (ЕЦ) по первому контуру и контурам всех трех петель САРХ.

Расчётные исследования расхолаживания реактора в аварии с разрывом циркуляции первого контура РУ БН

Анфимов А.М., Тимин Д.А.

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

Ключевые слова: анализ безопасности, натрий, расчетные исследования, энергоблок, быстрый натриевый (БН), реакторная установка (РУ), система аварийного расхолаживания (САРХ), воздушный теплообменник (ВТО), активная зона, промежуточный теплообменник (ПТО), тепловыделяющая сборка (ТВС), разрыв циркуляции.

В докладе представлен расчётный анализ поведения 3-х контурной, 3-х петлевой РУ типа БН с интегральной компоновкой первого контура и характеристиками, близкими к энергетическим установкам средней мощности, в условиях разрыва циркуляции первого контура. Разрыв циркуляции может реализоваться в результате истечения натрия первого контура из реактора, приводящего к снижению уровня натрия ниже входных окон ПТО. Прекращение принудительного расхода через ПТО приводит к резкому снижению теплоотвода от реактора, в результате чего может происходить его разогрев.

Анализ динамики разогрева и последующего расхолаживания реактора в условиях разрыва циркуляции натрия первого контура является предметом рассмотрения в рамках данной работы. Расчёты были выполнены для нескольких вариантов состава функционирующего оборудования (расхолаживание через парогенераторы, через 3 петли САРХ).

Моделирование поведения РУ БН в условиях аварии с разрывом циркуляции натрия первого контура проводилось с использованием аттестованного кода СОКРАТ-БН.

Для выполнения расчётного исследования использовалась нодализационная схема РУ БН, которая включает в себя первый и второй контуры, контуры системы аварийного расхолаживания и третий контур в границах парогенератора.

В состав расчётной схемы первого контура входят основные и вспомогательные трассы циркуляции теплоносителя, газовая полость реактора, трубопроводы перелива и газовой компенсации, сосуд-компенсатор.

Расчётная схема, первого контура позволяет моделировать образование локальной естественной циркуляции в реакторе, в условиях разрыва проектной схемы циркуляции теплоносителя. За счёт естественной циркуляции может осуществляться отвод тепла от ТВС активной зоны через поверхность корпуса ПТО к трубчатке теплообменника с циркулирующим в ней натрием второго контура.

В результате выполнения расчётов получены данные об изменении основных теплогидравлических параметров РУ БН при аварии с разрывом циркуляции натрия первого контура. На основе выполненных расчётов проведён анализ состава функционирующего оборудования, необходимого для обеспечения устойчивого расхолаживания РУ.

Преобразования при структурном описании математических моделей систем ядерных энергоустановок

Тимофеев К.А., Антоненко А.С., Петухов В.Н.

*ООО «ЗВ Сервис», Москва,
v.petukhov@zv-services.com*

Ключевые слова: комплексное моделирование, ЯЭУ, САУ, электрические сети, теплогидравлика, узловой граф, САДР, ТРР, HS, SimInTech.

Современный подход к проектированию сложных технических объектов, таких как ядерные энергоустановки требует широкого применения методов расчетного моделирования, в том числе моделирования динамического поведения систем во времени с целью создания адекватных алгоритмов управления. Для быстрого создания и редактирования математических моделей следует использовать наглядное представление модели в виде графа, направленного в случае моделей алгоритмов управления и ненаправленного, в случае моделей теплогидравлических процессов в контурах и системах охлаждения.

При моделировании динамики систем ядерных энергоустановок возникает необходимость их структурного описания в виде направленного или ненаправленного графа. Описание систем различных классов может сводиться к направленному входу-выходному графу или к узловому графу, где в узлах постулируются уравнения сохранения.

В статье рассмотрен метод преобразования ненаправленного графа модели к направленному и связанные с этим доработки в алгоритме поиска связей и сортировки графа при автоматическом составлении систем дифференциально алгебраических уравнений.

Рассмотренный в статье метод позволяет автоматизировать составление систем уравнений при составлении комплексной модели, включающей в себя математические модели систем ядерных энергоустановок различной физической природы.

Продемонстрировано применение метода на примере комплексной компьютерной модели энергоблока с реактором со свинцовым теплоносителем.

Валидация программы ТЕМПА-СК на основе экспериментальных данных для пучков стержней, охлаждаемых средами при сверхкритических давлениях

Баисов А.М.^{1, 2}, Чуркин А.Н.²

1 – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва;

2 – Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), Подольск, baisov75@gmail.com, Baisov_AM@grpress.podolsk.ru

Ключевые слова: сверхкритические давления, коэффициент теплоотдачи, корреляции, по-ячаячный код, пучки стержней.

В докладе представлены результаты сравнения расчетов по программе ТЕМПА-СК с экспериментальными данными по продольному и азимутальному распределению температуры оболочек твэлов в пучках стержней, охлаждаемых различными средами при сверхкритическом давлении. С целью расширения области применения программы ТЕМПА-СК была проведена ее модернизация, позволившая выполнять расчеты не только для сверхкритической воды, но и для диоксида углерода и фреона R-134a. Для ускорения процесса счета тепловыделяющих сборок с большим количеством контрольных объемов вместо непосредственного обращения к программным библиотекам свойств были подготовлены и использованы таблицы необходимых теплофизических свойств различных жидкостей. Результаты расчетов в целом показали хорошее совпадение с экспериментальными данными и также с результатами расчетов по кодам ASSERT-PV и COBRA-SC. Выявленная повышенная азимутальная неравномерность температуры оболочек твэлов может быть связана с отсутствием учета в ТЕМПА-СК азимутальной теплопроводности в твэлах, а также отсутствием разработанной и проверенной для сверхкритической жидкости методики учета турбулентного переноса массы и энергии в поперечном направлении.

Численное моделирование радиационного разогрева конструкционных элементов гамма-установки

Картанов С.А., Плужан К.Г., Шарафетдинова К.В., Щербакова К.А.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный ядерный центр
– Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», Саров,
otd4@expd.vniief.ru

Ключевые слова: активность источника, воздействие высоких температур, гамма-излучение, закрытый радионуклидный источник, ионизирующее излучение, интенсивность излучения, радиационный разогрев, максимальная рабочая температура, мощность экспозиционной дозы, электронная компонентная база, энерговыделение.

Для обеспечения проведения испытаний электронной компонентной базы (ЭКБ) на стойкость к воздействию ионизирующего излучения в ФГУП «РФЯЦ - ВНИИЭФ» ведутся работы по созданию синхротронного комплекса. Одной из установок синхротронного комплекса является гамма-установка (ГУ) на основе закрытого радионуклидного источника (ЗРИ) ^{60}Co . Разрабатываемая ГУ является уникальной с точки зрения обеспечения высокой мощности экспозиционной дозы ионизирующего излучения и позволяет проводить, в том числе, испытания нескольких образцов ЭКБ одновременно, тем самым снижая себестоимость проведения испытаний.

Данная установка разрабатывается в двух конструктивных исполнениях:

- средняя интенсивность гамма-излучения с мощностью дозы (10-300) Р/с;
- низкая интенсивность гамма-излучения с мощностью дозы (0,01-10) Р/с.
- Разрабатываемая ГУ будет использоваться для выполнения работ в рамках реализации следующих направлений:
 - оценка стойкости ЭКБ к воздействию радиации на всех этапах разработки;
 - подтверждение (оценка) соответствия ЭКБ и материалов заданным требованиям стойкости к воздействию радиации;
 - контроль стойкости ЭКБ на этапах жизненного цикла (производства, поставки и эксплуатации).

Поскольку источники ионизирующего излучения, входящие в состав ГУ средней интенсивности, имеют активность ≈ 10 кКи, её составные узлы подвергаются воздействию высоких температур, связанных с поглощением γ -излучения в элементах конструкции. В связи с этим, при разработке конструкции кассеты ГУ, необходимо определить максимально достижимую температуру элементов.

В данной работе представлены результаты расчетного определения температуры узлов конструкции ГУ в условиях радиационного разогрева. На основе расчетных данных о величине энерговыделения в составных узлах ГУ определена температура элементов в процессе эксплуатации установки. Результаты проведенных исследований позволили обосновать конструктивные решения, принятые в процессе разработки технического проекта на ГУ.

Исследование чувствительности результатов расчетов охлаждения ОТВС в приреакторных бассейнах выдержки к параметрам дискретизации расчетных моделей кода КОРСАР/ГП

Акименкова Е.Ю., Гагулин П.С., Бедретдинов М.М., Степанов О.Е.

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

Ключевые слова: атомная электрическая станция, бассейн выдержки, водо-водяной энергетический реактор, отработанное ядерное топливо, тепловыделяющая сборка.

ОЯТ продолжает выделять остаточное тепло еще на протяжении многих лет после извлечения из реактора, в связи с чем, его располагают в БВ для длительного отвода остаточных тепловыделений.

Для обоснования безопасности хранения ОЯТ в БВ в режимах нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, проектных аварий, а также разработки противоаварийных инструкций по действию персонала в случае проектных аварий и по управлению запроектными авариями используются теплогидравлические компьютерные коды. Согласно действующим нормативным документам РФ коды, используемые при обосновании безопасности АЭС, должны быть установленным образом верифицированы (валидированы) и аттестованы Ростехнадзором.

Базовая теплогидравлическая модель построена с учётом опыта эксплуатации программного комплекса КОРСАР/ГП и на основе отработанных решений по построению в нём расчётных схем для БВ с реакторными установками типа ВВЭР-1000. В данной модели могут меняться исходные данные, например, по мощности остаточных тепловыделений и загрузки БВ отработавшими ТВС, характеристик системы охлаждения и подпитки (в том числе температура и расход теплоносителя на входе в БВ) и прочим параметрам по требованию пользователя.

Под базовой теплогидравлической моделью понимается унифицированная расчётная модель, на основе которой производятся все теплогидравлические расчёты нестационарных процессов в обоснование безопасности охлаждения отработавшего топлива в БВ и при запуске ОТВС в режиме перегрузки.

Методика нестационарных теплогидравлических процессов в коде КОРСАР/ГП основана на полностью неравновесной (термически и механически) двухжидкостной модели в одномерном приближении. При конечно-разностной аппроксимации уравнений сохранения используется метод контрольных объемов и полуневная численная схема по времени с автоматическим выбором шага интегрирования по условию заданной точности расчетов. Пространственная сетка расчетной модели, а также максимальный шаг интегрирования по времени задаются пользователем в исходных данных.

Данные переменные определяются и оптимизируются пользователем на основе анализа чувствительности вариантных расчетов. Варьировалось количество ячеек в каналах и тепловых структурах по греющей части ТВС, количество ячеек в каналах и тепловых структурах от верха ТВС до пола реакторного зала и максимальный шаг по времени.

В результате оценивалась чувствительность изменения указанных параметров к расчету времен наступления ключевых моментов аварии: время начала кипения, начало оголения ТВЭЛ (роста температуры), время достижения 1200 °С.

Результатами исследования чувствительности определены оптимальные параметры пространственной дискретизации с минимальным влиянием на результаты расчета как по топливной высоте ТВС, так и в пространстве над ТВС.

Показано, что изменение максимального шага интегрирования по времени в пределах 0,01–0,1 с почти не оказывает влияние на результаты, но для устойчивого расчета рекомендуется использовать значение не более 0,03 с.

Термодинамические данные для расчета высокотемпературного водородного показателя pH_T водного теплоносителя реакторных установок сверхкритических параметров

Харитонов Н.Л., Гурбанова Ш.А.

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

Ключевые слова: реакторные установки сверхкритических параметров, безопасность, водный теплоноситель, ВВЭР-СКД, высокотемпературный водородный показатель, ионное производство воды, водно-химический режим, концентрация, экспериментальные данные, электролитическая диссоциация воды, физико-химические свойства водного теплоносителя.

В условиях водного теплоносителя реакторов сверхкритических значений температуры и давления целостность физических барьеров (оболочек тепловыделяющих элементов и границ контура теплоносителя реактора) во многом зависит от возможности разработать и поддерживать водно-химические условия, которые будут обеспечивать коррозионную стойкость конструкционных материалов оборудования и трубопроводов в течение всего срока эксплуатации блока. Особенно сложной задачей является подавление коррозионных и коррозионно-эрозионных процессов, а также минимизация образования отложений на поверхности оборудования, работающего в области околокритических и сверхкритических параметров.

В работе показано, что прямое измерение химических параметров в условиях сверхкритических значений температуры и давления и при воздействии радиационного излучения затруднено, и наиболее перспективным подходом представляется сочетание теоретических расчетов, химических моделей и экспериментальных работ. Поэтому, согласно рекомендациям МАГАТЭ, целесообразно выполнить разработку расчетных кодов для моделирования физико-химических процессов взаимодействия теплоносителя с конструкционными материалами для условий сверхкритических параметров по давлению и температуре. Основной проблемой при этом является отсутствие воспроизводимых термохимических и кинетических данных, необходимых для моделирования большинства физико-химических процессов. Выполненные оценки показывают, что наиболее проблемной областью является область в околокритических и сверхкритических условиях, которая характеризуется резким приращением энтальпии теплоносителя вблизи температуры, отвечающей максимальному значению теплоемкости, где свойства H_2O резко изменяются, а эффекты сжимаемости H_2O , как растворителя оказывают огромное влияние на сольватацию.

Ионное производство воды, определяющее равновесие между водородными и гидроксильными ионами, является эталонным свойством в химии водных растворов и в том числе, фундаментальной константой для расчета водородного показателя теплоносителя – pH , относящегося к важнейшим интегральным показателям коррозионной агрессивности, как самой воды, так и водных растворов. Отмечено, что следует учитывать водородный показатель при рабочих, то есть высоких температурах (pH_T), а не при комнатной температуре (pH_{25}).

В работе рассмотрены основные корреляционные зависимости для расчета ионного произведения воды – $K_{w,m}$ в зависимости от температуры и давления (плотности), в которых $K_{w,m}$ представляет собой безразмерную величину при единичной моляльности воды (для условий стандартного состояния в моляльной шкале, $m_0 = 1$ мол кг^{-1}).

Основной задачей настоящего исследования являлось:

- анализ и сравнение трех корреляционных уравнений для расчета $K_{w,m}$ в зависимости от температуры и плотностей в диапазоне температур от 523 К до 773 К и давлений от 5,75 МПа до 31,15 МПа;

- количественная оценка различий в значениях $pK_{w,m}$ ($pK_{w,m} \equiv -\log_{10}(K_{w,m})$), рассчитанных с помощью аналитических корреляций Маршалла – Франка (рекомендации Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (МАСВП), 1981 г.) и Бандуры – Львова (МАСВП, 2006 г.);

- анализ новых экспериментальных данных, полученных Тримейном – Арцисом (2020 г.) на основе прямых прецизионных измерений электропроводимости воды высокой степени чистоты, выполненных в университетах Гвельфа, Делавер и Окриджской Национальной Лаборатории, показывающих недостатки указанных выше корреляционных зависимостей, которые МАСВП запланировано положить в основу нового параметрического уравнения расчета $pK_{w,m}$;

- количественная оценка влияния величины $K_{w,m}$, рассчитанной по перечисленным выше формулам, на значения высокотемпературного показателя – pH_T в точке нейтральности воды в около критической области и при сверхкритических параметрах – в диапазоне температур до 500 °С при давлении 25 МПа;

- разработка рекомендаций по дополнительным оценкам, необходимым для перехода на новую корреляцию для $K_{w(m)}$ при выполнении модельных расчетов высокотемпературного водородного показателя – pH_T , являющегося ключевым параметром, определяющим интенсивность коррозионных процессов конструкционных материалов.

По результатам выполненного расчетного анализа показано, что в диапазоне температур ниже 623 К (350 °С) рассмотренные корреляционные зависимости для расчета ионного произведения воды – $K_{w,m}$ согласуются между собой с достаточной точностью – ниже 598 К (325 °С) расхождение расчетных значений $pK_{w,m}$ полученных с помощью корреляционных уравнений Маршалла – Франка (МАСВП, 1981 г.), Бандуры – Львова (МАСВП, 2006 г.) и новыми прецизионными данными Тримейна – Арциса (2020 г.), не превышает 0,1 единицы pK , а в диапазоне температур 598 К (325 °С) – 623 К (350 °С) расхождение не превышает 0,2 единицы pK .

В области температур выше 623 К (350 °С) при давлении 25 МПа значения ионного произведения воды – $K_{w(m)}$, рассчитанные с помощью зависимостей Маршалла – Франка (МАСВП, 1981 г.) и Бандуры – Львова (МАСВП, 2006 г.), показывают систематические отклонения от новых результатов Тримейна – Арциса (2020 г.), достигающих, соответственно, двух и пяти порядков вблизи критической точки воды.

Выполненный анализ корреляционных уравнений для расчета ионного произведения воды проиллюстрирован результатами количественной оценки влияния принятого значения $K_{w(m)}$, на pH_T в точке нейтральности воды в области критической точки и при сверхкритических параметрах.

В результате выполненных в данной работе расчетов получено, что использование корреляционных зависимостей Бандуры – Львова (МАСВП, 2006 г.) приведет к уменьшению расчетного pH_T в точке нейтральности воды, начиная с температур выше 548 К (275 °С) по сравнению с формулой Маршалла – Франка (МАСВП, 1981 г.) при 25 МПа.

Расчетные значения pH_T в точке нейтральности воды при температурах выше 623 К (350 °С) при давлении 25 МПа, полученные с использованием уточненных данных Три-

мейна – Арциса (2020 г.) будут на 1–2 единицы pH ниже, чем при использовании корреляций Бандуры – Львова (МАСВП, 2006 г.) и Маршалла – Франка (МАСВП, 1981 г.), соответственно.

Отмечена сложность согласования термодинамических данных путем расчета химических равновесий в сложных многокомпонентных системах и многофазных системах. Сделан вывод о необходимости тщательной экспертной оценки данных в процедуре согласования (разработка принципов и методов обобщения и взаимного согласования термодинамических характеристик), а также получения новых надежных данных с охарактеризованной точностью по физико-химическим свойствам (как ответ на новые практические задачи).

Применение CFD подхода для моделирования теплогидравлических процессов в упаковочном контейнере ТУК-13

Пугачёв М.А., Олексюк Д.А., Захаров Р.М., Оскирко В.А.

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

Ключевые слова: транспортный упаковочный контейнер, теплообмен, CFD, отработавшее ядерное топливо, сухое хранение, валидация, STAR-CCM+, гидродинамика, численное моделирование, тестовые расчеты.

За последние десятилетия в связи с продолжительным развитием технических возможностей компьютеров и ростом мощностей вычислительных узлов более частое применение в области атомной энергетики находит так называемый CFD подход, использующий более реалистичную методику в сравнении с одномерными кодами в задачах гидродинамического моделирования. Несомненным преимуществом данной технологии является удешевление процесса проектирования и модернизации существующих элементов производства без проведения дополнительных дорогостоящих эмпирических исследований. Не стоит забывать, однако, что использование CFD приложений с неправильно реализуемой методикой может послужить источником получения неадекватной картины моделируемых теплофизических явлений. Фундаментом любых научных изысканий с применением моделирования является процесс валидации, являющийся, в общем смысле слова, средством оценки точности и надежности компьютерного моделирования.

Транспортировка отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) российских серийных реакторов ВВЭР-1000 осуществляется в специальных контейнерах двойного назначения ТУК-13/1В. Защитная упаковка, общей вместимостью 12 ОТВС, представляет собой толстостенный цилиндрический сосуд, выполненный из кованной стальной обечайки и днища, сваренных между собой, и герметично закрываемый массивной крышкой.

В текущей работе рассматриваются итоги предварительного расчета теплового состояния ТУК-13 в условиях нормальной эксплуатации, и проводится первичный сравнительный анализ результатов разработанной физической модели на основе экспериментальной базы производителя упаковки. Для оценки теплового режима контейнера был выбран коммерческий пакет STAR-CCM+, широко используемый для лицензирования контейнеров с отработавшим ядерным топливом за рубежом.

Гидродинамический расчет распределения плотности воздушно-водяной смеси по элементам затопленного чехла транспортного в ходе слива воды

Оскирко В.А., Олексюк Д.А., Захаров Р.М., Пугачёв М.А., Вертиков Е.А.

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

Ключевые слова: CFD, чехол транспортный, STAR-CCM+, 3D-модель, распределение плотности, слив воды, авария, критерий ядерной безопасности, гидродинамика, численное моделирование.

При заливе или сливе объектов хранения и перевозки топлива возможны ситуации, при которых возникает разность уровней теплоносителя внутри и снаружи чехла с ядерным топливом, которая приводит к существенному уменьшению поглощения и росту обмена нейтронов между ТВС. Эти процессы приводят к росту $K_{эфф}$. Детальный анализ процессов слива/залива чехла свежего топлива с помощью современных CFD-кодов (Computational Fluid Dynamics) является новым шагом при обосновании ядерной безопасности.

Чехол транспортный предназначен для хранения свежих ТВС в ХСТ и для транспортирования ТВС из ХСТ в контейнерный отсек бассейна выдержки реакторного отделения. Он является важной частью большого механизма по транспортировке ядерного топлива в активную зону. На сегодняшний день данный ЧТ используется на АЭС-2006 и планируется на ВВЭР-ТОИ, и именно поэтому необходимо исследование безопасности данной конструкции.

В работе описана методика гидродинамического расчета с помощью CFD-кода STAR-CCM+. В процессе работы созданы 3D-модели двух различных конструкций чехла транспортного: стандартная модель и улучшенная модель, предложенная сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт», с наличием перегородок между периферийными шестигранными трубами и отверстиями в дистанционирующих плитах. Представлены результаты CFD моделирования течения воды из затопленного чехла с разными вариантами скорости снижения уровня воды.

Таким образом, получены распределения плотности воздушно-водяной смеси внутри чехла транспортного, которые используются для обоснования критерия ядерной безопасности.

CFD моделирование температурных режимов 19-стержневой электрообогреваемой модели ТВС на воздухе, валидация на экспериментальных данных

Захаров Р.М., Олексюк Д.А., Пугачёв М.А., Оскирко В.А.

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

Ключевые слова: естественная конвекция, теплообмен в пучках стержней, CFD, вычислительная гидродинамика, ТУК, ОТВС.

На сегодняшний день современные технологии позволяют активно развиваться методам вычислительной гидродинамики – CFD (Computational Fluid Dynamics). Данные программы ограниченно используются в атомной энергетике для решения задач гидродинамики и теплообмена. Для более правильного создания расчетных моделей требуется валидация программных кодов на экспериментальных данных.

В настоящий момент в России есть несколько вариантов конструкций транспортных упаковочных комплектов (ТУК), рассчитанных на загрузку отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) реакторов ВВЭР-1200 и ВВЭР-1300. Для обоснования принятой конструкции проводятся расчеты, призванные подтвердить выполнение проектных требований по температурам оболочек ТВЭлов загруженных ОТВС. Часто данные задачи решаются с помощью CFD кодов. Большинство аттестованных в России CFD кодов имеют область определения для тепловых расчетов существенно турбулентную – вынужденную конвекцию при больших скоростях движения среды, воспринимающей теплоту.

Однако кассеты в ТУК установлены в чехлы и омываются воздухом (а также азотом или гелием) с малыми скоростями движения последнего. При этом тепло передаётся от поверхности ТВЭлов за счёт лучистого теплообмена и естественной конвекции внутренней среды ТУК. Таким образом, актуальной становится задача валидации кодов для условий незначительной естественной конвекции в пучке нагреваемых стержней и лучистого теплообмена со стенками канала.

Главной целью представляемой работы было экспериментальное получение локальных теплофизических параметров в условиях естественной конвекции и лучистого теплообмена в модели ОТВС реактора ВВЭР, а также CFD моделирование эксперимента с целью верификации на экспериментальных данных программного средства STAR CCM+.

С целью получения данных для валидации, на стенде КС проведены эксперименты по исследованию температурных режимов на 19-стержневой модели ТВС реактора ВВЭР-1000. Модель установлена в канале В-19 петли высокого давления (ПВД) стенда КС.

Основные параметры модели:

- диаметр имитаторов ТВЭлов – 9,0 мм;
- шаг решетки ТВЭлов – 12,8 мм;
- шаг дистанционирующих решеток – 340 мм;
- длина тепловыделяющей части – 2,5 м.

В результате проведенного эксперимента были получены значения температуры имитаторов ТВЭл в различных аксиальных координатах для разных значений тепловой нагрузки для условий естественной конвекции в экспериментальном канале.

После обработки экспериментальных данных для верификации программного кода STAR-CCM+ была построена трехмерная модель экспериментального участка стенда КС с 19-стержневым пучком имитаторов ТВЭл. Было проведено CFD моделирование и сравнение полученных расчетных данных с экспериментальными.

Определение температурного состояния поглощающего элемента при нарушении нормальных условий эксплуатации

Полевой М.А., Гордеев Д.С., Юдахин В.В., Ягов П.В.

*Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР
опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), Подольск,
mpolevoy89264267726@mail.ru*

Ключевые слова: поглощающий элемент, система управления и защиты, энерговыделение, нарушения нормальной эксплуатации, проектные аварии, направляющий канал.

Поглощающий элемент (ПЭЛ) в составе поглощающего стержня системы управления и защиты реакторной установки ВВЭР предназначен для быстрого прекращения ядерной реакции в активной зоне, поддержания мощности на заданном уровне и ее перевода с одного уровня на другой, выравнивания энерговыделений по высоте активной зоны и подавления ксеноновых колебаний. Для обоснования работоспособности ПЭЛ необходимо знать условия его эксплуатации.

Ранее для обоснования работоспособности ПЭЛ при нарушениях нормальной эксплуатации и проектных авариях (ПА) в качестве исходных данных принимались температурные условия тепловыделяющего элемента. Но, так как ПЭЛ находится в направляющем канале, то условия охлаждения тепловыделяющего элемента и ПЭЛ отличаются.

Отсюда возникает потребность в определении температурного состояния ПЭЛ и выполнения анализ позволяющего более реалистично определить изменения температуры ПЭЛ в аварийных процессах, и позволит проверить отсутствие плавления поглощающего материала и конструкционных материалов ПЭЛ.

Анализ температурного состояния ПЭЛ проводится с использованием теплогидравлического расчетного кода КОРСАРГП. Данная работа выполняется отдельно для режимов с разгерметизацией первого контура и без разгерметизации первого контура. Для режимов без разгерметизации первого контура срабатывание и без срабатывания аварийной защиты. Для режимов с разгерметизацией первого контура рассмотрен режим «Аварии с потерей теплоносителя при большой течи с отказом активной части системы аварийного охлаждения зоны низкого давления».

Данная работа демонстрирует реалистичное температурное состояние ПЭЛ и его конструкционных материалов, а также отсутствие плавления поглощающего материала и оболочки ПЭЛ при аварийных процессах. Результаты данной работы использовались для проектов реакторных установок с ВВЭР-1200.

Секция 6.

Датчики, системы контроля и оборудование для реакторных установок

Обеспечение безопасного обращения с ОЯТ стенда КМ-1 ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»

Иорданский М.Ю., Соколов В.Ю.

*Федеральное государственное унитарное учреждение «НИТИ им. А.П. Александрова»,
Сосновый Бор, iordanskiy@niti.ru*

Ключевые слова: стенд КМ-1, реконструкция, активная зона, ядерная энергетическая установка, жидкометаллический теплоноситель, отработавшее ядерное топливо, выемная часть, транспортный упаковочный комплект, сертификат – разрешение, железнодорожный транспортер, судно-контейнеровоз, пост выгрузки.

Стенд КМ-1 был сооружен в 1978 году и предназначен для проведения научно-исследовательских работ по совершенствованию паропроизводящей установки (ППУ) транспортной ядерной энергетической установки (ЯЭУ) с жидкометаллическим (свинец-висмут) теплоносителем (ЖМТ).

На основании опыта работы стенда КМ-1 и проведенного анализа перспективного развития ЯЭУ с ТЖМТ Госкорпорацией «Росатом» принято решение начать с 2009 года работы по реконструкции стенда КМ-1 ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» с целью создания новой перспективной ЯЭУ.

При подготовке к реконструкции стенда КМ-1 ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» предстояло решить важную и сложную задачу – удаление с площадки института отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) данного стенда, находившегося в составе отработавшей выемной части (ОВЧ), транспортировка которой ранее не осуществлялась.

В связи с этим был разработан и реализован большой комплекс мероприятий по обеспечению безопасного обращения и безопасной транспортировки ОЯТ стенда КМ-1 с территории института на территорию пункта хранения ФГУП «РосРАО».

Конструкция активных зон ЯЭУ с ЖМТ такого типа, как на стенде КМ-1 требовала разработки и создания технических средств перегрузки и транспортировки топлива, отличных от аналогичных средств, используемых при покассетной замене топлива в реакторах типа ВВР. Поэтому был разработан технический процесс выгрузки с извлечением всей активной зоны в составе отработавшей выемной части (ОВЧ) в комплекте с защитной пробкой и стержнями системы управления и защиты (СУЗ), зафиксированными в крайнем нижнем положении с помощью специально разработанного комплекта перегрузочного оборудования, обеспечивающего требуемые охлаждение и радиационную защиту.

Для временного хранения и транспортировки ОВЧ был разработан технический проект и в дальнейшем изготовлен специальный транспортный упаковочный комплект (ТУК-143).

Оформлены сертификаты-разрешения, подтверждающие соответствие конструкции ТУК-143, загруженного ОВЧ и условий перевозки требованиям «Правил безопасности...» НП-053-04.

Для безопасного обращения и транспортирования ТУК-143 с загруженной ОВЧ была разработана и изготовлена дополнительная железнодорожная оснастка (кантователь для ТУК-143 с дополнительным оборудованием), а также пост выгрузки на борту судна-контейнеровоза «Россита».

Вывоз ТУК-143 с загруженной ОВЧ состоялся в 2017 г.

В работах по обеспечению безопасного обращения и безопасной транспортировки ОЯТ стенда КМ-1 приняли участие многие предприятия и организации, в том числе входящие в периметр управления Госкорпорации «Росатом». Получен уникальный опыт безопасного обращения, транспортировки и постановки на долговременное контролируемое хранение ОЯТ реакторов подобного типа.

Экспериментальное обоснование работоспособности вариантов методов измерения уровня тяжелого жидкометаллического теплоносителя

**Бокова Т.А., Мельников В.И., Иванов В.В., Маров А.Р., Боков П.А.,
Волков Н.С., Львов А.В., Мильков С.А.**

*Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения
имени И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), Нижний Новгород,
marov_2011@mail.ru*

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, параметры теплоносителя, уровень теплоносителя, измерение, методы измерения уровня, термоэлектрические индикаторы уровня, термоэлектрические измерители, индуктивные уровнемеры, рефлекс-радарный уровнемер, поплавково-дискретный уровнемер.

Стабильную работу ЯЭУ обеспечивают системы автоматического управления и контроля параметров теплоносителя. Характерной особенностью ЯЭУ с ТЖМТ является интегральная (баковая) компоновка. К ним относятся установки типов БРЕСТ, СВБР, БРС-ППГ. Баковая компоновка подразумевает свободный уровень теплоносителя, который необходимо постоянно контролировать и поддерживать в заданном диапазоне. Выбор средств и методов измерения уровня тяжелого жидкометаллического теплоносителя ограничено его экстремальными параметрами и условиями эксплуатации. Традиционные средства измерения практически не пригодны, вследствие чего измерение уровня ТЖМТ является актуальной и сложной технической задачей.

В литературных источниках приводятся сравнительные характеристики методов измерения уровня различных сред, в том числе в зависимости от их физико-химических свойств. Однако анализ методов контроля уровня жидких металлов с учетом условий работы в ЯЭУ и их физических свойств в открытых источниках практически отсутствует.

Одними из самых адаптируемых к условиям всех режимов работы энергоблока, вплоть до «тяжелых» аварий, являются температурные измерения. Для индикации уровня теплоносителя на определенных отметках реактора существуют термоэлектрические индикаторы уровня (ТИУ) типа ТИР-1509 (ТУ У ТУ 33.2-04850451-090:200). В основу работы заложен термоанемометрический метод: изменение коэффициента теплоотдачи с поверхности прибора в зависимости от среды (вода, пароводяная смесь, воздух и т.д.), в которой находится индикатор.

Еще одним из распространенных устройств для определения уровня теплоносителя в реакторе является устройство, состоящее из продолговатого корпуса, в котором размещены нагреваемые термоэлектрические измерители со спаями, распределенными в продольном направлении, и не нагреваемый термоэлектрический измеритель, спай которого расположен вне зоны размещения нагреваемых термоэлектрических измерителей. В этом устройстве спай не нагреваемого термоэлектрического измерителя расположен вне зоны размещения дифференциальных термоэлектрических нагреваемых измерителей в донной части продолговатого корпуса, при этом спаи термопар распределены вдоль корпуса. Система электронагрева выполнена в виде источника переменного тока, к которому через разделительный конденсатор подключены электроды термоэлектрических измерителей, используемые в качестве нагревательных элементов. Недостатком данного устройства определения уровня теплоносителя в реакторе является низкая информативная точность измерения и высокая стоимость эксплуатации устройства, обусловленные большим количеством ложных срабатываний.

Для контроля уровня расплавов металлов так же используют многоточечные сигнализаторы на основе компактных индукционных преобразователей и индуктивные

уровнемеры, а также потенциометрические приборы, работающие по принципу измерения сопротивления трубчатого зонда, погруженного в металл. Большинство этих разработок были выполнены десятки лет назад и отличаются крайне высокой стоимостью и не высокой надежностью.

В настоящее время наиболее распространенным средством контроля уровня в стендовых экспериментальных контурах является электроконтактный сигнализатор уровня. Принцип его работы заключается в регистрации замыкания цепи «элемент питания – ключ – сигнальная лампа» при контакте металлического стержня, перемещаемого по высоте, с поверхностью теплоносителя. Стержень перемещается в изоляционном уплотнении. Как правило, используются простые фторопластовые уплотнения, которые недолговечны и нуждаются в частой замене. Вместе с тем, нарушение общей герметичности контура по газу ведет к неконтролируемому поступлению кислорода с воздухом, что вызывает бесконтрольное окисление теплоносителя. А это, в свою очередь, ведет к образованию твердых оксидов и забиванию проходных сечений контура циркуляции, частичному или полному разрушению проточной части насосов, нарушению теплоотвода от активной зоны и другим негативным последствиям.

Метод микроволновой рефлектометрии известен в технике измерений. Принцип работы рефлекс-радарного уровнемера основан на использовании импульсов высокочастотной электромагнитной энергии, передаваемых по измерительному зонду, частично погруженному в контролируемую жидкость. Зонд представляет собой трубу, внутри которой по центру коаксиально установлен электрод. Вторичная аппаратура генерирует микроволновые импульсы, подводимые в верхней части зонда, и измеряет временную задержку их прохождения до поверхности контролируемой среды и обратно. При увеличении уровня контролируемой среды в емкости пропорционально уменьшается расстояние до верха зонда и, соответственно, временная задержка. В идеальной системе данная зависимость является линейной. В НГТУ были проведены экспериментальные исследования указанного метода на прототипе устройства измерения уровня в емкости с ТЖМТ. Авторами экспериментально подтверждена возможность применения рефлекс-радарного метода для контроля уровня жидкометаллического теплоносителя с достовой точностью. В дальнейшем планируется разработать, изготовить и применить опытный образец данного уровнемера в условиях циркуляционного стенда со свинцово-висмутовым теплоносителем для измерения уровня ТЖМТ в емкости отбора статического давления потока теплоносителя в трубопроводе.

Следующий метод основан на регистрации срабатывания герметизированного магнитоуправляемого контакта (геркона) при воздействии магнитного поля заданного значения, создаваемого постоянным магнитом, находящимся на поверхности контролируемой жидкости. Известные приборы, работающие по данному методу недостаточно надежны и точны. Коллектив авторов доработал экспериментальный образец такого устройства для использования в натурных условиях работы реакторных условий, стендовой или экспериментальной установок. Для эксперимента подобраны модели замыкающих герконов МКА-14103 гр. А и МКА-14103 гр. Б, как наиболее термически стойкие из доступных на рынке. Магнитное поле создают постоянные магниты цилиндрической формы AlNiCo с рабочей температурой до 500 °С.

В докладе представлен обзор методов измерения уровня тяжелого жидкометаллического теплоносителя реакторных установок на быстрых нейтронах. Данный обзор показывает недостаточную надежность и точность известных методов и приборов. Предложены и отработаны методы поплавково-дискретного и рефлекс-радарного измерения уровня теплоносителя. Эксперименты показали их достаточную точность, технологичность и надежность. При этом они требуют дальнейшей отработки на опытных изделиях в условиях циркуляционного контура с ТЖМТ.

Измерение скорости звука в жидком свинце

Кондратьев А.М., Рахель А.Д.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва
arkon@ihed.ras.ru

Ключевые слова: свинец, импульсный нагрев, давление, плотность, энтальпия, тепловое расширение, электросопротивление, скорость звука, теплоноситель.

В нашей лаборатории был создан динамический экспериментальный метод, который позволяет изучать теплофизические свойства электропроводящих материалов при высоких температурах (≤ 30 кК) и давлениях (≤ 10 ГПа), недостижимых для статических методов. Суть метода заключается в следующем. Образец исследуемого материала в виде отрезка фольги (длиной и шириной по 10 мм и толщиной 15–40 мкм) помещается между двумя пластинами сапфира или кварцевого стекла. Через такую экспериментальную сборку пропускается импульс тока амплитудой 20–50 кА и временем нарастания порядка 1 мкс. За счет джоулева тепловыделения образец нагревается и испытывает практически одномерное тепловое расширение. В течение эксперимента измеряются временные зависимости тока, протекающего через образец, падения напряжения на образце, а также смещение его поверхности. Эти величины позволяют определить удельное электросопротивление образца, плотность, давление, удельную энтальпию и энергию.

В настоящее время мы развиваем также методику измерения скорости звука в наших динамических экспериментах. Ранее мы представляли эту методику, а также предварительные результаты, полученные для свинца. Суть этой методики заключается в следующем. В заданный момент времени на фронтальной поверхности образца возбуждается акустическое возмущение (с помощью лазерного импульса). Момент прихода этого возмущения на тыльную поверхность образца фиксируется лазерным интерферометром. Скорость звука определяется как отношение толщины образца в момент прихода возмущения на тыльную поверхность ко времени прохождения возмущения по образцу.

Сравнение полученных нами значений скорости звука для жидкого свинца с плотностью в 1,5–2 раза ниже нормальной при давлении 0,3–0,5 ГПа с литературными данными показало, что наши значения на 10–20 % превышают литературные. Анализ показал, что это расхождение связано с тем, что генерируемое в наших экспериментах «акустическое» возмущение, которое надежно детектируется с помощью интерферометра, при таких давлениях приводит к увеличению плотности жидкости на ~ 10 %, то есть является сильным и фактически представляет собой ударную волну. В настоящей работе показано, что существует широкая область состояний на фазовой диаграмме свинца, для которой генерируемое возмущение является достаточно слабым (акустическим) и измеренные нами значения скорости звука хорошо согласуются с другими данными.

Оценка относительной скорости дегазации в натриевом теплоносителе реактора на быстрых нейтронах

Гончар Н.И., Дмитриев Д.В.

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

Ключевые слова: реакторная установка, пределы повреждения твэлов, инертные радиоактивные газы, предел безопасной эксплуатации, реактор на быстрых нейтронах, натриевый теплоноситель, система контроля герметичности оболочек твэлов, относительная скорость дегазации.

В проекте реакторной установки (РУ) определены пределы повреждения твэлов (количество и степень повреждения) и связанные с ними уровни радиоактивности технологических сред первого контура по реперным инертным радиоактивным газам (ИРГ).

В правилах ядерной безопасности РУ (НП-082-07) установлен предел безопасной эксплуатации (ПБЭ) по повреждению твэлов реакторов атомных станций типа БН (реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем) с дефектом типа газовой неплотности, который составляет не более 0,1 % от числа твэлов в активной зоне и имеющих прямой контакт ядерного топлива с теплоносителем – не более 0,01 % от числа твэлов в активной зоне. Назначение систем контроля герметичности оболочек твэлов (КГО) – своевременное диагностирование приближения к ПБЭ.

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

Спектрометрия (очищенного от аэрозоля) защитного газа РУ типа БН позволяет диагностировать наличие газонеплотных твэлов по активности реперных ИРГ. Для оценки количества негерметичных твэлов необходима расчетная модель, проверенная по экспериментальным данным на действующем реакторе. Относительная скорость дегазации (или отношение скорости выхода ИРГ из теплоносителя в газовую систему к содержанию в теплоносителе) является одним из важных параметров этой модели. Существует несколько способов определения относительной скорости дегазации.

В работе предложен способ оценки относительной скорости дегазации натриевого теплоносителя по активности аргона (Ar-41, газообразного продукта активации) являющегося защитным газом в РУ типа БН.

Градуировка электромагнитного насоса-расходомера

Брагин Д.С., Верещагина Т.Н., Логинов Н.И.

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

Ключевые слова: электромагнитный насос-расходомер, кондукционный насос, кондукционный расходомер, жидкий металл, постоянные магниты, градуировка, точность измерения.

В ГНЦ РФ – ФЭИ был предложен способ измерения расхода с помощью электромагнитного насоса, защищённый патентом на изобретение и устройства для его осуществления, защищённые патентами на полезную модель и на изобретение.

Были разработаны магнитогидродинамические насосы-расходомеры для установок с малыми (до 500 л/ч) и сверхмалыми ($10 \text{ см}^3/\text{ч}$ – 10 л/ч) расходами жидких металлов. Такие расходы жидких металлов имеют место, например, в циркуляционных контурах пробковых индикаторов примесей в щелочных металлах, холодных ловушек, электрохимических датчиков кислорода и водорода, пробоотборников-дистилляторов и др. Ранее были описаны примеры конструкций, методика расчёта и характеристики некоторых насосов-расходомеров.

Принцип работы кондукционного насоса основан на законе Ампера: при пропускании электрического тока через находящийся в магнитном поле проводник на него действует сила, приводящая его в движение.

Принцип работы кондукционного расходомера основан на законе Фарадея: при движении проводника в магнитном поле в проводнике индуцируется электродвижущая сила (эдс), пропорциональная скорости движения.

В насосе-расходомере оба эти закона используются одновременно. Ток питания, подающийся токоподводами к рабочему каналу, вызывает движение жидкого металла согласно закону Ампера, а выходной сигнал насоса-расходомера, связанный с эдс, индуцированной согласно закону Фарадея, снимается с электродов, которыми снабжен рабочий канал.

Особенность измерения расхода с помощью насоса-расходомера состоит в том, что на его выходной сигнал накладывается падение напряжения от тока питания на омическом сопротивлении рабочего канала, которое необходимо вычесть из выходного сигнала.

В докладе впервые подробно описаны особенности методики градуировки магнитогидродинамического насоса-расходомера. Описана процедура градуировки и приведена градуировочная характеристика экспериментального образца насоса-расходомера сплава натрий-калий, разработанного для прототипа мишенного комплекса ускорителя. Таким образом, впервые экспериментально подтверждена возможность одновременного создания и измерения расхода жидкого металла одним устройством с точностью, достаточной для практического применения.

Градуировку насоса-расходомера следует проводить при номинальной температуре или при нескольких её значениях, поскольку градуировочный коэффициент зависит от температуры (как и у обычных магнитных расходомеров).

Показано, что способ измерения расхода и конструкция электромагнитного насоса-расходомера позволяют измерять малые расходы (до 200 л/ч) жидкого металла с погрешностью не более $\pm 2,5 \%$.

Обнаружение аномальных событий системы обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов при помощи сверточного автоэнкодера

Аркадов Г.В.¹, Коцоев К.И.^{2, 3}, Трыкова И.В.²

1 – Акционерное общество «Научно-технический центр «Диапром», Обнинск,

2 – Общество с ограниченной ответственностью «Квант Программ», Москва,
kotsoev@kvantprogramm.ru

3 – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

Ключевые слова: атомная электростанция, искусственные нейронные сети, вариационный автоэнкодер, свободные и слабозакрепленные предметы, безопасность эксплуатации, акустические аномалии, раннее обнаружение.

В реакторных установках (РУ) с ВВЭР не исключено появление в главном циркуляционном контуре свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов (ССП). Эти предметы, перемещаясь в потоке теплоносителя, могут соударяться с внутренними стенками элементов главного циркуляционного контура (ГЦК), что может привести к повреждению оборудования главного циркуляционного контура вследствие контакта или удара между СПП и частями ГЦК.

Большинство СПП появляется при первом запуске ГЦН после планово-предупредительного ремонта. Значительная часть незакрепленных деталей быстро разрушается в результате взаимодействия с вращающимися деталями (лопастями ГЦН) или стенками ГЦК. Мелкие фрагменты СПП, образующиеся в результате разрушения СПП, отфильтровываются с помощью системы водоочистки (СВО), что приводит к необходимости менять фильтры СВО раньше запланированного времени. Они также могут переноситься потоком ТН в активную зону реактора, где способны повреждать оболочки тепловыделяющих элементов. Известны случаи, когда мелкие частицы застревают между движущимися элементами в активной зоне реактора (направляющие каналы стержней органов регулирования системы управления и защиты).

Опыт эксплуатации РУ показывает, что раннее обнаружение подобных событий может минимизировать повреждения оборудования. Обнаружение СПП осуществляется по всплескам акустического шума от наносимых ими в потоке теплоносителя ударов по поверхности оборудования и трубопроводов первого контура.

Для обнаружения СПП реакторные установки с ВВЭР оснащают системами обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов (СОСП), основанными на регистрации акустических сигналов на поверхности оборудования реакторной установки.

Основной недостаток функционирующих на данный момент СОСП состоит в большом числе ложных срабатываний: штатное функционирование РУ сопровождается большим количеством разнообразных «штатных» шумов, не являющихся аномалиями, например, шум, вызванный работой регулирующей арматуры, турбулентным потоком ТН, включением или отключением разнообразного оборудования.

При обнаружении очередного акустического события эксплуатирующему персоналу важно знать, что послужило причиной – освободившийся предмет или результат штатного функционирования РУ, важно выделить нестандартные шумы (аномалии) на фоне большого потока событий, возникающих при штатном функционировании. Так же актуальна задача снижения количества ложных срабатываний СОСП.

В данной статье предложен алгоритм для решения задачи обнаружения аномалий, основанный на искусственной нейронной сети с архитектурой сверточного автоэнкодера, которая на выходе восстанавливает входные данные. Автоэнкодер обучается по

большому массиву архивных данных, собранных во время штатного функционирования РУ, при этом редкие нештатные события (если они есть) из обучающей выборки удаляются.

Далее обученный автоэнкодер применяется на вновь поступивших данных, решение о «нормальности» или «аномальности» данных принимается исходя из значения ошибки восстановления: данные с высокой ошибкой восстановления определяются как «аномалия», в то время как низкая ошибка восстановления говорит о том, что это штатное событие.

Алгоритм состоит из следующих этапов:

Определение базового канала. Из массива событий по 20 датчикам СОСП выбирался один канал, по которому раньше всего был зарегистрирован удар (базовый канал). Базовый канал выбирался по взвешенной совокупности значений: времени прихода, среднеквадратичной амплитуде, дисперсии и фронту нарастания сигнала. Данный подход позволил минимизировать ошибку выделения базового канала, связанную с погрешностью вычисления времени прихода и одновременно гарантировал, что выбранный канал действительно регистрировал событие достаточной амплитуды.

Преобразование сигнала базового канала в спектрограмму с помощью оконного преобразования Фурье, сохранение спектрограммы в виде картинки.

Обучение автоэнкодера на большом массиве спектрограмм штатных событий (удовлетворяющих условию нормальной работы РУ).

На этапе детектирования, обученный автоэнкодер сможет с минимальными ошибками восстановить «нормальные» данные, в то время как аномальные данные, которые автоэнкодер не «видел» при обучении, будут иметь относительно высокую погрешность восстановления (по сравнению с «нормальными» данными). Таким образом, путем сравнения ошибки восстановления с определенным порогом, автоэнкодер может определить, является ли тестируемые данные аномальными.

В ходе тестирования разработанного алгоритма на данных, в которых заведомо присутствовали аномалии, было показано что разработанный сверточный автоэнкодер с регуляризацией, обученный по режимам штатного функционирования, позволяет гарантированно выделять аномалии, связанные с ударами предметов о контур или нештатной работой оборудования, при этом не требуется предварительных знаний о природе возникновения этих аномалий. На определение аномалий не влияют штатные события, возникающие при нормальной работе оборудования РУ, что снижает количество ложных срабатываний СОСП. При необходимости учета новых режимов РУ, автоэнкодер легко может быть переучен, чтобы воспринимать

Расчетно-экспериментальное обоснование характеристик фильтрующего материала для фильтра механической очистки свинцово-висмутного сплава

**Воронин И.А., Мельников В.П., Посаженников А.М.,
Зуборева М.В., Добони К.А.**

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

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, взвешенные примеси, фильтр теплоносителя, фильтрующий материал, примесные частицы, свинцово-висмутный сплав, гидравлическое сопротивление фильтра, сопротивление фильтра, гидравлические исследования, эффективность фильтрации, скорость теплоносителя.

В процессе эксплуатации контуров с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (свинец, свинец-висмут) происходит накопление примесей, которые оказывают негативное влияние на работу систем и устройств в контурах жидкометаллического охлаждения ЯЭУ. Для очистки от нерастворенных примесей применяют фильтры с различными видами фильтроматериалов, при этом наиболее эффективными являются фильтроматериалы объемного типа [1].

Одной из важных характеристик фильтра, помимо эффективности очистки и ресурса, является гидравлическое сопротивление фильтрующего материала. При этом прямое измерение перепада давления в свинцово-висмутном теплоносителе затруднительно и требует сложной системы измерений, не гарантирующей получение точных результатов. В связи с этим измерение перепада давления было проведено на моделирующей жидкости – воде. Последующий пересчет полученных данных с учетом требований теории подобия ($Re = idem$) позволил получить данные по гидравлическому сопротивлению фильтроматериала применительно к эвтектическому сплаву свинец-висмут.

Знание гидравлического сопротивления фильтроматериала и учет местных сопротивлений при движении свинцово-висмутного сплава в фильтре позволяют сделать прогноз относительно общего сопротивления фильтра и при необходимости изменить его конструкцию с учетом возможностей побудителя расхода.

В качестве фильтрующего материала было выбрано изготавливаемое промышленностью кремнеземное полотно типа EKOWOOL. Данный материал является аналогом стеклоткани МКТТ-2,2А по составу и превосходит ее по техническим характеристикам (прочности, термостойкости, эффективности). Выполнено обоснование гидравлических характеристик выбранного фильтрующего материала для разработанной конструкции фильтра очистки свинцово-висмутного сплава от взвешенных примесей. По результатам проведенных исследований установлено, что гидравлическое сопротивление фильтроматериала составляет не более 0,3 МПа при скорости фильтрации 1 см/с.

Таким образом, фильтроматериал типа EKOWOOL рекомендован к применению в конструкции механического фильтра для контурной очистки свинцово-висмутного сплава от взвешенных примесей.

Литература

1. Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Паповянц А.К., Воронин И.А., Ягодкин И.В., Мельников В.П. Фильтрационная очистка ТЖМТ от примесей // *Инновации в атомной энергетике*. – Москва, 2013. – С. 474–483.

Секция 7.

Использование технологий ядерной энергетики в других отраслях

Исследование закономерностей термической деструкции отработавших ионообменных смол в свинецсодержащих расплавах

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

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

Ключевые слова: свинецсодержащий расплав, свинец, термическая деструкция, пиролиз, ионообменные смолы, кинетический анализ, энергия активации, переходная область, утилизация, отходы.

Ионообменные смолы применяются для очистки теплоносителя первого контура реакторов от радионуклидов на всех АЭС с водяным охлаждением. Это осуществляется посредством непрерывного отбора определенного объема теплоносителя из главного контура и его пропускания через серию охладителей, фильтров и слоев ионообменных смол.

По мере выработки ресурса ионообменные смолы превращаются в отходы, которые накапливаются в специальных хранилищах. Их объем непрерывно растет, поэтому на сегодняшний день существует необходимость переработки отработавших на атомных электростанциях ионообменных смол.

Наиболее прогрессивные методы утилизации, разрабатываемые в РФ, Японии, Канаде, Франции и Швеции, основаны на деструкции отработавших ионообменных смол. Процесс деструкции представляет собой разрушение полимерных цепочек материалов смолы под воздействием определенных условий. Одним из наиболее технологичных направлений утилизации такого типа отходов является использование низкотемпературного термического разложения в инертной атмосфере, так называемый пиролиз.

В АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» авторами проведены исследования термической деструкции отработавших ионообменных смол. Выполнен анализ взаимодействия углеводородных веществ, к которым относятся ионообменные смолы, с возможными свинецсодержащими расплавами. В качестве возможных расплавов рассматривались свинец, свинцово-висмутовый эвтектический сплав, эвтектические сплавы свинца с различными щелочными металлами. Выявлено, что наличие щелочной компоненты в расплаве при взаимодействии с ионообменными смолами приводит к образованию гидридов и карбидов, что в последующем потребует их дополнительного удаления. По этой причине, а также вследствие дешевизны и технологичности, исследования велись с использованием жидкого свинца.

Исследование термической деструкции отработавших ионообменных смол проводилось при температурах свинца 400, 450, 500 °С. В процессе эксперимента фиксировались температура свинца, объем вышедшего газа, давление в баке-реакторе.

На основании полученных экспериментальных данных проведен кинетический анализ. Задачей кинетического анализа в общем случае является выявить лимитирующей стадии процесса, которая показывает область реагирования и позволяет определить способ ускорения процесса пиролиза. Физико-химическая модель процесса пиролиза описывается различными полуэмпирическими уравнениями. В частности, математической формой зависимости превращения исходных ионообменных смол в конечные продукты во времени в процессе пиролиза является степенное уравнение Казеева – Ерофеева – Колмогорова.

В результате получена энергия активации процесса термической деструкции ионообменных смол в жидком свинце, численное значение которой $E_a = 40$ кДж/моль. Это означает, что процесс термической деструкции протекает на границе переходной и кинетической областей. Авторы предполагают, что увеличение скорости термической деструкции может быть достигнуто увеличением температуры свинецсодержащего расплава или увеличением площади реакции в кассете. Для нахождения оптимальных условий, подтверждающих вышеуказанные предположения, необходимо дополнительно провести эксперименты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калужской области (проект № 19-48-400003).

Исследования в обоснование возможности применения натрий-калиевого теплоносителя в неядерных отраслях (датчики давления)

Комаровский В.А., Ульянов В.В., Кошелев М.М., Глушаков Д.А.

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

Ключевые слова: жидкометаллический теплоноситель, натрий, калий, натрий-калиевая эвтектика, датчики давления, космические установки, эвтектический сплав, неядерная отрасль, установка малой мощности, измерительный блок.

С начала 40-х годов XX века в мире ведутся научно-исследовательские и проектные работы в обоснование использования теплоносителей на основе расплавов легкоплавких металлов в ядерных энергетических установках и исследовательских стендах. Не стоит забывать, что помимо таких жидкометаллических теплоносителей как свинец, свинцово-висмутовый эвтектический сплав, натрий, на сегодняшний день все также ведутся исследования и натрий-калиевого теплоносителя, который удовлетворительно обоснован для космических ядерных энергетических установок. Известны проекты ядерных реактивных двигателей и реакторов с использованием паров натрий-калиевого сплава. Сплав получают взаимодействием расплавленного натрия с жидким едким калием при температурах 400–500 °С или взаимодействием паров натрия с жидким хлоридом калия при температурах 850–900 °С.

При выборе теплоносителя космических ядерных энергетических установок определяющими являются такие факторы, как удобство эксплуатации, предэксплуатационное хранение, транспортировка и запуск установок. Опыт эксплуатации космических аппаратов «БУК» и «Топаз» показал, что выполненный комплекс расчетных и экспериментальных исследований по свойствам теплоносителя натрий-калий обеспечит заданный ресурс при температурах до 700 °С.

Натрий-калиевый сплав обладает рядом достоинств:

- высокая температура кипения 785 °С;
- очень низкое давление насыщенных паров, (оно составляет $5,0 \cdot 10^{-4}$ МПа при ~500 °С);
- отрицательная температура замерзания – 11 °С.

Это позволяет значительно повысить рабочую температуру в установках без существенного увеличения давления в системе. Как следствие, применение вышеуказанного сплава в приборостроительной отрасли не заставило себя долго ждать.

Авторы провели изучение возможности применения натрий-калиевой эвтектики в датчиках давления высокотемпературной среды. Измерительный блок такого датчика предназначен для непрерывного преобразования избыточного давления жидких и газообразных сред в унифицированный выходной сигнал постоянного тока.

В широком диапазоне изменения температур натрий-калиевая эвтектика оптимально подходит для использования в качестве рабочего вещества, без потерь передающего давления среды на измерительный элемент.

Датчик давления высокотемпературной среды обладает следующими техническими характеристиками:

- пределы измерения давления – от 0 до 1,6 МПа;
- измеряемая среда – натрий;
- диапазон измеряемой температуры – от 150 до 500 °.

В работе рассматривается методика заполнения измерительных блоков натрий-калиевой эвтектикой.

Проведено заполнение датчиков давления высокотемпературной среды натрий-калиевой эвтектикой. Методика заполнения, а также последующая оценка качества заполнения, полностью приведена в докладе.

Авторами показана перспективность использования натрий-калиевого эвтектического сплава в неядерном применении – в качестве рабочей жидкости датчика давления высокотемпературной среды.

Особенности переработки сплава натрий-калий, загрязнённого ртутью

Кононюк М.Х., Легких К.Г., Смыков В.Б.

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

Ключевые слова: реакторы на быстрых нейтронах, ИР БР-10, РУ типа БН, тройной сплав щелочных металлов с ртутью, пиролюзит, сорбционный фильтр, жидкометаллическая хроматография, двухстеночный парогенератор, метод твердофазного окисления щелочного металла.

Вывод ЯЭУ из эксплуатации является завершающим этапом её «жизненного» цикла после окончательного останова. Отдельной задачей является вывод из эксплуатации исследовательских РУ с щелочным теплоносителем. В виду специфики работы таких установок к этапу вывода из эксплуатации накапливаются «нетипичные» РАО, требующие особых методов переработки.

За годы эксплуатации на ИР БР-10 (с 1959 г. по 2002 г.) накопилось приблизительно 18–19 м³ щелочного металла (Na, сплав Na-K с примесью ртути) использовавшегося в качестве жидкометаллического теплоносителя в 1 и во 2 контурах реактора. Эти отходы щелочных металлов образовались в результате трёхкратной замены теплоносителей в реакторе. Для переработки отработанного щелочного теплоносителя успешно применяется метод твердофазного окисления, разработанный сотрудниками ИР БР-10. Ртуть в щелочном металле появилась в результате неудачного эксперимента – разрушения опытного двухстеночного парогенератора с ртутным контактном слоем, в результате которого вся ртуть попала в теплоноситель Na-K, который был слит в баки длительного хранения. Предварительные исследования содержимого баков длительного хранения показали, что ртуть равномерно распределена в сплаве, так как образует амальгамы (интерметаллидные соединения) со щелочными металлами.

Решение было найдено в области жидкометаллической хроматографии – в качестве селективного к ртути сорбента был предложен металлический магний при температуре прокачки через него тройного сплава Na-K-Hg 360–380 °С. Лабораторные исследования показали принципиальную правильность выбора этого метода, а стендовые испытания на ИР БР-10 дали весьма обнадеживающий практический результат: при однократной фильтрации сплава Na-K-Hg через магниевый сорбент степень очистки сплава от ртути достигала 96–98 % [3].

В дальнейших исследованиях было показано, что насыщенный ртутью магниевый сорбент можно безопасно утилизировать, выделив из него ртуть в виде нерастворимого твёрдого осадка, состоящего из киновари HgS (природный минерал). Однако при оценке масштабирования данного метода на необходимые для переработки Na-K-Hg объёмы, выяснилось, что количество образующихся ЖРО от растворения загрязнённых ртутью магниевых фильтров многократно превысит количество интерметаллида. По этой причине было принято решение о поиске альтернативного способа.

Таким решением стал метод сорбционного захвата паров ртути при проведении твердофазного окисления щелочного металла. В качестве сорбционного фильтра предложен пиролюзит (MnO₂). Технологически использование пиролюзитового фильтра легко дополняет стенд МИНЕРАЛ, в основу работы которого заложен метод твердофазного окисления щелочного металла. Для отработки сорбционного метода на ИР БР-10

был организован компактный исследовательский стенд. Интерметаллид приготавливался в лабораторных условиях из нерадиоактивной эвтектики Na-K и ртути (содержание ртути в сплаве 6,8 %). Пирролюзитовый фильтр расположили над реакционной емкостью и провели процесс твердофазного окисления. В результате получили минералоподобный продукт переработки Na-K. Индикаторы паров ртути показали отсутствие в полученном продукте ртути. Отработавший пирролюзит был исследован на предмет стойкости комплекса Hg_2MnO_2 и содержания в нем ртути. Лабораторные исследования показали, что содержание ртути в пирролюзите составило 5 % (ат.), а комплекс Hg_2MnO_2 устойчив до 450 °С. Также установлено необходимое для улавливания паров ртути соотношение ртуть: пирролюзит, которое составило 2:5.

Ресурсные характеристики ионообменных смол, применяемых в обоснование водно-химического режима водяных контуров экспериментальных установок и стендов

Сахипгареев Д.Р., Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С., Михеев А.С.

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

Ключевые слова: электрическая проводимость, мера кислотности pH, катионообменная смола, анионообменная смола, водно-химический режим, контур воды высокого давления, теплогидравлический эксперимент, дистиллированная вода, реактор на быстрых нейтронах, парогенератор.

В 1994 году на натриевом контуре стенда СПРУТ был проведен цикл работ в обоснование водно-химического режима парогенератора энергоблока БН-800. Одним из основных требований к воде контура высокого давления было соблюдение следующих условий: удельная электропроводность – ниже 1,0 мкСм/см; значение pH при 25 °С – 7,0. Для этого был смонтирован дополнительный контур, который позволил осуществить подготовку воды высокого давления в соответствии с вышеперечисленными требованиями.

Основными элементами дополнительного контура являлись: насосы, баки питательной воды, два фильтра с катионообменной смолой и два фильтра с анионообменной смолой. В подготовке воды использовались ионообменные смолы следующих марок: катионит КУ-2-8 со сроком годности 12 месяцев в соответствии с ГОСТ 20298-74; анионит АВ-17-8 со сроком годности 12 месяцев в соответствии с ГОСТ 20301-74.

После проведения экспериментальных работ ионообменные смолы не были извлечены из фильтров. В дальнейшем они оставались в фильтрах, причем условия их хранения не соответствовали требованиям ГОСТ 20298-74 и ГОСТ 20301-74. Согласно вышеуказанным ГОСТ перед эксплуатацией ионообменные смолы должны храниться во влажном состоянии, а в реальности они находились в сухом виде. В настоящее время ионообменные смолы извлечены. Ионообменные смолы – дорогостоящий продукт, поэтому возник вопрос о возможности их вторичного использования спустя столько лет.

Авторами доклада был выполнен анализ этих смол на возможность их применения в дальнейших работах для поддержания заданного водно-химического режима в контуре воды высокого давления. Для этого были проведены опыты по влиянию рассматриваемых ионообменных смол на показатели электрической проводимости и pH дистиллированной воды. В качестве эталона использовались ионообменные смолы, приобретенные в 2021 году.

При сравнении результатов выяснилось, что удельная электропроводность дистиллированной воды в обоих случаях идентична по показателям и соответствует требованиям водно-химического режима для контура воды высокого давления: удельная электропроводность – не более 8 мкСм/см. Авторам удалось добиться электрической проводимости 0,6–0,7 мкСм/см, значение pH при 25 °С – 6,0–8,5.

В случае с показателями кислотности pH – среда оказалась слабокислой (в интервале от 6,16 до 6,49). По требованиям водно-химического режима для контура воды высокого давления значение pH при 25 °С – 6,0–8,5. По-видимому, это связано с тем, что

ранее при эксплуатации контура воды высокого давления использовались корректирующие добавки.

Проведенные исследования указывают на возможность повторного использования ионообменных смол с истекшим сроком годности. Показатель кислотности pH может быть откорректирован путем добавления в воду высокого давления растворов кислоты и щелочи.

В докладе дано подробное описание лабораторной установки и методики проведения экспериментов.

Проблемы получения высокотемпературной стали с использованием термитных реакций

**Загоруйко Ю.И., Коновалов М.А., Ильичева Н.С., Виценко А.С.,
Соломатин А.Е., Ганичев Н.С.**

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

Ключевые слова: термитная реакция, сепарация, расплав металла, образцы, температура, химический анализ.

Термитные реакции используются в качестве источника тепловой энергии для целого ряда различных применений (для сварки рельсов, различных деталей и конструкций, для получения литого металла или огнеупоров). Полученный в результате термитной реакции высокотемпературный расплав смеси металла и керамической фазы (шлака) применяется в качестве имитаторов кориума для экспериментального моделирования процессов, протекающих на отдельных стадиях тяжелых аварий на реакторных установках.

При экспериментальном моделировании процессов с высокотемпературными расплавами стали с помощью термитных смесей возникает задача сепарации полученного расплава металла и расплава шлака. Длительная выдержка продуктов термитной реакции в реакционном тигле (более 30 с) приводит к гарантированному разделению фаз, но при этом возникают недопустимые тепловые потери. Таким образом, поиск оптимальных режимов получения расплава металла и его сепарации является актуальной задачей. Одновременно возникает задача выбора материалов для их применения в элементах конструкции, контактирующих с продуктами термитной реакции.

В докладе представлены результаты эксперимента по сепарации расплава металла и шлака (Fe , Al_2O_3) общей массой 2,2 кг. Лабораторная установка состояла из тигля и приемника расплава. В приемнике расплава размещались образцы исследуемых материалов (сталь X18H10T, вольфрам). Время выдержки продуктов термитной реакции в тигле составляло 8 с. Определена температура расплава на выходе из тигля и в приемнике расплава. Проведен химический анализ металлической фазы в приемнике расплава после ее затвердевания.

Моделирование теплопередачи в каналах щелевой формы машин непрерывного литья заготовок с инновационным свинцово-висмутовым кристаллизатором

Коновалов М.А., Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С., Харчук С.Е.

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

Ключевые слова: теплопередача, кристаллизатор стали, машины непрерывного литья заготовок, расчетное моделирование, форма канала.

Сталелитейное производство один из существенных потребителей электричества в нашей стране, где активно внедряются энергоэффективные технологии. При розливе стали повсеместно используются машины непрерывного литья заготовок, в которых сталь непрерывно заливается в форму, охлаждаемую водой, также называемой кристаллизатором. Сокращения потерь тепла в кристаллизаторе за счет утилизации отводимого тепла в электроэнергию и возвращения его в цикл возможна при выполнении следующих условий: повышение температуры в охлаждающем контуре кристаллизатора, применение в качестве хладагента жидкого металла, реализация паросилового цикла.

Наилучшим образом для охлаждения затвердевающей стали в кристаллизаторе подходит эвтектический сплав свинца с висмутом по совокупности факторов: температурный режим работы и особенности эксплуатации установки; теплофизические свойства; пожаробезопасность; опыт применения; цена. С учетом различия в типе хладагента и повышения температуры в охлаждающем контуре авторами проанализирована эффективность работы кристаллизатора для различных хладагентов.

В докладе представлены результаты расчетного моделирования кристаллизатора, изготавливающего прямоугольные стальные заготовки, с использованием вычислительного модуля chtMultiRegionFOAM со встроенной опцией solidification Melting Source CFD кода OpenFOAM. В качестве формы охлаждающего канала кристаллизатора рассматривался щелевой зазор. Достигнуты целевые показатели для реализации паросилового цикла. Температура на выходе из охлаждающего канала кристаллизатора составит величину 620 К при охлаждении одного кристаллизатора эвтектическим сплавом свинца с висмутом с расходом через охлаждающий канал, равным $\sim 27 \text{ м}^3/\text{ч}$, и температурой на входе 520 К. При этом тепловой поток, отводимый с одного кристаллизатора, составит 1,404 МВт.

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований и Правительству Калужской области, при финансовой поддержке которых в рамках научного проекта № 19-48-400003 выполняются исследования в обоснование снижения энергетических затрат при производстве стали за счет утилизации тепла машин непрерывного литья заготовок.

Подписано в печать 02.09.2022.
Тираж 180 экз. Заказ № 167. Уч.-изд. л. 9,3. Усл. п. л. 8,8.
Отпечатано в ОПиНТИ АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».
249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского».