ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

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

ТЕПЛОФИЗИКА:

СБОРНИК СТАТЕЙ, К 65-ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ОТДЕЛА ФЭИ **Теплофизика: сборник статей к 65-летию создания Теплофизического отдела ФЭИ** / Сборник научно-технических статей, Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2019. – 274 с.

В предисловии к сборнику представлено описание направлений научноисследовательской деятельности коллектива теплофизиков ФЭИ, условия формирования его кадрового потенциала и экспериментальной базы, современное состояние по этим вопросам. В опубликованных в сборнике статьях изложены наиболее значимые результаты научных исследований, полученные в последние годы в коллективе теплофизиков ФЭИ, в области гидродинамикии тепло- и массопереноса в различных теплоносителях (щелочные и тяжелые жидкие металлы, вода), в области физической химии и технологии жидкометаллических теплоносителей для ЯЭУ различного назначения, разработки кодов, инновационных проектов, использования жидких металлов в неядерных технологиях, включая тепловые трубы и лиофобные капиллярно-пористые системы. Обсуждаются направления перспективных исследований на современном этапе и в будущем. Приведены перечни монографий, справочников, учебников и учебных пособий для студентов вузов, подготовленных учеными и специалистами коллектива теплофизиков ФЭИ. Сборник иллюстрируется фотоматериалами научных конференций, проведенных коллективом теплофизиков ФЭИ в течение последнего периода времени.

Под общей редакцией

канд. техн. наук Ю.А. Кузиной, докт. техн. наук А.П. Сорокина,

Технический редактор Н.А. Денисова

Дизайн обложки Л. Чикинёва

Содержание

Теплофизические исследования в ФЭИ: от первых установок до проектов ядерных реакторов нового поколения5	5
Актуальные проблемы теплофизики реакторов на быстрых нейтронах	3
Актуальные проблемы теплофизики легководных реакторов нового поколения: результаты комплексных исследований	5
Исследования в обоснование высокотемпературной ядерной энерготехнологии с реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем для производства водорода и других инновационных применений)
Исследования влияния радиационного формоизменения ТВС на температурный режим и напряженно-деформированное состояние оболочки твэлов	
Экспериментальные исследования характеристик теплообмена и температурных полей в каналах и сборках твэлов быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем	2
Свойство подобия гидродинамики раздающих коллекторных систем с различными условиями подвода жидкости в коллектор	5
Массоперенос продуктов коррозии в контурах с жидкометаллическими теплоносителями	l
Развитие технологии натрия как теплоносителя быстрых реакторов	5
Анализ современного состояния работ по технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (Pb, Pb-Bi)	3
Экспериментальные исследования стратификационных процессов в элементах контура циркуляции ЯЭУ различного типа	l
Экспериментальные исследования кипения натрия в аварийных режимах в модели ТВС реактора на быстрых нейтронах	5

Экспериментальные и расчетные исследования теплообмена в ТВС активной зоны в обоснование эффективности и безопасности водоохлаждаемых реакторов нового поколения	157
Экспериментальные исследования моделей парогенераторов реакторных установок с жидкометаллическим охлаждением в ГНЦ РФ – ФЭИ Грабежная В.А, Грачев Н.С., Михеев А.С.	170
Испытания модели парогенератора с витыми трубами, обогреваемыми свинцом	194
Перспективы разработки инновационного водоохлаждаемого реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя	.204
Инновационные технологии, развиваемые в ГНЦ РФ – ФЭИ	215
Сотрудничество с французскими специалистами в области теплофизики быстрых реакторов	232
Теплофизические аспекты проекта РИФМА	242
Научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2015)»	250
Приложение А. Результаты исследований Научной школы по тепломассопереносу, физической химии и технологии теплоносителей в энергетических системах, обобщенные в монографиях	259
Приложение Б. Обобщение опыта сотрудников Научной школы в учебно-педагогической работе в ВУЗах и техникумах и при подготовке специалистов высшей квалификации в учебных пособиях	261
Приложение В. Результаты исследований специалистов Научной школы в области тепломассопереноса и теплофизических свойств материалов ядерной техники, представленные в справочниках	
и руководящих технических материалах	
Приложение Г. Конференция «Теплофизика – 2018»	. 266

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ФЭИ: ОТ ПЕРВЫХ УСТАНОВОК ДО ПРОЕКТОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Рассматривая сегодня достигнутые результаты, диву даёшься: как можно было это сделать. Помимо успехов в области быстрых реакторов, были ЯЭУ для подводных лодок и космических аппаратов, АЭС с кипением теплоносителя в активной зоне на «Белоярке», Билибинской АЭС и многое другое. По-видимому, немаловажное значение имел авторитет руководителей и взаимопонимание с высшими эшелонами власти – с теми, кто влиял на выбор тематики, определял финансовое и материальнотехническое обеспечение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Лидером был А.И. Лейпунский, его ближайшими помощниками были О.Д. Казачковский, В.А. Малых, Г.И. Марчук, В.И. Субботин. Атмосфера, создаваемая этими и подобными им людьми, была вдохновенной, творческой, окна в институте светились до поздней ночи. Уже в это время был получен комплекс феерических результатов в областях реакторной физики, материаловедения, теплофизики, включая физическую химию и технологию жидкометаллических теплоносителей.

Одной из важнейших проблем создания реакторов новых типов всегда являлась теплофизика — выбор и освоение теплоносителей, изучение теплообмена и гидродинамики. Это лучше всех понимали И.В. Курчатов, Д.И. Блохинцев и А.И. Лейпунский, по инициативе которых для решения этих задач через месяц после пуска Первой АЭС 24 июля 1954 г. в Лаборатории «В» был создан теплофизический отдел № 4 (с 16 июля 1956 г. — отдел № 7), руководителем которого был назначен В.И. Субботин. При необходимости решения всех задач, стоящих перед институтом, первый приоритет был отведен ЯЭУ для подводных лодок (АПЛ), далее АЭС с реакторами на быстрых нейтронах и в-третьих — ЯЭУ для космических аппаратов. Коллектив теплофизиков должен был обосновать теплогидравлику ЯЭУ, охлаждаемых жидкометаллическими теплоносителями (ЖМТ), разрабатываемых под научным руководством ФЭИ для АПЛ, космических аппаратов, АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, и возможность применения в них ЖМТ.

Продолжались работы с теплоносителем вода для АПЛ и АЭС типа РБМК и ВВЭР. Они базировались на научно-технических контактах с А.П. Александровым. В результате было построено специальное здание для этих работ, что позволило получить уникальные результаты и создать задел для развития работ в последующие, в том числе и критические для науки 1990-е.

Годы упорных трудов дали свои результаты. В начале 1960-х годов пришло признание работ ФЭИ по теплофизике ядерных реакторов. В январе 1962 г. 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». В заключение Секция НТС рекомендовала руководству Госкомитета по использованию атомной энергии утвердить ФЭИ в качестве головного института отрасли по жидкометаллическим теплоносителям.

Заключение секции HTC способствовало тому, что в 1964 году на базе теплофизического отдела был сформирован Теплофизический сектор. Вводятся в эксплуатацию и эксплуатируются установки БР-5, 27/ВТ и АПЛ проекта 645. С 1967 года

ФЭИ выполняет функции головной организации Министерства среднего машиностроения СССР по теплофизике реакторов с жидкометаллическим и водяным охлаждением. На Теплофизический сектор была возложена координация исследований по теплофизике ЯЭУ, выполняемых в организациях атомной отрасли и других ведомствах (рис. 1).

При организации работ по выполнению задач, стоящих перед коллективом, первое место, бесспорно, отводилось кадрам: подбору, росту квалификации, организации эффективной работы. Для решения этого широко использовалась аспирантура, соискательство (через эти формы обучения прошло более 250 сотрудников), привлечение специалистов для обсуждения научных проблем на совещаниях и семинарах всех уровней: от лабораторных до институтских и международных. Наивысшей оценкой Валерием Ивановичем кадрового потенциала было: «У нас не просто талантливые инженеры и научно-технические работники, но среди них есть гениальные люди!». По его инициативе в 1970 году постановлением Госкомитета по науке и технике, подписанным В.А. Кириллиным, согласованным с министром Среднего Машиностроения Е.П. Славским, для развития фундаментальных теплофизических исследований численность сотрудников ФЭИ целевым образом была увеличена на 100 человек. Многие из поступивших в институт в то время успешно работают и сегодня, некоторые из них стали ведущими специалистами: Грабежная В.А., Гулевский В.А., Ефанов А.Д., Загорулько Ю.И., Иванов Е.Ф., Сергеев В.В., Федотовский В.С., Щербаков С.И.

Добиваясь пополнения коллектива молодыми специалистами, В.И. Субботин не забывал об эффективном использовании имеющегося кадрового потенциала. Эта работа заключалось в выборе перспективных направлений, в их организационном оформлении (создание новых групп, лабораторий, отделов) и реализовывалось как за счёт концентрации сил, так и за счёт передачи тематики из одного коллектива в другой. О масштабах этой работы свидетельствует то, что с 1957 по 1975 год было организовано девять лабораторий: первая – для изучения теплогидравлики реакторов с жидкометаллическими теплоносителями (1957 год, руководитель П.А. Ушаков) и девятая – по технологии сплава свинец-висмут (1970 год, руководитель Ю.И. Орлов). Научное обоснование для разрабатываемых уникальных АЭС и ЯЭУ потребовало создания комплекса уникальных экспериментальных теплофизических стендов и установок: СГДИ, 6Б, АР-1, СПРУТ, ПРОТВА-1, ПРОТВА-2, СИД, ПЛУТОН, ТТ-1М, ТТ-2М, В-200, СВД-2, СТФ и др. (рис.2–7).



Рис. 1. Теплофизики ФЭИ, начало 1960-х годов

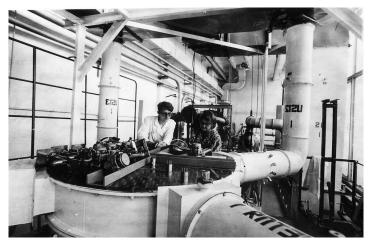


Рис. 2. Стенд для аэродинамических исследований «СГДИ»



Рис. 3. Трехконтурный водяной стенд высокого давления «СВД-2»



Рис. 4. Многопетлевой жидкометаллический (Na, Na-K) стенд «6Б» для теплогидравлических исследований



Рис. 5. Стенд «ТТ-2М» со свинцово-висмутовым теплоносителем для технологических исследований



Рис. 6. Крупномасштабный стенд автоматической защиты парогенераторов «CA3» в стадии монтажа



Рис. 7. Общий вид интегральной модели реактора типа БН на водяном стенде «В-200»

Исследовались теплогидравлика, механизмы турбулентного теплообмена, кипение и конденсация жидких металлов, физическая химия и технология ЖМТ. На всех этапах их выполнения большое внимание уделялось методикам и технике измерений, включая разработку уникальных датчиков температуры, скорости и др. В результате были созданы научные основы применения жидкометаллических теплоносителей в ядерной энергетике. Результаты этих исследований позволили совместно с институтами и КБ страны научно обосновать теплогидравлические параметры и высокоэффективные технологические процессы, разработать и практически реализовать аппараты и системы, обеспечившие успешную эксплуатацию принципиально новых АЭС с реакторами на быстрых нейтронах (БОР-60, БН-350, БН-600), а также энергопуск реактора БН-800.

Были проведены обширные исследования по обоснованию теплогидравлических параметров ЯЭУ БУК и «Тополь» и технологии теплоносителя натрий-калий для этих установок. Когда возникли сомнения по работоспособности твэлов установки БУК, было сделано всё возможное для выполнения принятого А.И. Лейпунским решения о срочном проведении испытаний на модернизированном экспериментальном стенде. В результате была продемонстрирована работоспособность твэлов.

Следует отметить, что при создании ЯЭУ не удалось избежать аномальных ситуаций. При любом таком событии стремились понять причины их возникновения, разработать решения по их ликвидации для предотвращения подобных ситуаций в дальнейшем. Специалистам поручались сложные, но конкретные задания.

Так при пусконаладочных работах на АЭС БН-350 возникли течи в парогенераторах. Срочно была организована работа для обоснования технологий, связанных с их ремонтом, вплоть до написания инструкций по реализации в условиях БН-350 (Кириллов П.Л., Турчин Н.М.).

При разработке корабельной ЯЭУ со свинцово-висмутовым теплоносителем, создаваемой под научным руководством А.И. Лейпунского, теплофизики ФЭИ отвечали за комплекс работ по обоснованию теплогидравлики теплоносителя. В критической ситуации (авария на АПЛ проекта 645) ведущие специалисты-теплофизики были привлечены к решению возникшей проблемы. В сжатые сроки был разработан уникальный (не имеющий аналогов в мире) электрохимический измеритель термодинамической активности кислорода в теплоносителе свинец-висмут, разработана технология очистки и обеспечения качества теплоносителя (Орлов Ю.И., Блохин В.А., Иванов К.Д., Ивановский М.Н., Мартынов П.Н., Паповянц А.К., Шимкевич А.Л., Шматко Б.А.). Полученные результаты позволили реализовать программу строительства серии АПЛ с теплоносителем свинец-висмут и обеспечили их успешную эксплуатацию: были продемонстрированы их уникальные характеристики, которые повергли в шок американцев. Более того, дальнейшее развитие этих работ в отделе Ю.И. Орлова позволило представителям лодочного направления Б.Ф. Громову, Г.И. Тошинскому выступить с предложением о создании АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с теплоносителем свинец-висмут, известной сегодня как СВБР-100. Дальнейшее развитие этих работ в отделе Ю.И. Орлова, а затем в 2010-е годы в Институте инновационных технологий (руководитель П.Н. Мартынов) позволило использовать их результаты в обоснование АЭС с РУ БРЕСТ ОД-300 со свинцовым теплоносителем.

В 1975 году после перехода В.И. Субботина на работу в НПО «Энергия» в Москву коллектив теплофизиков возглавил П.Л. Кириллов.

В 1980 году. был основан Центр теплофизических данных, преобразованный в 1986 года в отраслевой базовый информационный центр по проблематике «Теплогидравлика ядерных энергетических установок» (руководитель В.П. Бобков). В 1992 году создана лаборатория технологического моделирования (начальник А.Л. Шимкевич), в 1998 году — расчетная лаборатория контурной теплогидравлики (В.Я. Кумаев), в 2001 году — лаборатория фильтрации жидкостей и газов (начальник И.В. Ягодкин), в 2003 году — Центр водородной безопасности (руководитель Ю.Н. Вашляев). Продолжается борьба за развитие экспериментальной базы. Сдаются в эксплуатацию теплофизический корпус ТФК-3 (1984 год), здания 229 (1990 год) и 607 (2006 год), создаются новые экспериментальные установки. Регулярно проводятся конференции по теплофизике, которые в последние годы приобретают всё большую популярность.

Наметившийся уже в конце восьмидесятых годов застой определялся иными темпами обоснования проектов новых ЯЭУ, не реализовывались уже разработанные проекты АЭС с реакторами 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 коллектива были направлены на повышение безопасности действующих и перспективных ЯЭУ и продление их ре-

сурса, участие в инновационных проектах, разработку расчетных кодов, проведение фундаментальных исследований, которые до 2005 года поддерживались Министерством науки Российской Федерации и Минатомом.

В это трудное время руководители теплофизического коллектива П.Л. Кириллов, затем с 1995 года А.Д. Ефанов не только предпринимают усилия по сохранению коллектива теплофизиков, а занимают активную позицию по его развитию. В 2002 году в теплофизическом отделении вновь создаются отделы: проблемы безопасности атомных станций с водяным теплоносителем (к.т.н. С.Г. Калякин); технологии теплоносителей и новых материалов (д.т.н. П.Н. Мартынов); расчетнотеоретический отдел (к.х.н. А.А. Лукьянов); теплогидравлики и технологии жидкометаллических теплоносителей (д.т.н. А.П. Сорокин). Развернулись исследования по новой тематике:

- жидкометаллическая мишень для электроядерных систем с использованием теплоносителя свинец-висмут;
- фильтры и фильтрующие станции для АЭС (распоряжением Первого заместителя министра РФ по атомной энергии Рябева Л.Д. № 326-Р от 19.10.00 ГНЦ РФ ФЭИ назначен генеральным разработчиком фильтрационного оборудования);
- теплогидравлические, физико-химические и технологические исследования в обоснование АЭС с РУ БРЕСТ ОД-300.

Следует отметить настойчивую, целеустремлённую работу А.Д. Ефанова по развитию расчётных работ в теплофизическом коллективе. Благодаря его неустанным усилиям за эти годы было разработано более десяти расчетных теплофизических кодов (МИФ-СКД, MASKA-LM, TRICOD, DINCOR-DGR, КУПОЛ-М, TURBO-FLOW, ВЯЗ-М, МАСТЕР-S и др.), которые успешно используются для сопровождения экспериментов и в проектных расчетах АЭС с различным охлаждением. Реализовывалась давняя мечта теплофизиков о создании авторитетного расчётного коллектива, работающего в тесном контакте с экспериментаторами.

Развивается конверсионная деятельность, проводится 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. Сказать, что оно было полезным, всё равно что не сказать ничего. Оно порождало атмосферу соперничества, давало дополнительную информацию для сопоставления результатов, иногда аргументировало необходимость постановки новых работ. Но особая польза была в проведении работ по согласованным программам, а в 1990-е годы, годы катастрофического обвала финансирования науки в России, работа по зарубежным контрактам на коммерческой основе.

Значительный вклад в проведение исследований внесли: Арнольдов М.Н. (д.т.н.), Алексеев В.В. (д.т.н.), Блохин В.А. (к.т.н.), Бобков В.П. (д.т.н.), Богословская Г.П. (к.т.н.), Вашляев Ю.Н. (к.т.н.), Верещагина Т.Н. (д.т.н.), Габрианович Б.Н. (д.т.н.), Гулевский В.А. (к.т.н.), Дельнов В.Н. (д.т.н.), Дробышев А.В. (к.т.н.), Ефанов А.Д. (д.т.н.), Жуков А.В. (д.т.н.), Ибрагимов М.Х. (д.т.н.), Иванов К.Д. (д.т.н.), Иванов Е.Ф. (к.т.н.), Ивановский М.Н. (д.т.н.), Калякин С.Г. (д.т.н.), Кебадзе Б.В. (д.т.н.), Кириллов П.Л. (д.т.н.), Козлов Ф.А. (д.т.н.), Кузнецов Э.К., Лаврова О.В., Лагутин А.А., Левченко Ю.Д. (д.т.н.), Логинов Н.И. (д.т.н.), Лукьянов А.А. (к.х.н.), Мартынов П.Н. (д.т.н.), Милованов Ю.В. (к.т.н.), Морозов А.В. (д.т.н.), Морозов В.А. (к.т.н.), Опанасенко А.Н. (к.т.н.), Орлов Ю.И. (д.т.н.), Орлова Е.А. (к.т.н.), Папо-

вянц А.К. (к.т.н.), Пометько Р.С. (к.т.н.), Привезенцев В.В. (к.т.н.), Рачков В.И. (д.т.н., член-корр РАН), Рымкевич К.С., Свириденко И.П. (д.т.н.), Селиванов В.М. (д.т.н.), Смирнов А.М., Сердунь Е.Н. (к.т.н.), Смогалев И.П. (к.т.н.), Сорокин А.П. (д.т.н.), Сорокин В.П. (к.т.н.), Ушаков П.А. (д.т.н.), Федотовский В.С. (д.т.н.), Шимкевич А.Л. (д.ф-м.н.), Шматко Б.А. (д.т.н.), Юрьев Ю.С. (д.т.н.), Ягодкин И.В. (к.т.н.).

Серьёзные изменения в структуре произошли в 2010 году: теплофизический коллектив был объединен с коллективом реакторной физики, были укрупнены лаборатории, но при этом ликвидированы лаборатории 54 и 67, занимавшиеся физической химией и технологией щелочных металлических теплоносителей. Проведена модернизация 18 теплофизических стендов, введены в эксплуатацию новые стенды ГЕ-2М, РУ-3О, ЛИС-М, ИРС-М др.

В новых условиях в рамках вступившей в действие 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 быстрыми реакторами нового поколения: БН-1200 с натриевым теплоносителем, БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, СВБР-100 со свинцово-висмутовым сплавом, многоцелевого быстрого исследовательского реактора МБИР.

В отделении выполнен комплекс НИОКР в обоснование повышения техникоэкономических характеристик ядерного топлива для действующих, строящихся и перспективных атомных электростанций ВВЭР (АЭС-2006, ВВЭР-ТОИ), в обоснование проектных решений пассивной безопасности, технических решений и устройств водородной безопасности РУ ВВЭР.

Проводятся НИОКР в обоснование инновационного проекта ВВЭР-СКД (рис. 8 и 9), концепции электроядерного подкритического бланкета на модульном принципе построения активной зоны с жидкосолевыми расплавами делящихся материалов, исследования теплогидравлики, массопереноса и разработки комбинированной системы очистки в обоснование высокотемпературной РУ БН-ВТ с температурой натрия ~900 °С для производства водорода, разработка и изготовление оборудования экспериментальных Рb-Li стендов для испытаний элементов бланкета ИТЭР и т. д.

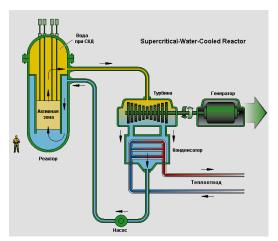


Рис. 8. Одноконтурная ЯЭУ с реактором ВВЭР-СКД с водой сверхкритических параметров с двухзаходной циркуляцией через активную зону

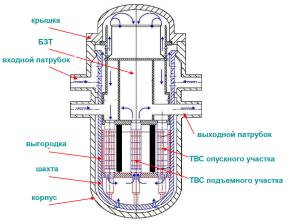


Рис. 9. Двухзаходная схема циркуляции в реакторе ВВЭР-СКД

В сентябре 2015 года в ГНЦ РФ – ФЭИ образовалось новое отделение – Отделение безопасности ядерно-энергетических установок (ОБ ЯЭУ), которое возглавил А.А. Труфанов. В это отделение вошли подразделения, которые занимаются анализом, расчетными и экспериментальными исследованиями в области технологической безопасности атомных станций с реакторами на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, а также повышения эффективности и безопасности работы водоохлаждаемых реакторов. В ноябре Отделение безопасности ядерноэнергетических установок преобразовано в Отделение теплофизики (ОТФ), которое возглавила Ю.А. Кузина.

Основные задачи Отделения теплофизики ГНЦ РФ – ФЭИ в области атомной энергетики определяются дальнейшим развитием стратегического направления Госкорпорации «Росатом» – создание реакторов на быстрых нейтронах нового поколения в плане повышения их безопасности, экономичности, экологичности, надежности, а также разработкой перспективных АЭС с водоохлаждаемыми реакторами типа ВВЭР, проведением исследований по международному проекту «ТВС-КВАДРАТ».

Важное значение имеет инициация новых инновационных разработок, а также организация работы по внедрению уже выполненных разработок и технологий в различных областях техники и промышленности по таким направлениям как испарительно-конденсационные системы передачи тепла (тепловые трубы), теплообменники для высоких и сверхвысоких тепловых потоков, устройства для энергетики и объектов нефтегазового комплекса на основе лиофобных капиллярно-пористых систем, датчики и приборы для контроля технологических параметров, технология жидкометаллических теплоносителей, разработка технологического оборудования.

Кузина Ю.А., заместитель генерального директора – директор Отделения теплофизики

Сорокин А.П., главный научный сотрудник

УДК 621.039

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ*

А. П. Сорокин, Ю. А. Кузина, А. А. Камаев, Ю. И. Орлов, В. В. Алексеев, В. А. Грабежная, Ю. И. Загорулько

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)

Представлены и проанализированы результаты актуальных теплофизических исследований в обоснование характеристик и безопасности реакторов на быстрых нейтронах (быстрых реакторов) с жидкометаллическими теплоносителями: перспективного реактора на быстрых нейтронах большой мощности с натриевым теплоносителем и быстрого реактора со свинцовым теплоносителем. Изложены результаты экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена при стратифицированном течении теплоносителя, теплогидравлики крупномодульного парогенератора «натрий-вода» при различных режимах работы реактора, деградации тепловыделяющей сборки в процессе развития тяжелой аварии с потерей расхода натрия в реакторе на быстрых нейтронах. Идентифицированы основные механизмы деградации оболочек имитаторов твэлов, проведена оценка распределения материалов-маркеров по высоте сборки в ее конечном состоянии, изучены явления блокировки проходных сечений сборки и выброса материалов-маркеров за ее пределы. Показана целесообразность встроенной в бак реактора комбинированной системы очистки натрия, в которой холодные ловушки являются обязательным элементом, а горячие ловушки обеспечивают ускоренную очистку от кислорода при работе АЭС на номинальном режиме. Представлены результаты теплогидравлических исследований активной зоны реактора со свинцовым теплоносителем на стенде «бБ» и парогенератора на стенде СПРУТ в ГНЦ РФ-ФЭИ. На теплогидравлической модели парогенератора реакторной установки со свинцовым теплоносителем установлено, что значения температуры пара на выходе из обоих коллекторов совпадают. Совпадают и температуры свинца на выходе из опускного участка и в основном тракте свинца. В опытах не обнаружено пульсаций расхода питательной воды, давления в контурах, что свидетельствует об устойчивости режимов при работе на неполной нагрузке. Рассмотрены состояние и перспективы развития технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей. Показано, что имеется принципиальная возможность обеспечить требуемые параметры высокотемпературного быстрого реактора с натриевым теплоносителем для производства большого количества водорода, например, на основе одного из термохимических циклов или высокотемпературного электролиза с высоким коэффициентом теплового использования электроэнергии. Анализируются проблемы, которые нужно решить при дальнейших теплофизических исследованиях.

В России имеются все предпосылки (технологические и организационные) для реализации ресурсонезависимой энергетики, а именно двухкомпонентной ядерной энергетической системы с замыканием ядерного топливного цикла (ЯТЦ) [1—4], включающей в себя АЭС с тепловыми и быстрыми реакторами, которые вырабатывают энергию и воспроизводят топливо, и централизованный замкнутый ЯТЦ. Разработка двухкомпонентной ядерной энергетической системы с замыканием ЯТЦ создает базу для атомно-водородной энергетики, когда атомные станции будут производить электроэнергию, ядерное топливо и водород [5].

В целях повышения безопасности, экономичности, экологичности и обоснования надежности быстрых реакторов нового поколения с натриевым и свинцовым теп-

_

^{*} Опубликовано в журнале «Теплоэнергетика», 2018, № 10, с. 60-69.

лоносителями, реализуемых в различных проектах [6, 7], были проведены обширные исследования, основные результаты которых кратко изложены в этой статье.

Исследования полей температуры и скорости теплоносителя на интегральной модели реактора на быстрых нейтронах при различных режимах

Контур циркуляции теплоносителя быстрого реактора представляет собой сложное сочетание последовательно и параллельно соединенных элементов с различной ориентацией в поле силы тяжести, геометрические характеристики проходных сечений которых резко меняются по ходу движения теплоносителя. Погрешности моделирования теплогидравлических процессов на фрагментарных секторных моделях с изотермическим потоком во многом связаны с неучетом пространственных трехмерных эффектов и температурной неоднородности потока. Теплоноситель в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) всегда неизотермичен из-за неравномерности энерговыделения, перепада температуры между узлами контура циркуляции, особенностей теплосъема в переходных и аварийных режимах работы.

Результаты экспериментальных исследований специалистов из ГНЦ РФ-ФЭИ, кафедры инженерной теплофизики НИУ МЭИ и ОИВТ РАН на интегральной водяной модели быстрого реактора показали, что термогравитационные силы приводят к температурному расслоению с возникновением застойных и рециркуляционных образований, перестройке режима течения и температурного поля. Вопросы моделирования теплогидравлических процессов в баке быстрого реактора при натриевом охлаждении с использованием мелкомасштабных водяных моделей рассмотрены в работах [8, 9]. На стратифицированных границах раздела областей теплоносителя с различной температурой возникают внутренние волны, которые вызывают пульсации температуры на стенках реакторного оборудования [10] (рис. 1). Это приводит к термической усталости конструкционных материалов и снижению сроков эксплуатации реакторного оборудования. Причем установившийся режим естественной циркуляции характеризуется значительно меньшими градиентами температуры в вертикальном направлении над боковыми экранами.

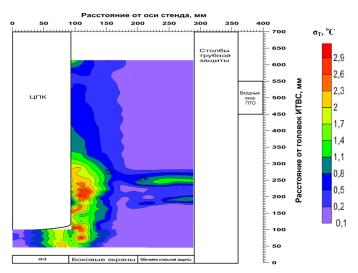


Рис. 1. Интенсивности пульсаций температуры по высоте верхней камеры, полученные при перемещении подвижных термозондов в номинальном режиме

Данные получены для большого числа режимов и условий экспериментов с помощью специально разработанной и внедренной на стенде системы измерений, обеспечивающей высокие точность и скорость регистрации сигналов. Эти данные могут быть использованы для верификации теплогидравлических кодов, предназначенных для обоснования проектных характеристик и безопасности реактора на быстрых нейтронах большой мощности. В частности, это проектные коды DINROS, GRIF и коды нового поколения ЛОГОС, HYDRA, COKPAT-БН.

Теплогидравлические исследования однотрубной модели парогенератора в пусковых, переходных режимах работы и режимах на неполной мощности

В результате проведенных в ГНЦ РФ-ФЭИ исследований получены данные по теплогидравлике на однотрубной модели на стенде СПРУТ (рис. 2) в обоснование проектных параметров крупномодульного парогенератора быстрого реактора большой мощности новой конструкции, в котором в одном корпусе совмещены процессы испарения и перегрева пара.

Особое внимание было обращено на кризис теплообмена и связанные с ним пульсации температуры теплопередающей стенки. Следует отметить, что в настоящее время экспериментальные данные о критических паросодержаниях и соответствующих им тепловых потоках, полученные при давлении 17–18 МПа и массовой скорости $1100-1400 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{c})$, отсутствуют.

Переносить данные о пульсациях температуры теплопередающей стенки, полученные на электрообогреваемых трубах, на трубы с жидкометаллическим обогревом в корне неверно в силу следующих причин. Во-первых, при равномерном электрообогреве (как известно, большинство данных получено именно на электрообо-

греваемых трубах с равномерным тепловыделением), кризис теплообмена достигается всегда на выходе пароводяного потока из трубы. Поэтому невозможно определить протяженность зоны пульсаций температуры. Во-вторых, при электрообогреве температура стенки в зоне кризиса теплообмена резко возрастает и может достигать высоких значений, вплоть до пережога стенки, а при обогреве жидким металлом она ограничена температурой жидкого металла. Именно истинное знание протяженности зоны пульсаций температуры, их амплитуды и частоты необходимо для оценки долговечности парогенерирующей трубы.

Полученные экспериментальные данные о критическом тепловом потоке при давлении ниже 15 МПа удовлетворительно совпадают с данными скелетных таблиц по расчету критического теплового потока в трубе. С ростом давления отмечаются увеличение плотности теплового потока и сниже-

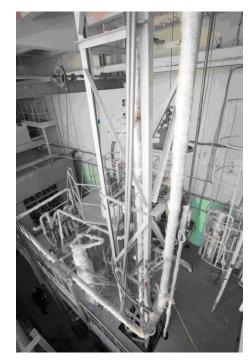


Рис 2. Однотрубная модель парогенератора на стенде СПРУТ

ние критического (граничного) паросодержания. Во всех режимах (пусковых, нормальных и переходных) наблюдался нестационарный кризис теплообмена, характеризующийся смещением зоны кризиса либо к выходу из парогенерирующего канала, либо ко входу в него. По значениям пульсаций температуры стенки был определен максимальный размах пульсаций температуры в зависимости от расхода питательной воды (рис. 3). Для подтверждения надежной работы натурного парогенератора необходимо проведение исследований на его многотрубной модели при нормальных и переходных режимах эксплуатации.

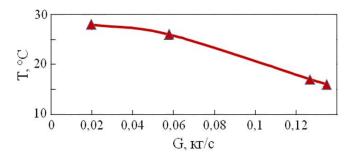


Рис. 3. Зависимость максимального размаха пульсаций температуры стенки в зоне кризиса теплообмена от расхода питательной воды

Экспериментальные исследования деградации модельных тепловыделяющих сборок при авариях с неконтролируемой потерей расхода натрия

В ГНЦ РФ-ФЭИ [11] проведены исследования 19-стержневой модельной тепловыделяющей сборки (ТВС) на стенде «Плутон» в условиях, моделирующих аварию с неконтролируемой потерей расхода натрия. Энерговыделение в эксперименте обеспечивалось реакцией термитной смеси $Al + Fe_2O_3$ со стехиометрическим составом (рабочая теплота сгорания смеси $Q_p = 1,6$ МДж/кг). По экспериментальным оценкам кинетики распространения фронта термитной реакции в каналах аналогичной формы время перехода всей массы исходной термитной смеси в расплав $Fe + Al_2O_3$ (T = 3100 K) не превышает 1 с.

Главные задачи эксперимента — идентификация основных механизмов деградации оболочек имитаторов твэлов, оценка распределения материалов-маркеров (Cu, Mo, Mg) по высоте сборки в ее конечном состоянии, изучение явлений блокировки проходных сечений модельной сборки, выброса материалов-маркеров за пределы объема сборки. Введение в состав термитной смеси этих материалов, которые в исходном состоянии локализованы в строго определенном месте по высоте индивидуальных имитаторов твэлов, позволило на основании данных об их конечном распределении оценить, как перемещается расплав внутри модельной сборки.

При проведении экспериментов в условиях, моделирующих неконтролируемую потерю расхода натрия, область глобальной деградации оболочек имитаторов твэлов составила около 65% ее высоты и была преимущественно локализована в части стержневого пучка с повышенной плотностью термитного заряда. По результатам экспериментальных исследований идентифицированы три основные причины деградации оболочек: температурные напряжения в материале оболочек; плавление оболочек; динамические эффекты, обусловленные быстрым превращением тепловой энергии расплава имитатора кориума в механическую работу при тепловом взаимодействии расплава с натрием. Расчетное значение коэффициента конверсии

(перехода тепловой энергии в механическую работу) составило 0,115% при мощности энерговыделения 4,85 кВт.

В результате анализа распределения материалов-маркеров по высоте сборки были обнаружены фрагменты оболочек имитаторов твэлов, домены отвердевших расплавов стали и железа, конгломераты продуктов термитной реакции, порошкообразные продукты термического взаимодействия расплава имитатора кориума с натрием, затвердевшие наплывы стали (рис. 4).

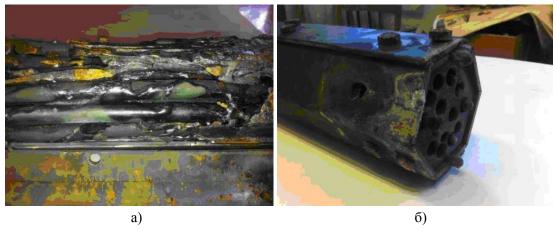


Рис. 4. Признаки плавления материала оболочек имитаторов твэлов (a) и вид проплавленной в нижней части чехла модельной сборки (δ)

Наличие заметных концентраций материалов-маркеров (Си и Мо) в пробах по всей высоте сборки свидетельствует об интенсивном перемешивании расплава внутри имитаторов твэлов до разрушения их оболочки. Порошкообразные маркеры распределены однородно по высоте сборки с некоторым превышением концентрации молибдена в нижней ее части и меди — в верхней части. Общее количество продуктов термитной реакции, выброшенных за пределы объема сборки, составило 75–80% исходной массы термитной смеси. Была обнаружена практически полная блокировка проходного сечения модельной сборки в ее нижней части.

В [12] были разработаны модели, реализованные в расчетном коде БРУТ, и впервые показано, что время до проплавления оболочки составляет 10 с. Полученные результаты позволяют провести верификацию расчетных кодов в обоснование сценариев аварий типа ULOF (Unprotected Loss of Flow – прекращение расхода теплоносителя через реактор).

Исследования физико-химических процессов и технологии натриевого теплоносителя

Задачи натриевой технологии: очистка натрия от примесей и контроль за их содержанием, безопасная эксплуатация реакторной установки в рабочих режимах и при проведении ремонтных работ — успешно решались при создании отечественных установок БР-5, БОР-60, БН-350, БН-600, БН-800 [13–15]. Поскольку в целях повышения безопасности перспективного быстрого реактора большой мощности принято решение о размещении всех систем с радиоактивным натрием в баке реактора [6], габариты системы очистки I контура, а следовательно, и их производительность и емкость по примесям оказываются ограниченными.

Необходимое качество натриевого теплоносителя поддерживается специальными средствами очистки с использованием различных физических методов: отстаивания, дистилляции, фильтрации, очистки холодными и горячими ловушками (ХЛ и ГЛ). С учетом результатов проведенных исследований были выбраны два последних метода. Для обоснования этого выбора был проведен значительный объем как экспериментальных, так и расчетно-теоретических работ. Практическая апробация подтвердила оптимальность принятого решения [13–15].

Результаты исследований определили отечественный подход к конструированию холодной ловушки, которая имеет три последовательно расположенные зоны: охлаждаемый отстойник, зону окончательного охлаждения и изотермический фильтр. Испытания XЛ показали, что в ней натрий от кислорода и водорода очищается эффективно (при времени пребывания натрия в ловушке более 15 мин коэффициент удержания примесей близок к единице). Очистка натрия от продуктов коррозии, особенно от углерода, менее эффективна.

Для увеличения емкости XЛ по примесям необходимо, чтобы распределение отложений в ловушке было равномерным. Это в настоящее время является главным критерием, по которому проводится расчетное моделирование накопления примесей внутри ловушки.

Размещение ХЛ в баке реактора приводит к возникновению опасностей, связанных с накоплением в ней водорода, использованием для охлаждения ХЛ аргона под давлением 1,5 МПа и возможностью ее разогрева натрием, находящимся в баке реактора. Для устранения этих недостатков специалистами ГНЦ РФ-ФЭИ предложено на выходе I и II контуров обеспечивать температуру 150 и 120 °C соответственно, что позволит исключить накопление водорода в холодной ловушке I контура. Расчеты подтвердили возможность реализации таких режимов [14].

Согласно выполненным исследованиям имеется принципиальная возможность создания XЛ с емкостью по примесям, в несколько раз превышающей заложенную в предыдущие проекты. Для реализации этой возможности теплогидравлические и массообменные характеристики XЛ, закладываемой в проект, оптимизируются с использованием кодов TURBOFLOW и MASKA–LM [15].

Использование встроенной в бак реактора холодной ловушки с натриевой системой охлаждения позволяет увеличить емкость XЛ по примесям, скорость очистки и повысить безопасность по сравнению с вариантом газового охлаждения.

Уровень температуры теплоносителя в современных установках позволяет для очистки натрия от примесей использовать геттеры [16]. Геттерная (горячая) очистка натрия I контура от примесей в некоторых случаях может конкурировать с холодной очисткой. В [16] показано, что ГЛ массой 400 кг, содержащая цирконий в виде фольги толщиной 0,15 мм, при работе на номинальных параметрах обеспечивает необходимую концентрацию кислорода в натрии.

Эти результаты свидетельствуют о целесообразности проработки варианта комбинированной системы очистки, при котором ХЛ является обязательным элементом системы очистки, встроенной в бак реактора, а в ГЛ может проводиться ускоренная очистка от кислорода при работе АЭС на номинальном режиме.

Среди оперативных методов контроля количества примесей в натрии основное внимание уделяется применению пробковых индикаторов (ПИ), датчиков с диффузионными мембранами и электрохимическим методам [17]. Экспериментально специалистами ГНЦ РФ-ФЭИ были определены значения параметров, гарантирующих достоверность показаний ПИ [17]. Градуировка ПИ проводилась по кислороду, во-

дороду и продуктам взаимодействия натрия с водой. В настоящее время разработчиками ГНЦ РФ-ФЭИ решается задача создания встроенного в бак реактора пробкового индикатора, аналогичного французскому с азотным охлаждением [18]. Новая разработка малогабаритного прибора ИВА-М с водородопроницаемой мембраной для контроля водорода в натрии выполнена по схеме, аналогичной прибору ИВА-IV, и обеспечивает все функции последнего, включая возможность оперативной проверки чувствительности с помощью дозировки водорода.

В настоящее время на атомных станциях внедряется электрохимический датчик контроля водорода с никелевой мембраной на основе стабилизированного диоксида циркония. Этот электролит хорошо изучен, имеется большой опыт использования его в гальванических концентрационных элементах, налажено промышленное производство. С использованием моделей гомогенного и гетерогенного массопереноса примесей в натриевых контурах разработаны компьютерные коды для расчета интегрального массопереноса водорода и трития, а также продуктов коррозии конструкционных материалов [19]. Модель массопереноса трития в трехконтурной ЯЭУ с натриевым теплоносителем базируется на сведении баланса трития и водорода в натрии I и II контуров. Расчеты показали, что основное количество трития, образующегося в быстром реакторе, поступает в холодные ловушки I и II контуров. При этом в холодной ловушке I контура установки типа БН-600 его накапливается примерно в 1.5 раза больше. В III контур выносится через парогенераторы трития примерно в 100 раз меньше, чем накапливается в ХЛ.

Основными задачами дальнейшего развития технологии натрия являются:

- получение фундаментальных данных о физико-химических процессах для тройных (например, натрий—железо—кислород, натрий—хром—кислород) и более сложных систем в натрии, необходимых для обоснования моделей, закладываемых в коды, и проведение опытов для верификации кодов;
- разработка верифицированного комплекса кодов, учитывающих взаимосвязь ядерно-физических, физико-химических, гидродинамических, тепло- и массообменных, термомеханических и технологических процессов для обоснования ресурса ЯЭУ с учетом всей совокупности процессов и режимов ее эксплуатации;
- создание комбинированной системы очистки натрия от примесей, включая радионуклиды и взвеси, встроенной в бак реактора;
 - усовершенствование приборов контроля содержания примесей в натрии;
- исследование процессов массопереноса и накопления трития в контурах ЯЭУ, разработка методов улавливания и надежной локализации трития, выделяющегося при проведении различных технологических операций.

Теплогидравлические исследования в обоснование энергоблока нового поколения с быстрым реактором со свинцовым теплоносителем

Исследования теплофизических характеристик активной зоны реакторной установки с тяжелым теплоносителем на модельной тепловыделяющей сборке с дистанционирующими решетками периферийной подзоны активной зоны показали, что при числах Пекле 200 < Pe < 1200 влияние этих решеток на теплоотдачу несущественно. В результате были получены экспериментальные данные по теплоотдаче примерно такие же, как и для расположения твэлов с относительным шагом s/d = 1,28 (s — расстояние между твэлами, d — диаметр твэла) без дистанционирующих решеток. Отличие составило при Pe = 1190 примерно 13%, а при Pe = 200 — около 23%. Однако в

[20, 21] предложена новая формула для более точных расчетов теплоотдачи твэлов, дистанционируемых поперечными решетками с s/d = 1,28.

В распределении температуры для центрального измерительного имитатора твэла внутри дистанционирующей решетки отмечаются три локальных максимума, которые приходятся на места соприкосновения стержня и дистанционирующей решетки. Для использования в расчетах данных по подъемам температуры они обезразмерены и представлены в виде формул. В [21] показано, что значения периодических неравномерностей температуры находятся в допустимых пределах для реактора.

Работы в обоснование парогенератора реакторной установки БРЕСТ начались в 2011 г. на стенде СПРУТ на трехтрубной модели парогенератора (рис. 5).

Позднее на том же стенде были проведены испытания фрагментной теплогидравлической модели парогенератора с тяжелым теплоносителем (конструкция ОАО «ИК ЗиОМАР»), состоящей из 18 витых парогенерирующих труб, размещенных поровну в двух коллекторах. В процессе испытаний было установлено, что выходные температуры пара в обоих коллекторах совпадают. Пульсации расхода питательной воды и давления в контурах обнаружены не были, что свидетельствует об устойчивых режимах при работе на частичных параметрах, т. е. не на 100%, а, например, на 30 и 50% номинальной мощности.



Рис. 5. Экспериментальная модель парогенератора реакторной установки БРЕСТ с витыми трубами на петле стенда СПРУТ со свинцовым теплоносителем

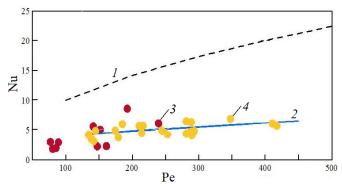


Рис. 6. Зависимость безразмерных коэффициентов теплоотдачи (числа Нуссельта) со стороны свинца при поперечном течении теплоносителя в модели ПГ от числа Пекле:

I – расчет по формуле ЦКТИ; 2 – расчет по формуле ГНЦ РФ-ФЭИ;

3 – при обогреве свинцом; 4 – при обогреве сплавом свинца с висмутом

Ранее на этом же свинцовом контуре были проведены эксперименты по определению коэффициентов теплоотдачи со стороны свинца при поперечном течении теплоносителя, которые частично охватывали диапазон скоростей теплоносителя, характерный для пусковых режимов (рис. 6). Скорость свинца ограничивалась параметрами насоса. В дальнейших исследованиях необходимо расширить диапазон скоростей теплоносителя для обоснования расчетных соотношений для всех режимов работы парогенератора.

Технология тяжелых жидкометаллических теплоносителей: состояние и перспективы развития

Учитывая имеющийся положительный опыт эксплуатации реакторных установок транспортного типа (атомные подводные лодки и др.), на сегодняшний день можно выделить три основные задачи, которые могут быть решены с помощью технологии теплоносителя (Pb-Bi или Pb) в гражданских реакторных установках [18, 22]:

- обеспечение чистоты теплоносителя и поверхностей циркуляционного контура для поддержания проектных теплогидравлических характеристик при больших ресурсах работы;
- предотвращение коррозии и эрозии конструкционных материалов при длительной эксплуатации;
- обеспечение современных требований безопасности на различных этапах эксплуатации реакторной установки (подготовка теплоносителя, пуск, текущая эксплуатация, ремонты и перегрузки, разгерметизация, режимы отклонения от условий нормальной эксплуатации).

Для решения этих задач разрабатываются методы и средства технологии теплоносителя, которые включают в себя:

- водородную очистку теплоносителя и контура от шлакообразующих примесей;
- регулирование растворенного кислорода в теплоносителе для противокоррозионной защиты стали от коррозии;
 - фильтрацию теплоносителя и защитного газа;
 - контроль теплоносителя как в реакторных, так и в нереакторных условиях.

Разрабатываемые средства технологии теплоносителя процессы предусматривают тщательную подготовку теплоносителей до загрузки в реакторную установку и при подаче в циркуляционный контур, мероприятия в пусковых режимах и минимальное отвлечение обслуживающего персонала от основной работы.

Создаваемое с учетом современных требований оборудование обеспечивает проведение всех необходимых технологических мероприятий и станет важной составной частью общей системы безопасности при эксплуатации реакторных установок на всех этапах их жизненного цикла.

Реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем для производства водорода и других инновационных применений

В результате проведенных нейтронно-физических и теплофизических исследований реакторной установки с натриевым теплоносителем (БН–ВТ) тепловой мощностью 600 МВт в [5] показано, что имеется принципиальная возможность обеспечить требуемые параметры высокотемпературного быстрого реактора для производства большого количества водорода, например, на основе одного из термохимических циклов или высокотемпературного электролиза с высоким коэффици-

ентом теплового использования электроэнергии. Требования безопасности при этом будут соблюдены. Относительно небольшие габариты, вид теплоносителя, выбор делящегося вещества и конструкционных материалов позволяют создать реактор с повышенной ядерной и радиационной безопасностью.

На рис. 7 приведена схема реакторной установки БН–ВТ для производства электроэнергии и водорода на основе технологии твердооксидного электролиза воды. Расчеты массопереноса водорода и трития для этой установки показали, что ее КПД составляет примерно 40%, объем производимого водорода 2,8×10⁴ дм³/с (при нормальных условиях). Система очистки высокотемпературного натрия от водорода основывается на принципиально новом методе — вакуумировании через специальные мембраны, при этом коэффициент проницаемости системы очистки ІІ контура от трития должен превышать 140 кг/с.

Для I контура БН–ВТ количество продуктов коррозии, образующихся при концентрации кислорода в натрии 1 млн⁻¹, превышает 900 кг/год, если оболочки твэлов изготовлены из стали ЭП-912ВД, и 464 кг/год при оболочках из молибденового сплава. Для II контура количество продуктов коррозии составляет 263 кг в год на каждую петлю. Опыты, проведенные при высоких температурах, свидетельствуют об эффективности удержания взвесей продуктов коррозии на фильтрах, установленных в низкотемпературной зоне. Специалистами ГНЦ РФ-ФЭИ предложено использовать для очистки высокотемпературного натрия от примесей принцип работы холодной ловушки: охлаждать натрий до необходимой температуры с одновременным удержанием продуктов коррозии на поверхностях массообмена, включая фильтры. Дальнейшего изучения требуют процессы, происходящие в высокотемпературных жаропрочных материалах при их облучении [5].

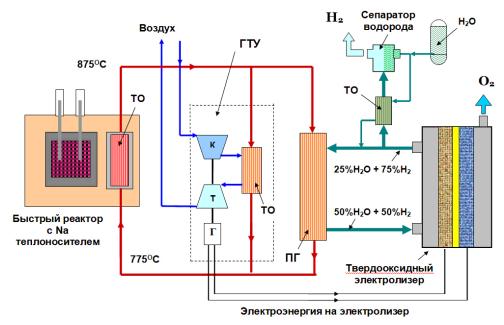


Рис. 7. Схема реакторной установки для производства электроэнергии и водорода на основе технологии твердооксидного электролиза воды:

- I быстрый ректор с натриевым теплоносителем; 2 теплообменник;
 - 3 газотурбинная установка; 4 сепаратор водорода;
 - 5 твердоксидный электролизер; 6 парогенератор

Представленные в данной статье результаты не исчерпывают круг научнотехнических проблем, которые нужно решить при создании быстрых реакторов нового поколения на жидких металлах.

Выводы

- 1. Несмотря на широкий спектр выполненных исследований гидродинамики, тепло- и массообмена в жидкометаллических теплоносителях применительно к теплофизическому обоснованию реакторов на быстрых нейтронах, такое обоснование нельзя считать исчерпанным. Это связано с тем, что в настоящее время к безопасности реакторов предъявляются повышенные требования, кроме того, появились новые экспериментальные и расчетные возможности для решения проблем теплофизического обоснования таких реакторов.
- 2. Предложенные принципиально новые технические решения обеспечат существенное улучшение технических характеристик всего энергоблока с реактором на быстрых нейтронах.
- 3. Результаты расчетно-теоретических исследований закономерностей теплогидравлических, физико-химических и массообменных процессов фундамент научно-технического обоснования ЯЭУ будущего. Только на базе этих результатов возможно создание верифицированного комплекса кодов, учитывающего взаимосвязь всех процессов в ЯЭУ для обоснования ее ресурса с учетом всех режимов эксплуатации.

Список литературы

- 1. *Асмолов В.Г.*, *Зродников А.В.*, *Солонин М.И*. Инновационное развитие ядерной энергетики России // Атомная энергия. 2007. Т. 103. Вып. 3. С. 147–155.
- 2. *Говердовский А.А., Калякин С.Г., Рачков В.И.* Альтернативные стратегии развития ядерной энергетики в XXI в. // Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 3–10. doi: 10.1134/S004036361405004X.
- 3. *Пономарев-Степной Н.Н.* Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе БН и ВВЭР // Атомная энергия. 2016. Т. 120. Вып. 4. С. 183–191.
- 4. Использование жидких металлов в ядерной, термоядерной энергетике и других инновационных технологиях / В.И. Рачков, М.Н. Арнольдов, А.Д. Ефанов, С.Г. Калякин, Ф.А. Козлов, Н.И. Логинов, Ю.И. Орлов, А.П. Сорокин // Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 20–30. doi: 10.1134/S0040363614050087.
- 5. Нейтронно-физические и теплофизические исследования в обоснование высокотемпературной ядерной энерготехнологии с реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем для производства водорода / С.Г. Калякин, Ф.А. Козлов, А.П. Сорокин, Г.П. Богословская, А.П. Иванов, М.А. Коновалов, А.В. Морозов, В.Ю. Стогов // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2016. № 3. С. 104–115.
- 6. Концепция перспективного энергоблока с быстрым реактором БН-1200 / В.И. Рачков, В.М. Поплавский, А.М. Цибуля, Ю.Е. Багдасаров, Б.А. Васильев, Ю.Л. Каманин, С.Л. Осипов, Н.Г. Кузавков, Б.Н. Ершов, Н.Р. Амирметов // Атомная энергия. 2010. Т. 108. Вып. 4. С. 201–205.
- 7. *Поплавский В.М.* Состояние и тенденции развития технологии быстрых реакторов // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2011. № 1. С. 5–15.

- 8. Ушаков П.А., Сорокин А.П. Роль гидравлических сопротивлений при моделировании на воде естественной конвекции в баках быстрых реакторов // Теплоэнергетика. 2000. № 5. С. 9–14.
- 9. *Ushakov P.A., Sorokin A.P.* Modeling problems of emergency natural convection heat removal in the upper plenum of LMR using water // Proc. of 8th Intern. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-8). Baltimore, USA, 2–6 April 2000. ICONE-8078.
- 10. Экспериментальные исследования полей температуры и скорости на интегральной водяной модели быстрого реактора в различных режимах работы / А.Н. Опанасенко, А.П. Сорокин, А.А. Труфанов, Н.А. Денисова, Е.В. Свиридов, Н.Г. Разуванов, В.Г. Загорский, И.А. Беляев // Атомная энергия. 2017. Т. 123. Вып. 1. С. 28–35.
- 11. *Загорулько Ю.И., Кащеев М.В., Ганичев Н.С.* Механизмы начальной деградации твэлов ТВС быстрых реакторов // Атомная энергия. 2015. Т. 119. Вып. 2. С. 75–79.
- 12. *Кащеев М.В., Сорокин А.П.* Расчетное исследование тяжелых аварий в быстрых реакторах с натриевым теплоносителем // ВАНТ Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2017. Вып. 4. С. 24–36. [Обнинск.]
- 13. Liquid metal coolants technology for fast reactors / V.M. Poplavsky, F.A. Kozlov, Yu.I. Orlov, A.P. Sorokin, A.S. Korolkov, Yu.Ye. Shtynda // Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Challenges and Opportunities, FR-09. Kyoto, Japan, 7–11 Dec. 2009. IAEA-CN-176/FR09P1105.
- 14. Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Коновалов М.А. Системы очистки натрия как теплоносителя АЭС с реакторами на быстрых нейтронах (ретроспективно-перспективный взгляд) // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2015. № 3. С. 5–19.
- 15. Системы очистки натриевого теплоносителя АЭС с реактором БН-1200 / В.В. Алексеев, Ю.П. Ковалев, С.Г. Калякин, Ф.А. Козлов, В.Я. Кумаев, А.С. Кондратьев, В.В. Матюхин, Э.К. Пирогов, Г.П. Сергеев, А.П. Сорокин // Теплоэнергетика. 2013. № 5. С. 9–20. doi: 10.1134/S0040363613050019
- 16. Козлов Ф.А., Коновалов М.А., Сорокин А.П. Очистка геттерами жидкометаллических систем с натриевым теплоносителем от кислорода // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 63–69. doi: 10.1134/S0040363616050040
- 17. Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Коновалов М.А. Системы очистки натрия АЭС с реакторами на быстрых нейтронах // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2015. № 3. С. 5–15.
- 18. *Latge C*. Sodium quality control: French developments from Rapsodie to EFR // Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Challenges and Opportunities, FR09. Kyoto, Japan, 7–11 Dec. 2009. IAEA-CN-176/02-08P. P. 104–105.
- 19. Расчеты массопереноса примесей в холодных ловушках с натриевым охлаждением / В.В. Алексеев, Ф.А. Козлов, А.П. Сорокин, Е.В. Варсеев, В.Я. Кумаев, А.С. Кондратьев // Атомная энергия. 2015. Т. 118. Вып. 5. С. 257–261.
- 20. Температурные поля и теплоотдача в раздвинутых решетках твэлов, охлаждаемых тяжелым жидкометаллическим теплоносителем / A.B. Жуков, W0. Кузина, W1. Сорокин, W2. Привезенцев // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2015. № 4. С. 90–100.
- 21. Исследования температурных полей и теплоотдачи в модельных ТВС реактора с тяжелым теплоносителем (однородная геометрия) / Ю.А. Кузина, В.В. Привезенцев, А.П. Сорокин, К.С. Рымкевич // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2017. Вып. 4. С. 15—23. [Обнинск.]
- 22. *Мартынов П.Н., Орлов Ю.И*. Современные подходы к технологии тяжелых теплоносителей // Новые промышленные технологии. 2011. № 1. С. 3–6.

Информация об авторах

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

Кузина Юлия Альбертовна, канд. техн. наук, заместитель генерального директора – директор Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: ukuzina@ippe.ru

Камаев Алексей Альфредович, канд.техн. наук, заместитель директора Отделения ядерных реакторов и топливного цикла АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: kamaev@ippe.ru

Орлов Юрий Иванович, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: orlov@ippe.ru

Алексеев Виктор Васильевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: alexeev@ippe.ru

Грабежная Вера Александровна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: gva@ippe.ru

Загорулько Юрий Иванович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sodium@ippe.ru **УДК 621.039**

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

А. П. Сорокин, Ю. А. Кузина, А. А. Труфанов, В. М. Лощинин, Ю. Д. Левченко, А. В. Морозов

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

Представлены и анализируются результаты первоочередных теплофизических исследований в обоснование характеристик и безопасности водоохлаждаемых реакторов, включая повышение технико-экономических характеристик ядерного топлива, проектные решения пассивной безопасности, устойчивости работы воздушных теплообменников системы пассивного отвода тепла при экстремальных метеорологических условиях. Показано, что уровень критической мощности ТВС зависит как от типа, количества дистанционирующих и перемешивающих решеток, так и места возникновения кризиса. Критические тепловые потоки в нестационарных режимах при снижении расхода теплоносителя на 4% выше, чем в стационарных режимах при тех же параметрах потока. Приведена информация о модернизированной базе оцененных экспериментальных данных по критическим тепловым потокам в ТВС новых конструкций. Представлены данные по изменению давления в основных элементах стенда «РУ-3О» в эксперименте с моделированием аварии с разрывом ГЦТ на входе в реактор и конденсационной мощности модели парогенератора на стенде. Установлено, что снижение конденсационной мощности парогенератора составляет ~30% от мощности на начало возникновения конденсационного режима в парогенераторе при аварии с разрывом ГЦТ. Однако оставшийся уровень мощности достаточен для обеспечения надежного охлаждения активной зоны реактора ВВЭР-1200 в течение не менее 24 часов при совместной работе систем ГЕ-2 и СПОТ. Экспериментальные исследования внешней аэродинамики главного здания Нововоронежской АЭС-2 по обеспечению независимости работы СПОТ от ветра показали, что экстремальные метеорологические условия, включая ураганные ветры, пылевые бури, могут проявиться в снижении мощности части воздушных теплообменников СПОТ. Указаны работы, выполненные в обоснование проекта энергетической ЯЭУ с водой при сверхкритических параметрах с электрической мощностью 1700 МВт и экспериментального реактора ВВЭР-СКД-30 с тепловой мощностью 30 МВт, перечислены проблемы дальнейших теплофизических исследований в области реакторов с водой сверхкритических параметров.

Россия наиболее подготовлена технологически и организационно к реализации двухкомпонентной ядерной энергетической системы с замыканием ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Двухкомпонентная ядерная энергетическая система включает АЭС с легководными и быстрыми реакторами, которые вырабатывают энергию и воспроизводят топливо, и централизованный замкнутый ЯТЦ [1, 2].

Актуальные теплофизические задачи для легководных реакторов включают исследования в первую очередь в обоснование повышения технико-экономических характеристик ядерного топлива для действующих, строящихся и перспективных атомных электростанций (АЭС–2006, ВВЭР–1200, ВВЭР–ТОИ), проектных решений пассивной безопасности при использовании системы пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени и системы пассивного отвода тепла

_

^{*} Опубликовано в журнале «Теплоэнергетика», 2019, № 4, с. 1–9.

СПОТ) от парогенераторов, устойчивости работы воздушных теплообменников СПОТ РУ ВВЭР, в том числе при экстремальных метеорологических условиях, влияния процессов массопереноса борной кислоты, подача которой в активную зону реактора при аварийных режимах АЭС предназначена для его останова, на ее распределение и накопление в активной зоне и ряд других проблем.

Ниже кратко рассмотрены основные результаты, полученные в этих направлениях.

Исследования теплогидравлических характеристик, кризиса теплообмена в активной зоне водоохлаждаемых реакторов

Комплекс исследований проводился на моделях ТВС ВВЭР с 19 имитаторами твэлов с диаметром 9,1 мм, соответствующем натурному твэлу, размещенными с шагом 12,75 мм в треугольной упаковке в шестигранном канале на стенде СВД–2 (рис. 1). Он направлен на обоснование конструкции усовершенствованных решеток-интенсификаторов (РИ) теплообмена с целью повышения критической мощности сборок и, как следствие, на увеличение выработки электроэнергии в реакторных установках типа ВВЭР. По результатам исследований подготовлен проект по расширению опытно-промышленной эксплуатации ТВС-2М с РИ и антидебризным фильтром на блоке № 4 Балаковской АЭС. Планируемое повышение тепловой мощности блока составляет 7% от номинальной.



Рис. 1. Экспериментальная модель для исследований теплогидравлических характеристик и кризиса теплообмена на стенде СВД–2

Результаты исследований показали [3, 4], что уровень критической мощности сборки зависит как от количества дополнительных решеток, их местоположения в сборке, так и от места возникновения кризиса теплоотдачи. Влияние дополнительных решеток на критическую мощность определяется тремя основными факторами: перемешиванием теплоносителя, интенсификацией теплообмена и перераспределением потока теплоносителя по сечению модели ТВС из-за отсутствия обечайки (в полномасштабной сборке этот эффект будет значительно меньше). 4–5 дополнительных решеток, расположенных равномерно от выхода к центру сборки (рис. 2), приводит к увеличению критической мощности в среднем на 7–8%. Если исходить из геометрии РИ, то можно отметить, что воздействие решеток типа «Вихрь» носит достаточно локальный характер — фактически это местная закрутка потока в смежных ячейках без выхода за их пределы (рис. 3а). Решетки типа «Прогонка» (рис. 3б), в принципе, организуют поперечный перенос теплоносителя на более протяженном расстоянии. Тем не менее наибольшее приращение критической мощности сборки получено при установке 4–5 решеток «Вихрь» [3, 4].

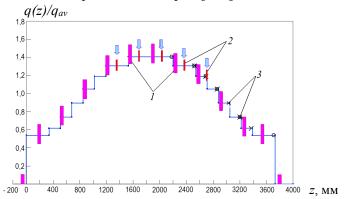


Рис. 2. Расположение решеток в сборке с пятью решетками-интенсификаторами в сопоставлении с распределением тепловыделения по длине сборки: 1 – дистанционирующие решетки, 2 – решетки-интенсификаторы, 3 – термопары

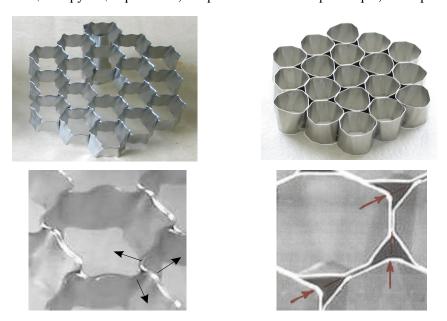


Рис. 3. Перемешивающие решетки-интенсификаторы типа «Вихрь» (а) и «Прогонка» (б)

В ГНЦ РФ – ФЭИ разработана эмпирическая методика учета влияния различных типов дистанционирующих и интенсифицирующих решеток на уровень критического теплового потока при произвольном их расположении [3]. Методика базируется на следующих положениях:

- возможности определения локальных параметров потока в сборках ТВС с учетом особенностей ДР и РИ (ячейковый код ВЯЗ–М);
- предположении, что наличие ДР и РИ вызывает возмущение потока теплоносителя, которое зависит от типа ДР и РИ и затухает по определенному закону (экспоненте), оказывая влияние на величину КТП;
- возможности определять КТП без влияния ДР в необходимом диапазоне режимных параметров, что в реальных условиях, при наличии ДР даст запас в 6–8%.

На стенде СВД-2 были проведены экспериментальные исследования кризиса теплообмена для наиболее неблагоприятного варианта аварийной ситуации — с отключением 4-х ГЦН из 4-х работающих — с использованием аналогичной модели ТВС из 19 имитаторов твэлов натурной длины (3,73 м). Снижение расхода теплоносителя в каждой из петель представлено на рис 4. Вертикальные линии 1 и 2 соответствуют расходу теплоносителя после 4 секунд (при застревании наиболее эффективного стержня ОР СУЗ) и 10 секунд (полное введение стержней ОР СУЗ). На рисунке также указаны величины расхода теплоносителя, соответствующие этим отрезкам времени после отключения четырех ГЦН. Видно, что через 4 секунды расход теплоносителя снижается на 28% и через 10 секунд на 35%.

На рис. 5 приведены данные по изменению параметров в эксперименте при исходной мощности ниже критической при плавном (в соответствии с требованиями) снижении расхода до возникновения кризиса теплообмена. Одновременный рост температуры стенок имитаторов как в центральной области, так и на периферии модели зафиксирован многими термопарами, наблюдается некоторое повышение давления на выходе. Наступление кризиса теплообмена зафиксировано на 7-й секунде после начала снижения расхода. При резком повышении температуры стенок имитаторов на 40 °С мощность, подводимая к модели ТВС, сбрасывалась системой зашиты до безопасного уровня. Снижение мощности привело к снижению

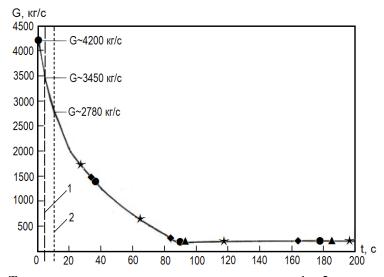


Рис. 4. Темп снижения расхода: вертикальные линии 1 и 2 соответствуют 4 и 10 секундам после отключения ГЦН

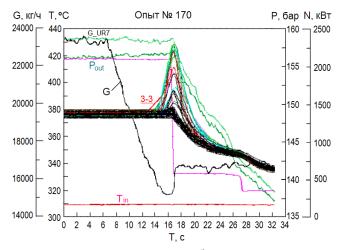


Рис. 5. Изменение режимных параметров при близком к реальному темпу снижения расхода: черная линия – изменение расхода; зеленые – изменение давления; красная – изменение мощности; многочисленные плавные линии – изменение температуры стенок имитаторов твэлов

паросодержания на выходе, снижению гидравлического сопротивления и, соответственно, к некоторому восстановлению расхода.

Таблица 1. Влияние нестационарного режима на величину критического теплового потока при снижении расхода теплоносителя с темпом, близким к проектному, при отключении четырех ГЦН

		· ·				
№ эксп.	Р, бар	ρW, κΓ/(м²c)	TBX, °C	КТП, нестац. режим, кВт/м ²	КТП, стац. режим, кВт/м ²	Различие, %
140	140,2	2513	289,4	2088	2074	0,69
140	140,6	2465	289,3	2095	2046	2,37
1.4.1	140,1	2138	289,2	1855	1836	1,04
141	140,3	2063	288,9	1855	1791	3,58
1.42	140,3	2513	290,1	2084	2064	0,98
142	140,5	2457	290	2084	2031	2,62
1.42	158,5	2501	291,4	2177	2130	2,19
143	158,5	2299	291,7	2188	1985	10,21
1.4.4	160,2	2049	289,9	1939	1840	5,41
144	161,4	2002	289,7	1937	1813	6,84
1.45	171,4	2517	291,5	2312	2235	3,44
145	171,5	2423	291,4	2308	2167	6,53
146	173,8	2096	289,6	2030	1956	3,80
	158	2188	309,4	1712	1658	3,29
148	158,1	2084	309,2	1713	1597	7,30
	175	2022	289,7	2024	1903	6,37
					В среднем:	4,2

Приведенное в таблице 1 сравнение критических тепловых потоков в указанных нестационарных режимах при снижении расхода теплоносителя с данными, полученными при стационарном режиме, давлении и массовой скорости, показывает, что критические потоки в нестационарных режимах при таком сравнении в среднем на 4% выше. Таким образом, корреляция для стационарных режимов является консервативной оценкой при расчёте запасов до кризиса при отключении ГЦН [4].

В рамках этого направления исследований расширена база экспериментальных данных ФЭИ за счет новых оцененных экспериментальных данных по кризису теплоотдачи, перепадам давления, распределений подогрева и массовой скорости по ячейкам в моделях ТВС ВВЭР. В нее включены данные по ТВС новых конструкций и модернизирована структура управляющего программного комплекса [5]. При создании базы данных была проведена экспертиза полноты и соответствия информации об экспериментах в базе данных требованиям нормативного документа РД 03-34-2000 Ростехнадзора. Уточнены описания характеристик экспериментальных моделей ТВС и условий проведения опытов. Кроме того, была выполнена статистическая обработка экспериментальных данных с целью отбраковки некорректных значений, а также проведено сопоставление наборов экспериментальных данных по критическим тепловым потокам для различных моделей ТВС. В результате впервые создана дополненная функциями анализа данных (проверка соответствия выходных параметров исходным данным, сопоставление данных по критическим тепловым потокам с расчетом по эмпирическим корреляциям) база оцененных экспериментальных данных по критическим тепловым потокам в моделях ТВС новых конструкций, предназначенная для разработки, верификации и совершенствования расчетных методов. Созданная база включает в себе данные 5089 экспериментальных режимов, полученных на 60 моделях ТВС различных конструкций в следующем диапазоне параметров: обогреваемая длина — 1,25-4,2 м, давление — 0,1-8,3 МПа, массовая скорость — $23-5131 \text{ кг/м}^2$ с, температура воды на входе в модель ТВС -56–347 °С, критический тепловой поток — 415–5014 кВт/м².

Установлено, что для принятой на сегодняшний день конфигурации ТВС–2М можно обосновать повышение мощности за счет использования дополнительных РИ только до 107%. При разработке топлива реакторов нового поколения (ВВЭР–1200, ВВЭР–ТОИ) необходим новый комплексный подход к разработке конструкции ДР и РИ, то есть включающий в себя совместное решение проблем теплогидравлики и термомеханики ТВС.

Экспериментальные исследования на интегральных стендах совместной работы пассивных систем безопасности АЭС

Легководные реакторы нового поколения («АЭС–2006» и ВВЭР–ТОИ) характеризуются более высоким уровнем безопасности по сравнению с действующими. Повышение безопасности новых проектов АЭС с ВВЭР осуществляется в результате реализации-принципа технологического разнообразия, заключающегося в сочетании активных и пассивных систем безопасности.

К числу новых пассивных систем охлаждения активной зоны, предусмотренных в проекте «АЭС–2006» с реактором ВВЭР–1200 (6-й блок Нововоронежской АЭС), относятся система пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени (СПЗАЗ ГЕ–2) и система пассивного отвода тепла (СПОТ) от парогенераторов (ПГ). В соответствии с требованиями проекта, данные системы должны

обеспечить отвод остаточного энерговыделения от активной зоны в течение не менее 24 часов. Включение новых систем безопасности в проект реакторной установки (РУ) требует обязательного проведения экспериментальных работ по обоснованию их работоспособности [6].

На введенном в эксплуатацию в 2015 г. в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» крупномасштабном теплогидравлическом стенде «РУ-ЗО» с моделями РУ и защитной оболочки (ЗО) (рис. 6), предназначенном для исследования совместной работы пассивных систем безопасности новых проектов АЭС с ВВЭР, были выполнены суточные интегральные эксперименты для определения влияния неконденсирующихся газов, генерируемых в первом контуре, и газов, поступающих за счет массообменных процессов из защитной оболочки, на эффективность теплоотвода от реактора через парогенератор и систему пассивного отвода тепла при запроектных авариях [6, 7]. Эксперименты проводились с целью дополнения ПООБ второй очереди Нововоронежской АЭС апробацией технических решений, касающихся совместной работы пассивных систем безопасности ГЕ–2 и СПОТ.

В экспериментах было проведено моделирование аварий «Разрыв ГЦТ полным сечением» в условиях потери всех источников переменного тока с разрывом ГЦТ на входе и выходе из реактора.

Эксперименты на стенде проводились при начальном давлении 0,35–0,39 МПа, соответствующем давлению в реакторной установке и защитной оболочке в моделируемых авариях. Паропроизводительность рабочего участка стенда моделировала снижение мощности остаточных тепловыделений активной зоны в течение аварии. Мощностная характеристика модели теплообменника СПОТ стенда соответствовала зависимости мощности воздухоохлаждаемого СПОТ от давления пара во втором контуре.



Рис. 6. Модель защитной оболочки стенда «РУ-3О» с размещенным в ней рабочим участком — моделью реактора

На рис. 7 представлено изменение давлений в основных элементах стенда в эксперименте с моделированием аварии с разрывом ГЦТ на входе в реактор. На рис. 8 изображено изменение конденсационной мощности модели парогенератора на стенде «РУ–3О» в том же опыте.

В результате анализа полученных экспериментальных данных было установлено, что снижение конденсационной мощности парогенератора составляет ~30% относительно мощности на начало возникновения конденсационного режима в ПГ при аварии с разрывом ГЦТ. Однако оставшийся уровень мощности достаточен для обеспечения надежного охлаждения активной зоны реактора ВВЭР–1200 в течение не менее 24 часов при совместной работе систем ГЕ–2 и СПОТ.

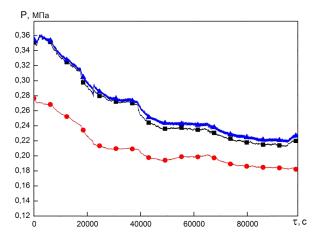


Рис. 7. Изменение давлений в модели 3O (P2), сред первого контура на входе в модель $\Pi\Gamma$ (P10) и второго контура на выходе из $\Pi\Gamma$ (P3) в эксперименте:

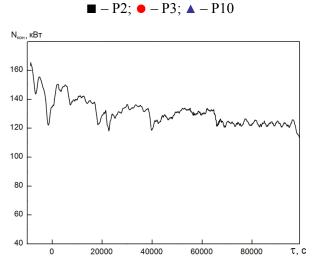


Рис. 8. Изменение конденсационной мощности модели ПГ стенда «РУ-3О» в эксперименте

Исследования внешней аэродинамики главного здания НВАЭС-2 по обеспечению независимости работы СПОТ от ветра.

Проведенные на стенде «СГДИ» на аэродинамической модели главного корпуса НВАЭС-2 (рис. 9) экспериментальные исследования внешней аэродинамики главного здания Нововоронежской АЭС–2 по обеспечению независимости работы СПОТ от ветра показали [8]:

- в связи с конфигурацией главного здания АЭС Нововоронежской АЭС–2 сферическая оболочка реактора, воздухозаборы ТО СПОТ, верхние части воздуховодов ТО СПОТ находятся в зоне разрежения практически при всех направлениях ветра;
- в некотором диапазоне углов обтекания потоком воздуха уровень разрежения при скоростях ветра, больших 18 м/с, сопоставимы с проектным тяговым напором естественной конвекции в воздуховодах ТО СПОТ;
- дефлектор, установленный в верхней точке защитной оболочки, не создает заметного запаса по перепаду давления на длине воздуховодов теплообменников СПОТ.

На рис. 10 в качестве примера дано опытное распределение давления (вернее, отличия от атмосферного) h_3 в точке 3 оболочки реакторного здания при различных направлениях ветра. В качестве масштаба используется скоростной напор ветра h_V перед моделью АЭС, β – угол поворота относительно продольной оси модели АЭС. Конструкция теплообменника СПОТ с ребристыми трубками описана в статье [8].

В результате были экспериментально обоснованы технические решения по системе коллектора воздухозаборов СПОТ — вытяжного дефлектора, при которых уменьшение тепловой мощности ТО СПОТ ВВЭР НВАЭС–2 не происходит при всех направлениях ветра.

Таким образом, экстремальные метеорологические условия (сильные, включая ураганные, ветры, пылевые бури) могут проявиться в снижении мощности части воздушных теплообменников СПОТ. Обоснование устойчивости работы воздушных теплообменников СПОТ при воздействии этого внешнего фактора является одним из необходимых условий достаточности 72 часов для аварийного расхолаживания ВВЭР–ТОИ.



Рис. 9. Экспериментальная модель главного здания НВАЭС–2 в масштабе М 1:200 на поворотном круге аэродинамической трубы

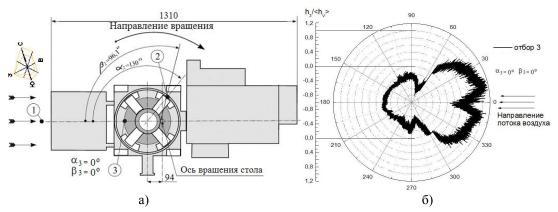


Рис. 10. Избыточное давление в точке 3 сферической оболочки модели реакторного здания при различных направлениях ветра $(h_3/< h_v>=f(\beta)$ (б), 1, 2 и 3 – точки отбора давления (*a*)

Реактор с водой сверхкритических параметров

Работа над проектом ВВЭР–СКД обусловлена огромным опытом разработки и эксплуатации установок с водой сверхкритических параметров в традиционной энергетике [10, 11]. В ГНЦ РФ – ФЭИ совместно с ОКБ «Гидропресс» выполнен комплекс расчетных исследований в обоснование проекта энергетической ЯЭУ с электрической мощностью 1700 МВт и экспериментального реактора ВВЭР–СКД–30 с тепловой мощностью 30 МВт. Определена тепловая схема экспериментальной РУ на сверхкритических параметрах воды мощностью 30 МВт тепл. Проведены расчеты теплогидравлических параметров, сделаны оценки теплообменного оборудования, имеющегося в ГНЦ РФ – ФЭИ [12].

В результате обработки и анализа экспериментальных данных, полученных на воде, разработаны рекомендации по расчету коэффициентов гидравлического сопротивления и теплообмена для труб и пучков стержней [13]. Впервые предложена эмпирическая зависимость для расчета протяженности зоны с локальным ухудшением теплообмена, обнаружена зависимость протяженности зоны ухудшения теплообмена от массовой скорости и плотности теплового потока [14].

Первоочередными НИОКР в области теплогидравлики реактора ВВЭР–СКД являются: экспериментальные исследования теплообмена на модели сборки твэлов при СКП, верификация программы МИФ–СКД, исследование массопереноса и водно-химического режима в ТВС ВВЭР–СКД и процессов радиолиза. Другая важная проблема — выбор и обоснование работоспособности конструкционных материалов под облучением.

Заключение

В результате комплекса исследований на стенде «СВД-2» на моделях ТВС ВВЭР по обоснованию конструкции усовершенствованных решеток-интенсификаторов теплообмена с целью повышения критической мощности и, как следствие, выработки электроэнергии в реакторных установках типа ВВЭР показано, что хотя решетки «Прогонка», организующие протяженный поперечный перенос теплоносителя, должны улучшать перемешивание потока теплоносителя и интенсификацию теплообмена в сборке по сравнению с решетками типа «Вихрь», обеспечивающими лишь местную закрутку потока в ячейках без выхода за их пределы, наибольшее

увеличение критической мощности на 7–8% получено при установке 4–5 решеток «Вихрь» равномерно от выхода к центру сборки.

В результате экспериментальных исследований на стенде «РУ-ЗО» для обоснования работоспособности новых пассивных систем охлаждения активной зоны, включенных в проект «АЭС–2006» с реактором ВВЭР–1200 (6-й блок Нововоронежской АЭС) – относятся система пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени (СПЗАЗ ГЕ–2) и система пассивного отвода тепла (СПОТ) от парогенераторов (ПГ), установлено, что снижение конденсационной мощности парогенератора составляет ~30% относительно мощности на начало возникновения конденсационного режима в ПГ при обоих сценариях аварии. Оставшийся уровень мощности достаточен для обеспечения надежного охлаждения активной зоны реактора ВВЭР–1200 в течение не менее 24 часов при совместной работе систем ГЕ–2 и СПОТ.

Проведенные на стенде «СГДИ» экспериментальные исследования внешней аэродинамики главного здания Нововоронежской АЭС–2 по обеспечению независимости работы СПОТ от ветра показали, что в связи с конфигурацией главного здания АЭС Нововоронежской АЭС–2 сферическая оболочка реактора, воздухозаборы ТО СПОТ, верхние части воздуховодов ТО СПОТ находятся в зоне разрежения практически при всех направлениях ветра. Экспериментально обоснованы технические решения по системе коллектора воздухозаборов СПОТ — вытяжного дефлектора, при которых уменьшения тепловой мощности ТО СПОТ ВВЭР НВАЭС–2 не происходит при всех направлениях ветра. Обоснование устойчивости работы воздушных теплообменников СПОТ при воздействии этого внешнего фактора является одним из необходимых условий достаточности 72 часов для аварийного расхолаживания ВВЭР–ТОИ.

Работа над проектом ВВЭР-СКД обусловлена огромным опытом разработки и эксплуатации установок с водой сверхкритических параметров в традиционной энергетике. В ГНЦ РФ – ФЭИ совместно с ОКБ «Гидропресс» выполнен комплекс расчетных исследований в обоснование проекта энергетической ЯЭУ ВВЭР-СКД с электрической мощностью 1700 МВт и экспериментального реактора ВВЭР-СКД—30 с тепловой мощностью 30 МВт. Первоочередными НИОКР в области теплогидравлики реактора ВВЭР-СКД являются: экспериментальные исследования теплообмена на модели сборки твэлов при СКП, верификация программы МИФ-СКД, исследование массопереноса и водно-химического режима в ТВС ВВЭР-СКД и процессов радиолиза. Другая важная проблема – выбор и обоснование работоспособности конструкционных материалов под облучением.

Список литературы

- 1. *Пономарев-Степной Н.Н.* Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе БН и ВВЭР // Атомная энергия. 2016. Т. 120. Вып. 4. С. 183–191.
- 2. *Аминов Р.З., Щкрет А.Ф., Гариевский М.В.* Тепловые и атомные станции: конкурентность в новых экономических условиях // Теплоэнергетика. 2017. №5. С. 5–15.
- 3. Калякин С.Г., Сорокин А.П., Пивоваров В.А., Пометько Р.С., Селиванов Ю.Ф. Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальные исследования теплофизических процессов в обоснование безопасности реакторов ВВЭР нового поколения // Атомная энергия. 2014. Т. 116. Вып. 4. С. 241-247.
- 4. Пометько Р.С., Смирнов А.М., Василенко И.Н., Вьялицин В.В., Галкин И.Ю., Волков С.Е. Экспериментальные исследования кризиса теплообмена на модели ТВС

- ВВЭР с перемешивающими решетками при отключении ГЦН // Научно-техн. сборник «Итоги научно-технической деятельности института ядерных реакторов и теплофизики за 2014 год» / Под общ. ред. А.А. Труфанова, А.П. Сорокина, Т.Н. Верещагиной. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 2015. С. 264–270. ISBN 978-5-906512-69-7.
- 5. Артамонов С.Н., Сергеев В.В., Гальченко Э.Ф. Создание базы оцененных экспериментальных данных по кризису теплоотдачи в моделях ТВС ВВЭР // Научнотехнический сборник «Итоги научно-технической деятельности отделения безопасности ядерно-энергетических установок за 2015 год» / Под общей редакцией А.А. Труфанова, А.П. Сорокина. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 2016. С. 203—211. ISBN 978-5-906512-81-3.
- 6. Морозов А.В., Калякин Д.С., Шлепкин А.С., Рагулин С.В., Сахипгареев А.Р. Экспериментальное исследование совместной работы пассивных систем безопасности Нововоронежской АЭС-2 на крупномасштабном стенде // Научно-техн. сборник «Итоги научно-технической деятельности отделения безопасности ядерно-энергетических установок за 2015 год» / Под общ. ред. А.А. Труфанова, А.П. Сорокина. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 2016. С. 166—176. ISBN 978-5-906512-81-3.
- 7. *Морозов А.В., Шлепкин А.С., Калякин Д.С., Сошкина А.С.* Исследование работы модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при различных параметрах аварийного процесса // Теплоэнергетика. 2017. №5. С. 16–23.
- 8. Коломиец Д.О., Левченко Ю.Д., Тереник Л.В., Мальцев М.Б., Таранов Г.С. Исследование главного здания АЭС с ВВЭР, оснащенной СПОТ // Научно-техн. сборник «Итоги научно-технической деятельности института ядерных реакторов и теплофизики за 2012 год» / Под общ. ред. С.Г. Калякина, О.Ф. Кухарчука, А.П. Сорокина. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 2013. С. 178–190. ISBN 978-5-906512-26-0.
- 9. Морозов А.В., Сорокин А.П., Рагулин С.В., Питык А.В., Сахипгареев А.Р., Сошкина А.С., Шлепкин А.С. Влияние процессов массопереноса борной кислоты на ее накопление в активной зоне при аварийных режимах АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2017. №7. С. 33–38.
- 10. *Кириллов П.Л*. Переход на сверхкритические параметры путь совершенствования АЭС с водоохлаждаемыми реакторами // Теплоэнергетика. 2003. №9. С. 3–9.
- 11. Дуб А.В., Демешко М.П., Парамонов Д.В., Веселов Д.О., Махин В.М., Кириллов П.Л., Кузина Ю.А., Сорокин А.П., Баранаев Ю.Д., Глебов А.П. Концепция энергоблока с водоохлаждаемой реакторной установкой со сверхкритическими параметрами теплоносителя и быстро-резонансным спектром нейтронов (ВВЭР-СКД) // Доклад на 10-й междунар. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (МНТК-2017), г. Подольск, АО «ОКБ «Гидропресс», 16–19 мая 2017.
- 12. Мохов В.А., Беркович В.Я., Никитенко М.П., Махин В.М., Чуркин А.Н., Лапин А.В., Кириллов П.Л., Баранаев Ю.Д., Глебов А.П. Концептуальные предложения по стенду-прототипу реактора ВВЭР-СКД // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2014. № 34. С. 84–92.
- 13. Грабежная В.А., Кириллов П.Л. Теплообмен в трубах и пучках стержней при течении воды сверхкритического давления // Атомная энергия. 2004. Т. 96. Вып. 5. С. 387-393.
- 14. Карташов К.В., Сорокин А.П., Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Расчетные и экспериментальные исследования в области теплогидравлики ЯЭУ с водяным теплоносителем при сверхкритическом давлении // Научно-техн. сборник «Итоги научно-технической деятельности Института ядерных реакторов и теплофизики за 2014 год» / Под общ. ред. А.А. Труфанова, А.П. Сорокина, Т.Н. Верещагиной. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2015. С. 82—99.

Информация об авторах

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, AO «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

Кузина Юлия Альбертовна, канд. техн. наук, заместитель генерального директора – директор Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: ukuzina@ippe.ru

Труфанов Александр Анатольевич, заместитель директора

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: tral@ippe.ru

Лощинин Валерий Михайлович, начальник лаборатории

Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: lovm@ippe.ru

Левченко Юрий Данилович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: levchenko@ippe.ru

Морозов Андрей Владимирович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: sas@ippe.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБОСНОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ С РЕАКТОРОМ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА И ДРУГИХ ИННОВАЦИОННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ*

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

АО «ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского», г. Обнинск

В результате проведенных нейтронно-физических и теплофизических исследований реакторной установки с БН-ВТ-600 с тепловой мощностью 600 МВт показано, что имеется принципиальная возможность обеспечить требуемые параметры высокотемпературного быстрого реактора для производства большого количества водорода, например, на основе одного из термохимических циклов или высокотемпературного электролиза с высоким коэффициентом теплового использования электроэнергии. Требования безопасности при этом будут соблюдены. Относительная малогабаритность, вид теплоносителя, выбор делящегося вещества и конструкционных материалов позволяют создать реактор с внутренними присущими ему свойствами (исключение разгона реактора на мгновенных нейтронах, пассивное снятие остаточного тепловыделения), обеспечивающими повышенную ядерную и радиационную безопасность.

Для первого контура БН-ВТ-600 количество продуктов коррозии, образующихся при концентрации кислорода в натрии 1 млн⁻¹, превышает 900 кг/год, если оболочки твэлов изготовлены из стали ЭП-912-ВД, и 464 кг/год с оболочкой из молибденового сплава. Для второго контура это 263 кг/год на каждую петлю. С учетом высокотемпературных опытов, в которых показана высокая эффективность удержания взвесей продуктов коррозии на фильтрах, установленных в низкотемпературной зоне, предложено использовать принцип работы холодной ловушки: охлаждать натрий до необходимой температуры с одновременным удержанием продуктов коррозии на поверхностях массообмена, включая фильтры. Разработка необходимого жаропрочного материала и изучение его поведения под облучением требуют дальнейших исследований.

Расчеты для БН-ВТ-600 производства электроэнергии и водорода на основе твердооксидного электролиза массопереноса водорода и трития показано, что к.п.д. такой системы \sim 40%, объем производимого водорода 2,810⁴ л/с. Опасность от трития в готовом продукте возникает после сгорания водорода в атмосфере. Поэтому при расчете параметров второго контура было принято, что предельно допустимая концентрация трития в производимом водороде не должна превышать 3,26 Бк/л. Предельно допустимая концентрация трития в воздухе почти в 1000 раз выше — 2,44 \cdot 10³ Бк/л. Очистка натрия от трития до концентрации, обеспечивающей в производимом водороде предельно допустимую концентрацию, равную 3,26 Бк/л, предъявляет дополнительные требования к системе очистки от водорода на основе принципиально нового метода — вакуумированием через специальные мембраны, при этом коэффициент проницаемости системы очистки второго контура от трития должен превышать 140 кг/с.

Одной из наиболее важных проблем, определяющей в будущем развитие экологически чистой энергетики, безусловно, является вовлечение в топливный цикл водорода. В настоящее время основным способом производства водорода является паровая конверсия метана. Однако с точки зрения долгосрочной перспективы крупномасштабного получения водорода данный способ не является жизнеспособным, так как требует потребления невозобновляемых ресурсов и сопровождается выде-

_

^{*} Опубликовано в сборнике докладов на XI Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК – 2018), Москва, АО «Концерн Росэнергоатом», 23–24 мая 2018 г., 10 с.

лением парниковых газов в окружающую среду. Поэтому, разрабатываются альтернативные способы производства водорода методами расщепления воды с помощью термохимических или электролизных процессов, требующие высокотемпературного источника тепла [1, 2].

Наиболее освоенными в настоящее время высокотемпературными источниками тепла могут служить ядерные реакторы Поколения IV в силу предполагаемого использования таких теплоносителей как газы, жидкие металлы (натрий, свинец), расплавы солей [3—6]. Температура теплоносителя на выходе из активной зоны в этих реакторах может достигать 900—950 °C. Они представляют новый класс мощных реакторов, нацеленных как на производство электроэнергии с высоким КПД (50%), так и обеспечение очень важных технологических процессов при производстве водорода, газификации и ожижении угля, углублённой переработке нефти, преобразовании биомассы в жидкое топливо, в химической промышленности, металлургии и т. д.

В АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» выполнены концептуальные исследования по выбору облика энергетического высокотемпературного быстрого натриевого реактора (БН-ВТ) для создания крупномасштабной атомно-водородной энергетики [7], которые показали, что создание такого реактора является сложной, но реальной технической задачей. На первый план выходит решение вопросов технологического характера, связанных с высоким уровнем температуры в реакторной установке [8]. В настоящей работе большое внимание уделено исследованиям в обоснование создания технологии натриевого теплоносителя при высоких температурах и концентрациях водорода на длительные ресурсы, обсуждению вопросов применения жаропрочных радиационно-стойких высокотемпературных конструкционных материалов, обеспечения их коррозионной стойкости при содержании кислорода в натриевом теплоносителе на уровне 0,1 ППМ. Конкретные оценки выполнены для реактора БН-ВТ 600 МВт (тепл.).

Состав и основные технические характеристики реакторной установки БН-ВТ

Реакторная установка БН-ВТ. В состав реакторной установки (РУ) БН-ВТ входят: ядерный реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, три петли системы аварийного отвода тепла (САОТ), три комплекта оборудования петель второго контура для передачи высокопотенциального тепла от реактора к химическим установкам, производящим водород, или газотурбинной установке для снабжения химических агрегатов электрической энергией. Принципиальная схема ЯЭУ с РУ БН-ВТ представлена на рис. 1.

В состав каждой петли входит промежуточный теплообменник, расположенный внутри корпуса реактора под уровнем натрия, центробежный насос и трубопровод для отвода и возвращения натрия в реактор. Конструктивно способ передачи тепла потребителям разрабатывается совместно с создателями технологических установок.

При разработке облика исследуемого реактора учтены современные требования по безопасности и экономике реакторов будущих поколений. В нём развивается инновационная идеология быстрых реакторов на основе достигнутых значительных успехах в технологии БН. За основу конструкции реактора выбран успешно работающий уже более 30 лет реактор типа БН-600. Основные технические характеристики БН-ВТ приведены в таблице 1.

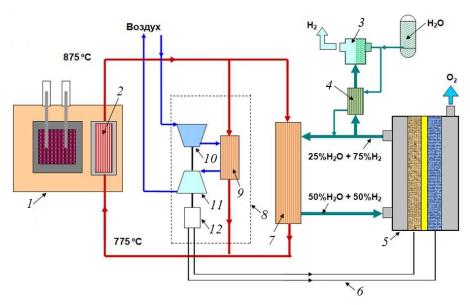


Рис. 1. Схема реакторной установки для производства электроэнергии и водорода на основе технологии твердооксидного электролиза воды:

1 – быстрый реактор; 2 – промежуточный теплообменник; 3 – сепаратор водорода; 4 – теплообменник; 5 – твердооксидный электролизер; 6 – электроэнергия на электролизер; 7 – парогенератор; 8 – газотурбинная установка; 9 – теплообменник; 10 – компрессор; 11 – турбина; 12 – электрогенератор

Таблица 1. Основные технические характеристики БН-ВТ

Наименование технического параметра, размерность				
Номинальная тепловая мощность, МВт				
Количество теплоотводящих петель	3			
Температура теплоносителя, °С:				
на входе в активную зону	800			
– на выходе из активной зоны	900			
– на входе в ПТО	775			
– на выходе из ПТО	875			
Расход натрия через один ПТО, кг/с	1379			
Абсолютное давление теплоносителя на входе в активную зону, МПа	≤ 1,0			
Избыточное давление в газовом объеме реактора, МПа	0,054			

Предлагается интегральная компоновка основного оборудования первого (радиоактивного) контура в баке реактора с основным и страховочными корпусами, что способствует достижению высокого уровня безопасности и позволяет исключить боксы вспомогательных систем I контура. Основной корпус реактора, предназначенный для размещения внутрикорпусного оборудования, натрия и аргона первого контура и организации циркуляции натрия первого контура, представляет собой вертикальный цилиндрический бак, имеющий конусную крышу и эллиптическое днище с опорным кольцом. Корпус реактора находится в контакте: с внутренней стороны — с натрием, за исключением верхней части (крыши), контактирующей с аргоном газовой подушки реактора, а с наружной стороны — с аргоном, находящимся в страховочной полости, и воздухом шахты реактора вне страховочной полости.

Внутри корпуса располагается активная зона, промежуточные теплообменники, ГЦН первого контура, аварийные теплообменники расхолаживания, электрохимический датчик водорода, электрохимический датчик кислорода и углерода, труба заполнения, трубы газовой компенсации и перелива, система контроля герметичности оболочек. В связи с большими габаритами холодные ловушки (ХЛ) вынесены за пределы корпуса реактора.

Характеристики ядерного реактора. В качестве начального этапа, а также исходя из готовности технологии БН, предлагается максимально сохранить конструкцию реактора, использовать урановое оксидное топливо, изменив только уровень температур. Основная цель на этом этапе — выявить узкие места с точки зрения уже отлаженной конструкции, оставив вопрос о конструкционных материалах пока открытым. Существующая высокая культура проектирования БН и технические решения, проверенные длительной эксплуатацией, должны способствовать реализуемости установки [9].

Конструкции ТВС, компоновка активной зоны и картограмма загрузки БН-ВТ аналогичны БН-600 [10]. Активная зона БН-ВТ состоит из набора сборок — ТВС, стержней СУЗ, ИН, ССЗ и СБЗ, расположенных в реакторе по треугольной решетке со средним шагом 98,35 мм. Активная зона включает в себя 369 урановых ТВС трех типов обогащения, 27 стержней СУЗ, два источника нейтронов. По радиусу активная зона разбита на три зоны, отличающиеся друг от друга обогащением топлива. ТВС содержат части верхнего и нижнего торцевых экранов из таблеток диоксида обедненного или естественного урана, размещеных в общей оболочке с топливными таблетками. Вокруг активной зоны размещены сборки боковой зоны воспроизводства.

Исходя из соотношения мощностей действующего реактора БН-600 и проекта реактора БН-ВТ можно предположить, что при понижении тепловой мощности с 1470 МВт до 600 МВт (~ 2,5 раза) межперегрузочный интервал можно увеличить с 140 сут. до практически годового — 330 сут. Эффективности системы компенсаторов без переделки с запасом должно хватить для компенсации выгорания, а увеличенный температурный эффект реактивности (изотермический разогрев реактора от температуры перегрузки до входной на номинальной мощности) можно компенсировать с учётом этого запаса. Остальные эффекты реактивности не должны сильно изменится. Основные характеристики реакторного блока приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные характеристики реакторного блока БН-ВТ

Характеристика	Величина
Мощность (тепловая), МВт	600
Ядерное топливо	UO_2
Размеры активной зоны ($D \times H$) по корпусу, мм	3900×1300
Толщина отражателя, мм	200
Размер «под ключ» и толщина стенки шестигранного чехла ТВС, мм	96×2
Количество твэлов в ТВС	127
Материал чехла ТВС, оболочки твэлов и дистанционирующей прово-	
локи	ЭП-912-ВД
Диаметр и толщина оболочки твэл (d × δ), мм	6,9×0,4

Поперечный размер дистанционирующей проволоки, мм	
 для 91 центрального твэла 	Ø1,05
 для 36 периферийных твэлов 	0,6×1,3
Размеры топливной таблетки (втулки), мм	
– наружный диаметр	Ø5,9
– внутренний диаметр	Ø1,7
Высота активной зоны, мм	1030
Высота торцевых зон воспроизводства, мм	
– верхней	300
– нижней	350
Высота газовой полости, мм	617
Полная длина ТВС, мм	3500
Время между перегрузками, сут.	330
Температура перегрузки, °С	230
Максимальная температура оболочки твэл, °С	1025
Полный температурный эффект реактивности	
$(230^{\circ}\text{C} \to \text{T}_{\text{BX}}) (230^{\circ}\text{C} \to 368^{\circ}\text{C}) / (230^{\circ}\text{C} \to 800^{\circ}\text{C})$	-1,431
Полный мощностной эффект реактивности ($T_{\text{вх}} \rightarrow N_{\text{ном.}}$)	-0,452

Некоторые конструкционные вопросы и вопросы безопасности

Особенностью работы реактора в составе комплекса по производству водорода является необходимость учета вероятности попадания водорода по тракту теплоносителя в активную зону реактора. Проведенные расчетные исследования показали (табл. 3), что попадание водорода в пределах возможных допусков практически не сказывается на нейтронно-физических характеристиках реактора и не сказывается на параметрах безопасности реактора.

Таблица 3. Изменение реактивности реактора в зависимости от наличия водорода в теплоносителе

Содержание	Реактивность,	Относительное изменение потери реактивно-
водорода	вносимая водородом	сти реактора при работе в течение 1 года на
в натрии,	в составе натрия,	мощности 600 МВт,
pcm	$\%\Delta K/K$	$[(%\Delta K/K)h/(%\Delta K/K)0](t)$ %, $T = 365$ эфф. сут.
0	0,000	0,00
50	0,0081	-2,54
100	0,014	-2,51
150	0,022	-2,49
200	0,027	-2,48
250	0,032	-2,47

В результате проведенных материаловедческих исследований показана возможность использования при повышенных концентрациях водорода в натрии и концентрациях кислорода меньших 2 млн⁻¹ ряда конструкционных материалов (молибдена, ниобия, сталей ЭИ-847, ЭП-912-ВД, ЭИ-732) при температуре натрия до 750 °C.

Высокий уровень температуры увеличивает возможность закипания натрия. Удаление натрия вызывает незначительный отрицательный натриевый пустотный эффект реактивности, что обусловлено урановым топливом. Таким образом, можно не требовать значительного увеличения давления в первом контуре. Для организации замкнутого топливного цикла имеется возможность рассмотреть уран-ториевый цикл с близкими характеристиками эффектов реактивности.

Стойкость твэла — ключевая проблема для высокотемпературного реактора. В предлагаемой конструкции РУ ситуация смягчена за счёт выбора низкой тепловой нагрузки на твэлы. Дополнительно можно снизить максимальное выгорание.

Самым сложным в конструкционном плане является выбор высокотемпературного материала для реакторных условий. Для оболочек твэлов необходимы сплавы, имеющие высокую жаропрочность и являющиеся коррозионно-стойкими в натриевом теплоносителе при температурах 900—1200 °С, являющиеся радиационно стойкими до уровня 100 сна. В качестве таких сплавов могут быть рассмотрены молибденовые и ниобиевые сплавы, обладающие технологичностью и высокими жаропрочными свойствами, удовлетворительной коррозионной стойкостью в натриевом теплоносителе.

Наиболее подходящими конструкционными материалами могут служить сплавы на основе молибдена, однако использование таких материалов приводит к заметному поглощению нейтронов, что требует изменения обогащения топлива. По предварительным оценкам при максимальном содержании молибдена, учитывая значительный запас по реактивности, увеличение обогащения топлива не приведет к нарушению требований по безопасности реактора в процессе работы и при аварийных ситуациях. Можно сделать вывод, что проблема использования конструкционного материала на основе молибдена может быть решена за счет изменения изотопного состава топлива.

В качестве возможного варианта конструкционного материала рассмотрена сталь ЭП-912-ВД. Этот сплав, в стандартных обозначениях X15H35B10Б (разработка ВИАМ и ФЭИ), является одним из перспективных конструкционных материалов для работы в контакте с натриевым, натрий-калиевым теплоносителем и в атмосфере воздуха при температуре 900—950 °C. Высокая кратковременная и длительная прочность сплава сочетается с высокими характеристиками пластичности и вязкости при температурах до 950°C и температуре горячей деформации, стабильностью структуры и механических свойств, хорошей коррозионной стойкостью в натриевом, натрий-калиевом теплоносителе, а также высокой окалиностойкостью. Аргоннодуговую сварку листов толщиной до 12 мм рекомендуется выполнять с использованием сварочной проволоки марки XH60BT, 06X15H60M15 и X15И35В12, которые обеспечивают высокую стойкость металла шва против образования горячих трещин.

Важной характеристикой является отсутствие в составе молибдена (табл. 4).

Таблица 4. Химический состав высоконикелевой нержавеющей стали ЭП-912-ВД [11]

С	Si	Mn	S	P	W	Ni	Nb	Fe
0,03	0,32	0,06	0,005	0,005	9,13	35,97	0,93	Ост.

Альтернативным материалом является сталь жаропрочная хромоникелевая сталь аустенитного класса марки 07X15H30B5M2 (ЧС81), разработанная в ЦНИИКМ «Прометей» (табл. 5). Она рекомендована для работы при температуре 900—950 °С Проведенные в ЦНИИКМ «Прометей» исследования прочностных характеристик,

коррозионной стойкости в натриевом, натрий-калиевом теплоносителях, термической стабильности показали, что указанная сталь обладает комплексом физико-механических и технологических свойств, необходимых для работы в условиях высокотемпературных натриевых реакторах. Механические свойства стали после облучения сохраняются на достаточно высоком уровне. Исследования, проведенные в ФЭИ и в ЦНИИКМ «Прометей», показали, что сталь ЧС81 обладает хорошей свариваемостью и позволяет получать сварные соединения как при сварке без присадочного материала, так и при использовании присадочной проволоки ХН50МГВ.

Сравнение реактивности, вносимой в реактор конструкционными материалами из этих сталей, показано в следующей таблице 6.

С	Si	i	Mn	S	P		W		Cr	Ni
≤ 0,07	≤ 0	,2	0,8–1,2	≤ 0,01	≤ 0,01	15	4,5–5,5	14	4,0–17,0	29,0–31,0
Mo			Ti	Al			ДР		Ста	андарт
1,8-2,	2		≤ 0,06	≤ 0,1	12		$Cu \le 0.08;$ $N \le 0.03;$ $Fe \le oct;$ $Y \le 0.05$			1-3970-85 1-4244-87

Таблица 6. Вклад элементов конструкционных материалов активной зоны в эффективный коэффициент размножения, $K_{^{3}\Phi}$

Химический	ЭП-9	12-ВД	ЧС-81		
элемент	$(\Delta K/K)$	Нуклидный состав	$(\Delta K/K)$	Нуклидный состав	
Fe	$-1,08\cdot10^{-2}$	25,9%	$-8,78\cdot10^{-3}$	22,6%	
Cr			$-3,35\cdot10^{-3}$	8,6%	
Ni	$-1,67 \cdot 10^{-2}$	39,9%	$-1,40\cdot10^{-2}$	36,0%	
Mo			$-3,12\cdot10^{-3}$	8,0%	
W	$-1,43\cdot10^{-2}$	34,3%	$-8,42\cdot10^{-3}$	21,7%	
Mn			$-1,16\cdot10^{-3}$	3,0%	
Сумма	$-4,18\cdot10^{-2}$		$-3,88\cdot10^{-2}$		

Для сравнения конструкционные материалы активной зоны (сталь ЧС-68 х.д.) в реакторе БН-600 вносят реактивность в реактор, равную $-2,218\cdot10^{-2}$ ($\Delta K/K$). Это отличие может быть скомпенсировано органами СУЗ.

Исходя из этого сравнения, предпочтение может быть отдано ЧС-81. Окончательный выбор может быть сделан после всестороннего исследования различных конструкционных материалов, применительно к высокотемпературному реактору.

Технология натрия

Поведение примесей в контурах БН-ВТ при различных режимах эксплуатации. Теплосъем с использованием в реакторной установке теплоносителя сопровождается его взаимодействием с присутствующими в жидкометаллической системе примесями и негативным их воздействием на конструкционные материалы. Направление этих процессов определяется разностью химических потенциалов [13]. С использованием зависимости констант, характеризующих процессы тепломассопереноса от температуры (формула Аррениуса)

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$
,

(k- константа, характеризующая процесс; k_0- постоянный множитель; E- энергия активации; R- универсальная газовая постоянная $(R=8,31\ \text{Дж/(моль·K}))$; T- абсолютная температура, K), видно, что при рассмотрении конкретных процессов жид-кометаллической системы, например, диффузия, проницаемость, растворимость, скорость абсорбции, равновесные давления газов, при переходе к высоким температурам их значение будет возрастать.

Возрастание константы для конкретного из перечисленных выше процессов определяется его энергией активации и ростом температуры. Но $T_2/T_1 \le 2$, а энергия активации изменяется от сотен до десятков тысяч Дж/моль K, а для такой характеристики, как равновесное давление водорода над натрием она практически не зависит от температуры. Наибольшие значения характерны для процессов диффузии, проницаемости в твердых телах и для кинетики скорости процессов абсорбции газов. Для растворимости примесей энергия активации на порядок и более низкая, чем энергии активации для диффузионных процессов. Следует заметить, что для одного и того же процесса энергии активации для различных материалов могут отличаться в несколько раз, в некоторых случаях на порядок.

Качественный анализ поведения примесей в жидкометаллических системах БН-ВТ в различных режимах эксплуатации показывает, что очистка теплоносителя от примесей в режимах приёма натрия из транспортных емкостей, ПНР и стояночных может производиться ХЛ. В режимах приёма натрия из транспортных емкостей и ПНР могут быть использованы обычные схемы подключения ХЛ. В стояночных режимах, если они реализуются после режимов выхода на номинальные параметры и эксплуатации на номинальных параметрах, следует учитывать неизбежное появление радиоактивности в теплоносителе.

В высокотемпературных системах при концентрациях углерода десятки млн⁻¹, его термодинамическая активность из-за высокой растворимости в натрии по сравнению с ЯЭУ типа БН-600 возрастает на порядки. Поэтому, во избежание науглероживания конструкционных материалов, может потребоваться очистка от углерода горячей ловушкой перед выходом на номинальные параметры.

Очистка в режимах эксплуатации на номинальных параметрах и стояночных требовала специального анализа, так как интенсивность источников водорода, трития, продуктов коррозии возрастает на порядки.

Очистка натрия от водорода и трития в высокотемпературной ядерной энергетической установке. Особенность поведения водорода, трития и цезия и очистки от них рассмотрена в работах [14, 15]. Поэтому остановимся лишь на основных результатах, полученных для БН-ВТ мощностью 600 МВт.

При возрастании потоков водорода из третьего контура во второй на два-три порядка по сравнению с источниками водорода на АЭС с БН-600 создание компактных систем очистки (СО) с необходимой производительностью возможно при концентрациях водорода десятки миллионов в минус первой степени, так как производительность СОР в первом приближении пропорциональна концентрации водорода в натрии. При этом очистку натрия от водорода и трития следует производить не холодной ловушкой (ХЛ), а вакуумированием их через мембраны из вана-

дия или ниобия. Сочетание этих двух факторов позволит создать компактные высокоэффективные системы очистки натрия от водорода.

Очистка натрия от трития до концентраций, обеспечивающих в производимом водороде его предельно допустимую концентрацию (ПДК) 3,6 Бк/л, предъявляет более жёсткие требования к системе очистки от водорода: её производительность (коэффициент проницаемости, а следовательно, и габариты) необходимо увеличить. При выполнении этих условий для ЯЭУ БН-ВТ основная масса трития, 98%, будет аккумулироваться в компактных системах очистки (СО) натрия второго контура, 0,6% ($\sim 4\cdot 10^4$ Бк/с) поступит в окружающую среду, а 1,3% — в производимый продукт. При выбросе в компактных ОС $\sim 4\cdot 10^4$ Бк/с требования обеспечения нормальной экологической обстановки, изложенные в [16], могут быть легко удовлетворены использованием методов, широко применяемых сегодня в атомной промышленности.

Поскольку значительная масса трития аккумулируется в компактных СО, при масштабном использовании таких ЯЭУ вопрос о дальнейшей судьбе водорода требует специального рассмотрения.

Поведение продуктов коррозии в установках с натриевым теплоносителем. Продукты коррозии при эксплуатации установок постоянно поступают в натрий. Многочисленные исследования коррозии конструкционных материалов в монографиях [17, 18]. Исследования в этой области продолжаются в последние 20 лет см., например, [19, 20].

Результаты оценки интенсивности источников ПК в контурах БН-ВТ приведены в таблице 7.

Следует заметить, что в неизотермической системе скорость коррозии в высокотемпературной зоне должна зависеть от разности температур в горячей и холодной зонах контура: с её уменьшением в высокотемпературной зоне она должна уменьшаться. В результате оценок, проведенных нами, принято, что количество ПК, поступающих в натрий, уменьшается в 6 раз.

Таблица 7. Интенсивность поступления ПК в натрий первого и второго контуров БН-ВТ при работе на номинальных параметрах, кг/год

Γ	Второй контур*)				
Гомогенная система	Гетерогенная с	истема	Гомоген	ная система	
Всё оборудование ЭП-912-ВД	ТВЭЛ молибден (сплавы)	ПТО ЭП-912-ВД	ПТО Трубопро Д ЭП-912-ВД ЭП-912-		
900	пренебрежимо мало	464	662	914	
*)на шесть петель второго контура в натрий каждой петли этого контура поступает 263 кг/год					

Система очистки натрия от продуктов коррозии (СОПК). Известно, что эффективность XЛ при очистке натрия современных АЭС от ПК низкая. Однако специальными опытами было показано, что на сетчатом фильтре, установленном за теплообменником, в котором температура натрия понижалась с 750° С (при этой температуре натрий омывал источник примесей ПК) до 420° С эффективно удерживаются ПК, причём коэффициент удержания продуктов коррозии по оценкам близок к единице, а доля примесей осевших на поверхности теплообменной трубки $\sim 3\%$ от количества ПК найденных в фильтре. Учитывая эти результаты, для разработки СОПК был выбран принцип работы XЛ: натрий охлаждается до необходимой температуры с последующим удержанием взвесей продуктов коррозии на сетчатых фильтрах.

Выводы

Результаты проведенных нейтронно-физических и теплофизических исследований реакторной установки БН-ВТ 600 МВт (тепл) показали, что имеется принципиальная возможность, опираясь на существующую конструкцию реактора типа БН-600, обеспечить требуемые параметры высокотемпературного реактора на быстрых нейтронах для производства больших количеств водорода, например, на основе одного из термохимических циклов или высокотемпературного электролиза с высоким коэффициентом теплового использования и с высоким КПД производства электроэнергии, удовлетворяя при этом требованиям безопасности.

С учётом имеющихся результатов высокотемпературных опытов (максимальная температура 900 и 750 °C), в которых показана высокая эффективность удержания взвесей ПК на фильтрах (коэффициент удержания близок к единице), установленных в низкотемпературной зоне, предложено при разработке СО от продуктов коррозии использовать принцип работы ХЛ: охлаждать натрий до необходимой температуры с одновременным удержанием ПК на поверхностях массообмена, включая фильтры.

На основе полученных результатов по предложенной методике расчёта массопереноса водорода и трития с учётом в натриевых контурах реакторной установки типа БН-ВТ 600 МВт (тепл) для производства электроэнергии и водорода на основе технологии твердооксидного электролиза воды с учетом применения принципиально иного метода очистки — удаление водорода и трития из натрия вакуумированием их через специальные мембраны, — показано, что КПД такой системы равно $\sim 40\%$, а объём производимого водорода равен $2.8\cdot 10^4$ л/с (при нормальных условиях). Реальная опасность от трития в готовом продукте возникает после сгорания водорода в атмосфере. При этом основная масса трития будет присутствовать в виде соединения НТО. Поэтому при расчетах параметров системы очистки и рабочих концентраций водорода и трития в натрии второго контура было принято, что предельно допустимая концентрация трития в производимом водороде не должна превышать 3,26 Бк/л. Значения ПДК трития в воздухе почти на три порядка выше — $2,44\cdot10^3$ Бк/л. Очистка натрия от трития до концентраций, обеспечивающих в производимом водороде ПДК равную 3,26 Бк/л, предъявляет дополнительные требования к системе очистки от водорода: коэффициент проницаемости системы очистки второго контура по тритию должен превышать 140 кг/с.

Реактор БН-ВТ с тепловой мощностью 600 МВт при использовании 30% мощности для производства водорода с эффективностью 50% мог бы производить около $0.6 \cdot 10^6 \,\mathrm{m}^3$ водорода в сутки, что достаточно для современного крупного предприятия, перерабатывающего сырую нефть среднего качества и других технологий.

Список литературы

- 1. International Atomic Energy Agency, Hydrogen as an Energy Carrier and its Production by Nuclear Power: IAEA-TECDOC-1085, IAEA, Vienna, 1999.
- 2. *Морозов А.В., Сорокин А.П.* Способы получения водорода и перспективы использования высокотемпературного быстрого натриевого реактора для его производства // 21-я конф. по структурной механике в реакторной технологии (SMIRT–21). Докл. на семинаре по высокотемпературным проектам. 14–15 ноября 2011, Калпаккам, Индия.
- 3. Innovation in Nuclear Energy Technology. NEA, N. 6103, OECD Nuclear Energy Agency, 2007.
- 4. Альбицкая Е.С. Развитие ядерно-энергетических систем // Атомная техника за рубежом. 2013. №11. С. 3–16.

- 5. Дегтярев А.М., Коляскин О.Е., Мясников А.А. и ∂p . Жидкосолевой подкритический реактор-сжигатель трансплутоновых актиноидов // Атомная энергия. 2013. Т. 114. Вып. 4. С. 183–188.
- 6. Говердовский А.А., Овчаренко М.К., Белинский В.С. и др. Электроядерный подкритический бланкет на модульном принципе построения активной зоны с жидкометаллическими расплавами делящихся фторидов урана (UF₄) и плутония (PUF₃) во фторидном растворе FLINAK // Тез. докладов конф. «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2013)», г. Обнинск, 30 октября 1 ноября 2013 г. Обнинск: ФГУП «ГНЦ $P\Phi \Phi ЭИ$ », 2013. С. 10–13. ISBN 978–5–906512–27–7.
- 7. Поплавский В.М., Забудько А.Н., Петров Э.Е. и др. Физические характеристики и проблемы создания натриевого быстрого реактора как источника высокопотенциальной тепловой энергии для производства водорода и других высокотемпературных технологий // Атомная энергия. 2009. Т. 106. №3. –С. 129–134.
- 8. Сорокин А.П., Козлов Ф.А. Состояние и задачи исследований по технологии высокотемпературного натриевого теплоносителя / 21–я конф. по структурной механике в реакторной технологии (SMIRT–21), 2011. Доклад на семинаре по высокотемпературным проектам. 14–15 ноября 2011, Калпаккам, Индия.
- 9. *Матвеев В.И., Хомяков Ю.С.* Техническая физика быстрых реакторов с натриевым теплоносителем / Учебное пособие для ВУЗов. Под редакцией чл.-корр. РАН В.И. Рачкова. Москва: Издательский дом МЭИ, 2012. С. 38–42.
- 10. Казанский Ю.А., Троянов М.Ф., Матвеев В.И. и др. Исследование физических характеристик реактора БН-600 // Атомная энергия. 1983. Т. 55. Вып. 1. С. 9–14.
- 11. Кольцов А.Г., Рощупкин В.В., Ляховицкий М.М., Соболь Н.Л., Покрасин М.А. Экспериментальное исследование физико-механических свойств конструкционной стали ЭП-912. URL: http://archive.nbuv.gov.ua/portal/soc_gum/vsunu/2011_12_1/Kolcov.pdf.
- 12. Металлы и сплавы: марки и химический состав / Сост. И.В. Беккерев, ред. В. Беккерев. Ульяновск: УлГТУ, 2007. ISBN 978–59795–0042–3. Дополненное издание. URL: http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-73/index.htm
 - 13. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959.
- 14. *Kozlov F.A.*, *Sorokin A.P.*, *Alekseev V.V. et al* The High_Temperature Sodium Coolant Technology in Nuclear Power Installations for Hydrogen Power Engineering // Thermal Engineering. 2014. Vol. 61. No. 5. P. 348–356.
- 15. Козлов Ф.А., Коновалов М.А., Сорокин А.П., Алексеев В.В. Особенности массопереноса трития в высокотемпературной ЯЭУ с натриевым теплоносителем для производства водорода // Тез. докладов конф. «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2013)», г. Обнинск, 30 октября 1 ноября 2013 г. Обнинск: ФГУП «ГНЦ РФ ФЭИ», ISBN 978—5–906512—27—7, 2013. С. 197—198.
- 16. Беловодский Л.Ф., Гаевой В.К., Гришмановский В.И. Тритий. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- 17. Невзоров Б.А., Зотов В.В., Иванов В.А., Старков О.В., Краев Н.Д., Умняшкин Е.Б., Соловьев В.А. Коррозия конструкционных материалов в жидких щелочных металлах. М.: Атомиздат, 1977.
- 18. *Бескоровайный Н.М., Иолтуховский А.Г.* Конструкционные материалы и жидкометаллические теплоносители. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 19. *Краев Н.Д. и др.* Коррозия и массоперенос конструкционных материалов в натриевом и натрий-калиевом теплоносителях // Известия вузов. Ядерная энергетика. 1999. № 3. С. 40–48.
- 20. Zhang J., Marcille T.F., and Kapernick R. Theoretical Analysis of Corrosion by Liquid Sodium and Sodium-Potassium Alloys // Corrosion. 2008. V. 64. No. 7. P. 563–573.

Информация об авторах

- Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru
- Гулевич Андрей Владиславович, д-р техн. наук, заместитель генерального директора директор Отделения ядерных реакторов и топливного цикла АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: gulevich@ippe.ru
- Камаев Алексей Альфредович, канд. техн. наук, заместитель директора Отделения ядерных реакторов и топливного цикла АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: kamaev@ippe.ru
- Кузина Юлия Альбертовна, канд. техн. наук, заместитель генерального директора директор Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: ukuzina@ippe.ru
- Иванов Анатолий Петрович, заместитель директора

Отделения т ядерных реакторов и топливного цикла АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: ivanov@ippe.ru

Алексеев Виктор Васильевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: alexeev@ippe.ru

Морозов Андрей Владимирович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sas@ippe.ru

УДК 621.039.546.8:536.24

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТВС НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛОВ*

Г. П. Богословская, Н. А. Денисова, А. П. Сорокин, А. А. Труфанов

АО «ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»

Изложена методика расчета температурного режима и напряженно-деформированного состояния твэлов в процессе кампании с учётом эффектов деформации и локального распределения температуры по азимуту твэлов в тепловыделяющих сборках (ТВС) быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. Использование поканальной методики теплогидравлического расчета, реализованной в программе МИФ, позволило учесть влияние на температурный режим твэлов формоизменения ТВС, случайного отклонения исходных параметров и других факторов. Представлены и анализируются полученные результаты расчетов температурного режима и напряженно-деформированного состояния твэлов в ТВС активной зоны быстрого реактора типа БН-600 в процессе кампании при дистанционировании твэлов проволочной навивкой. Показано воздействие радиационных эффектов на температурный режим и напряженно деформированное состояние твэлов. Стохастический расчет температурного режима твэлов с учетом радиационного формоизменения твэлов в процессе кампании указывает на значительное повышение уровня температуры оболочки отдельных твэлов (~60 °C) и увеличение максимальной азимутальной неравномерности температуры твэлов (до 65 °C) в сечении с максимальным формоизменением (~100 мм ниже центра активной зоны) по сравнению с номинальным расчетом ТВС. Температурный режим твэлов на выходе из активной зоны не сильно отличается от номинального. Максимальные значения напряжений имеют место в сечении с максимальным формоизменением. В начале кампании максимальные осевые сжимающие напряжения соответствуют пику температур — $\sigma_r = -180 \text{ M}\Pi a$, наибольшие растягивающие напряжения составляют $\sigma_z = 14 \text{ кг/мм}^2$. Окружные напряжения составляют $\sigma_\theta = 50 \text{ M}\Pi a$. В конце кампании вследствие влияния неравномерного распухания материала оболочки на внутреннем волокне оболочки напряжения сжатия переходят в напряжения растяжения и повторяют характер распределения температуры по периметру оболочки. Максимальные осевые растягивающие напряжения в конце кампании составляют $\sigma_z = 340 \text{ M}$ Па. Окружные напряжения достигают также 340 МПа. Максимальное значение осевых напряжений в области выхода из активной зоны не превышает 69 МПа, а окружных напряжений 50 МПа. Максимальные неупругие накопленные деформации ($\varepsilon_c = 1,5\%$) имеют место в точке наибольшего распухания и высокого уровня окружных напряжений.

Одной из важных проблем разработки энергетических реакторов на быстрых нейтронах является обеспечение надёжной работы тепловыделяющих сборок (ТВС). От успешного ее решения существенным образом зависят экономические показатели и уровень безопасности реакторной установки [1]. ТВС находятся в очень жестких условиях эксплуатации: высокий уровень рабочих температур и облучения, длительное воздействие изменяющихся нагрузок, коррозионно-эрозионное воздействие среды теплоносителя [2–4]. Эти условия определяют требования к материалам и конструкции ТВС, которые должны обеспечивать их надёжную работу.

При высоких плотностях потока и флюенса нейтронов происходит существенное изменение свойств конструкционных материалов: вакансионное охрупчивание,

^{*} Опубликовано в журнале «Атомная энергия». – 2016. – Т. 120. – Вып. 6. – С. 341–346.

радиационная ползучесть, значительная потеря пластичности, уменьшение длительной прочности.

Таким образом, работоспособность оболочки твэлов реактора определяется многими факторами: нейтронным потоком, уровнем температуры оболочки и топлива, неравномерностью температуры, давлением распухающего топлива и газовых продуктов деления, химическим составом и технологией ее изготовления, ползучестью, распуханием и коррозией материала оболочки, химическим взаимодействием между топливом и оболочкой и т. д. Её обеспечение связано с необходимостью изучения многих сложных проблем.

Существенное влияние на работоспособность оболочки твэлов оказывают неравномерности температурного и нейтронное полей [5–7]. В условиях азимутальной неравномерности температуры оболочки твэлов 100 °C напряжение разрушения снижается в 3 раза [8].

Исследования для реакторов на быстрых нейтронах показали, что формоизменение ТВС и индивидуальных твэлов в активной зоне реакторов в процессе кампании за счет радиационных эффектов и неравномерного энерговыделения может привести к весьма значительному изменению уровня и азимутальной неравномерности температуры твэлов [9–11].

Величина эффектов, естественно, определяется характером деформации ТВС. Неравномерность температуры по периметру оболочки для свободного твэла приводит к искривлению его оси, а в случае стеснённых деформаций, обусловленных плотной упаковкой внутри чехла ТВС быстрого реактора, вызывает дополнительные температурные напряжения. Эти напряжения могут превышать напряжения от других составляющих нагрузки (внутреннего давления, перепада температуры по толщине оболочки).

Другой причиной появления дополнительных напряжений в условиях неравномерного температурного поля является неравномерное распухание материала оболочки. В случае стеснения деформации неравномерное распухание вызывает дополнительные напряжения, которые являются одной из причин неравномерной тепловой и радиационной ползучести материала оболочки и могут привести к локализации неупругих накопленных деформаций. Другой причиной неравномерной ползучести является само неравномерное по периметру и толщине оболочки твэла температурное поле: скорость тепловой ползучести зависит и от напряжений, и температуры.

Напряжения, обусловленные неравномерным температурным и нейтронным полями, вносят определенный вклад в длительную прочность оболочки, а также во все процессы, на которые влияет уровень напряжений (коррозия, химическое взаимодействие между оболочкой и топливом, развитие начальных дефектов (или трещин) под воздействием этих дополнительных неравномерных напряжений). Их необходимо учитывать при определении работоспособности оболочек твэлов.

Перечисленные выше факторы должны быть учтены при расчете напряженнодеформированного состояния твэлов. Решение комплексной задачи, заключающейся в нахождении температурного режима твэлов и напряженно-деформированного состояния твэлов для реальных условий быстрого реактора с учетом радиационных эффектов и деформации ТВС в процессе кампании, позволяет оценить работоспособность твэлов и показать влияние деформации и азимутальных неравномерностей температуры на работоспособность ТВС.

1. Методика теплогидравлического расчета ТВС и напряженно-деформированного состояния оболочки твэлов

1.1. Методика теплогидравлического расчета с учетом формоизменения твэлов

Использование поканальной методики теплогидравлического расчета ТВС позволяет учесть влияние формоизменения ТВС, случайного отклонения исходных параметров и других факторов на температурный режим твэлов. При этом ТВС разбивается на множество элементарных ячеек, имеющих масштаб существенно меньший по сравнению с масштабом всей системы, для которых решается система уравнений макропереноса массы, импульса и энтальпии [12–13]. Интенсивный обмен массой, импульсом и энергией между ячейками ТВС является эффектом макропереноса по сравнению к локальным характеристикам полей скорости и температуры в ячейках, но микропереноса по отношению к масштабу всей ТВС. Привязка разбиения на ячейки к конкретной геометрии пучка твэлов позволяет получить характеристики межканального обмена и связать характеристики температурного поля в ячейках и непосредственно в твэлах.

Значения коэффициентов гидравлического сопротивления и межканального обмена массой, импульсом и энергией вследствие различных механизмов обмена находятся по соотношениям, полученным в результате экспериментальных и теоретических исследований, проведенных в ФЭИ [14–16]. Неоднородность энерговыделения по периметру твэлов при неравномерном подогреве теплоносителя в ячейках аппроксимирована с использованием коэффициента обмена теплом за счет теплопроводности твэлов.

Температура поверхности твэлов находится интерполяционно по значениям в характерных точках периметра (узкой и широкой частях ячеек). В характерных точках периметра твэла температура находится как суперпозиция температуры теплоносителя в ячейках, рассчитываемой по поканальной методике и локального перегрева поверхности твэла.

Методика теплогидравлического расчета формоизмененной ТВС реализована в программе МИФ [12]. Программа верифицирована с использованием большого массива экспериментальных данных по полям скорости и температуры в деформированных решетках твэлов, полученных на модельных сборках твэлов с жидкометаллическим охлаждением.

1.2. Методика расчета напряженно-деформированного состояния оболочки твэлов

Напряженно-деформированное состояние оболочки определяется при следующих допущениях:

- принимая во внимание, что осевые градиенты температуры невелики, а разрешенные зазорами искривление оси твэла значительно меньше свободных искривлений, ось твэла считается прямой и рассматриваются независимо отдельные сечения по схеме плоской деформации;
- распределение температуры по толщине оболочки считается линейным, а по окружности произвольным;
- учитывая, что зазор между оболочкой и топливом довольно быстро выбирается, считается, что оболочка и топливо в течение всего времени работы твэла находятся в контакте. При этом предполагается, что давление топливного сердеч-

ника на оболочку мало чем отличается от давления топлива на оболочку при осесимметричном распределении температуры по периметру твэла и определяется по программе «KONDOR» [17]. Оболочка считается тонкостенной, то есть радиальными напряжениями пренебрегается вследствие их малости.

— учитывая факт, что неравномерность температуры, сильно сказывающаяся на оболочке, заметно сглаживается у сердечника, при решении задачи неравномерное по окружности распределение температуры в сердечнике не учитывается. Напряжения и деформации в оболочке твэла определяются по программе ROTOR [7]. При этом учитываются следующие нагрузки на оболочку: медленно меняющиеся внешнее $q_{\rm H}$ и внутреннее давление $q_{\rm B}$, осевое усилие, неравномерное по окружной и радиальной координате температурное поле, нагрузки, обусловленные неравномерным распуханием оболочки.

Учитываются вязко-упругие деформации оболочки. Для описания вязких деформаций используется теория ползучести упрочнения.

Нагружение разбивается по времени на ряд малых этапов, на каждом этапе нагружения находятся напряжения и деформации $\Delta \sigma_j$, $\Delta \varepsilon_j$ ($j=z, \theta, x$), которые должны удовлетворять обычным уравнениям равновесия, совместимости деформаций и граничным условиям, записанным в приращениях компонент оболочки. При этом физические зависимости в приращениях для тонкостенной оболочки ($\sigma_r = 0$) записаны для n-го шага нагружения следующим образом:

$$\Delta \varepsilon_z = \frac{1}{E} \Delta \sigma_z - \frac{\mu}{E} \Delta \sigma_\theta + \langle \varphi_{zc} \rangle \Delta t + \alpha \Delta T + 1/3 \Delta S, \qquad (1)$$

$$\Delta \varepsilon_{\theta} = \frac{\mu}{E} \Delta \sigma_z - \frac{1}{E} \Delta \sigma_{\theta} + \langle \varphi_{\theta c} \rangle \Delta t + \alpha \Delta T + 1/3 \Delta S, \qquad (2)$$

где α - коэффициент термического расширения, E - модуль упругости, μ - коэффициент Пуассона функции ползучести,

$$\varphi_{zc} = \frac{2\sigma_z - \sigma_\theta}{2\sigma_i} F_c, \tag{3}$$

$$\varphi_{\theta c} = \frac{2\sigma_{\theta} - \sigma_{z}}{2\sigma_{i}} F_{c} \,, \tag{4}$$

 $F_c(T, \sigma_i, \varepsilon_i, \Phi)$ — скорость ползучести материала оболочки с учетом вклада тепловой и радиационной ползучести, Φ - плотность потока нейтронов, $S(T, \Phi t)$ — приращение распухания оболочки, $\Delta S(T, \Phi t)$ - приращение распухания материала оболочки.

Температура оболочки задается в следующем виде:

$$\Delta T(\theta, x, \tau) = R(\tau) T(\theta, x) \Delta \tau, \ \Delta T(\theta, x) = T_0 + T(\theta) - \frac{x}{h} [\Delta_0 + \Delta(\theta)], \tag{5}$$

где $R(\tau)$ — функция, показывающая изменение температуры оболочки во времени.

Преобразовав систему уравнений равновесия, совместности деформаций и зависимостей физических свойств, получаем следующие разрешающие уравнения в перемещениях относительно приращений окружного Δv и радиального Δw перемещений срединной поверхности цилиндрической оболочки:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d^2}{d\theta^2} \left[\frac{f_{5\theta}}{r^2} \left(\frac{d^2 \Delta w}{d\theta^2} + \frac{d\Delta v}{d\theta} \right) \right] - \frac{1}{r} \left[\mu f_{1\theta} \Delta \varepsilon_x^0 \frac{1}{r} f_{1\theta} \left(\frac{d\Delta v}{d\theta} - \Delta w \right) \right] =
= \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \Delta T_{2\theta}}{d\theta^2} - \frac{1}{r} \Delta T_{1\theta} - \Delta q_n,$$
(6)

$$\frac{1}{r^{2}} \frac{d}{d\theta} \left[\frac{f_{5\theta}}{r^{2}} \left(\frac{d^{2} \Delta w}{d\theta^{2}} + \frac{d\Delta v}{d\theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{d}{d\theta} \frac{1}{r} f_{1\theta} \left(\frac{d\Delta v}{d\theta} - \Delta w \right) \right] =
= \frac{1}{r^{2}} \frac{d\Delta T_{2\theta}}{d\theta} + \frac{1}{r} \frac{d\Delta T_{1\theta}}{d\theta},$$
(7)

Система уравнений (6)–(7) решается аналитически путём разложения в ряды Фурье. Постоянные интегрирования системы уравнений находятся из условий периодичности и условий произвольного поступательного перемещения и поворота твэла как единого целого. Кроме этого, выполняется условие равновесия. По известным приращениям напряжений из уравнений совместности деформаций и зависимостям физических свойств были определены приращения напряжений $\Delta \sigma_z$ и $\Delta \sigma_\theta$.

Таким образом, на каждом этапе нагружения определяются приращения компонент напряжения с использованием (для определения функций ползучести оболочки) значения напряжения в конце предыдущего этапа.

2. Исходные геометрические и режимные параметры и свойства материалов

Исходные геометрические и режимные параметры ТВС:

Число твэлов в ТВС	127
Внешний/внутренний размер чехла ТВС, мм	96/92
Высота активной зоны, мм	1000
Наружный / внутренний диаметр оболочки твэла, мм	6,9/6,1
Ширина газового зазора в твэле, мм	0,1
Диаметр проволочной навивки на внутренних твэлах, мм	1,05
Ширина дистанционирующей ленты на пристенных твэлах, мм	0,6
Шаг дистанционирующей проволочной навивки, мм	100
Диаметр вытеснителей в периферийных каналах, мм	1,6
Температура на входе в активную зону, °С	365
Средний подогрев теплоносителя в ТВС, °С	225
Номинальное число Пекле	316

Для учета распухания материала оболочки использована следующая зависимость

$$\frac{\Delta v}{v} = 0.125 \cdot 10^{-2} \left\{ \exp\left[-1.212 \cdot 10^{-4} \left(t_{\text{ofon}} - 450 \right)^2 \right] \right\} (kt)^{1.8}, \%$$
 (8)

где kt — повреждающая доза (при 10% выгорании kt = 75 сна), $t_{\text{обол}}$ — температура оболочки (°C).

Для радиационной ползучести оболочки использована зависимость

$$\xi = \left[0.745 \cdot 10^{-6} + 1.7 \cdot 10^{-6} \ R \left(t_{\text{ofour}} \right) \sigma_i \ 10 \cdot k \right], \tag{9}$$

где

$$R\left(t_{\text{Ofoll}}\right) = \left[\left(1 + \mathcal{X}\right)e^{-\mathcal{X}}\right]^{210},\tag{10}$$

$$a = 1 - \bar{t}_{000\pi} / 718, \ \bar{t}_{000\pi} = t_{000\pi} + 273,$$
 (11)

где σ_i - интенсивность напряжения, используемое топливо – UO₂.

С использованием датчика случайных чисел (ү) и формулы

$$S = S^{\min} + S_p^{\min} \alpha \left(\ln \frac{1}{1 - \gamma} \right)^{1/\beta}, \tag{12}$$

получен набор расстояний между центрами твэлов, описываемых законом Вейбулла [18–20]. Реализуя процедуру распределения межцентровых расстояний в ТВС, получаем распределение геометрических параметров в поперечном сечении ТВС. Максимальная деформация имеет место в сечении 400 мм от входа в активную зону (А3), что на 100 мм ниже центра А3.

3. Результаты расчетных исследований температурного режима и напряженно-деформированного состояния оболочки твэлов

3.1. Распределение температуры в поперечных сечениях ТВС

Расчеты, выполненные только с учетом распухания оболочки твэлов, без учета деформации решетки твэлов в поперечном сечении ТВС и случайного распределения параметров в поперечном сечении, показывают, что максимальная температура оболочки центральных твэлов выше на 5–10 °C, чем пристенных твэлов в области максимального формоизменения (на 100 мм ниже центра АЗ), и выше на 19–28 °С в сечении на выходе из активной зоны (рис. 1). Это связано с перераспределением геометрических параметров в поперечном сечении ТВС, обусловленным радиационным формоизменением оболочки твэлов.

Максимальная азимутальная неравномерность температуры центральных твэлов составляет в сечении максимального формоизменения 6 °C, а на выходе из активной зоны — 5-7 °C. Для пристенных твэлов максимальная азимутальная неравномерность температуры достигает в сечении максимального распухания 13-18 °C, на выходе из активной зоны — 12-18 °C.

Следует заметить, что максимальная азимутальная неравномерность температуры твэлов предпериферийного ряда существенно выше, чем у пристенных твэлов в центральной области ТВС и на выходе из активной зоны, — 19 °C. Это связано с характером падения температуры теплоносителя в периферийной области ТВС.

При случайном распределении геометрических параметров в поперечном сечении ТВС с учетом радиационного распухания твэлов и деформации решетки твэлов наблюдается существенно большая неравномерность температуры в поперечном сечении ТВС. Максимальная температура оболочки твэлов в сечении максимальной деформации оказывается выше от 2 до 60 °C, чем в случае номинальных параметров. Азимутальная неравномерность температуры твэлов возрастает от 4 до 60 °C и достигает 65 °C. При этом изменение температурного режима твэлов в пристенной области происходит в меньшей степени, чем в центральной области ТВС (рис. 1). В сечении на выходе из активной зоны влияние деформации проявляется существенно меньше, чем в сечении с максимальным формоизменением (на 100 мм

ниже центра активной зоны). Максимальная температура оболочки твэлов увеличивается на величину до 5 °C, максимальная азимутальная неравномерность температуры твэлов — до 25 °C.

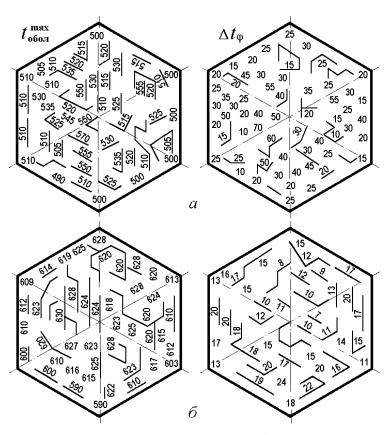


Рис. 1. Распределение максимальной температуры оболочки твэлов и максимальной азимутальной неравномерности температуры твэлов в поперечном сечении по центру активной зоны реактора (а) и на выходе из активной зоны (б)

3.2. Распределение температуры по периметру характерных твэлов

Результаты расчетов показывают, что уровень температуры оболочки центральных твэлов, как правило, выше, чем пристенных твэлов. Максимальная азимутальная неравномерность температуры твэлов наблюдается в области максимального формоизменения ТВС на уровне 100 мм ниже центра АЗ. Максимальное значение азимутальной неравномерности температуры центральных твэлов превышает соответствующее значение максимальной азимутальной неравномерности температуры для пристенных твэлов.

На общую окружную неравномерность температуры твэлов (первая гармоника) накладываются локальные всплески (перегревы) температуры поверхности твэлов. Максимальное значение температуры (зачастую резко выраженный пик) наблюдается в области самого узкого зазора между рассматриваемым твэлом и окружающими твэлами. Перепад температуры на оболочке составляет 23–26 °C. Температура внутренней поверхности оболочки изменяется от 390 до 650 °C. Осевой градиент температуры невелик и составляет примерно 0,17 град/м.

3.3. Напряженно-деформированное состояние оболочки характерных твэлов

Расчёты проведены в пяти сечениях по высоте ТВС, отстоящих друг от друга на расстояниях 200 мм для выхода на мощность и выдержки.

Распределения осевых и окружных напряжений (σ_z , σ_θ) по периметру оболочки для внутреннего и внешнего волокон оболочки после выхода на режим ($\tau = 0$) и в конце кампании ($\tau = 10000$ ч) указывают, что максимальные значения напряжений имеют место в сечении на 100 мм ниже центра активной зоны в области максимальной деформации ТВС.

Как видно из рисунков (рис. 2, 3), напряжения распределены неравномерно по периметру и по толщине оболочки. Наиболее нагретые места сжаты, наименее нагретые места растянуты. Осевые напряжения (σ_z) намного больше окружных (σ_θ). Максимальные сжимающие напряжения соответствуют пику температур и составляют $\sigma_z = -180 \text{ МПа}$. Наибольшие растягивающие напряжения составляют $\sigma_z = 140 \text{ МПа}$. Окружные напряжения небольшие (около 50 МПа) и обусловлены в основном перепадом температуры по толщине оболочки.

С течением времени вследствие распухания, давления топлива на оболочку (рв = 6,3 МПа в конце кампании) и ползучести материала оболочки распределение напряжений по периметру оболочки меняется. В конце кампании на внутреннем волокне оболочки в наиболее нагретом месте напряжения сжатия переходят в напряжения растяжения и повторяют характер распределения температуры по периметру оболочки. Это объясняется влиянием неравномерного распухания материала оболочки: температура в этой точке выше температуры максимума зависимости распухания стали оболочки твэлов. Наибольшие неупругие накопленные деформации $\varepsilon_c = 1,07\%$ имеют место в точке наибольших осевых напряжений. Максимальные осевые растягивающие напряжения в конце кампании, как и максимальные окружные напряжения, составляют $\sigma_z = 340$ МПа. Распухание волокон на внешней поверхности оболочки превышает распухание волокон на внутренней поверхности. Характер распухания оказывается связанным с изменением температуры и характеризуется противофазой.

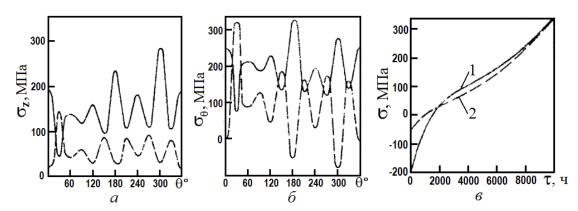


Рис. 2. Распределение по периметру оболочки осевых (а), окружных (б) напряжений для внешнего (————) и внутреннего (————) волокон оболочки на конец кампании и изменение максимальных осевых и окружных напряжений во времени (в) для центрального твэла ТВС при дистанционировании проволочной навивкой

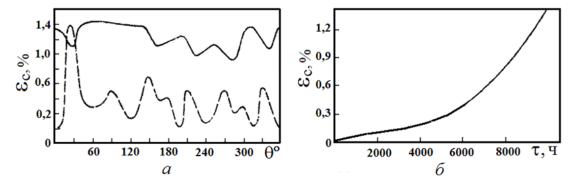


Рис. 3. Изменение неупругих накопленных деформаций по периметру оболочки в конце кампании для внешнего (————) и внутреннего (————) волокон оболочки (а) и изменение максимальных неупругих деформаций во времени для центрального твэла ТВС (б) при дистанционировании проволочной навивкой

Величина распухания оболочки твэла — 1–2%. Характер изменения осевых и окружных напряжений в процессе кампании для угловых и боковых твэлов как для центральных, но максимальные значения существенно меньше (максимум 200 МПа). Максимальные неупругие деформации около 1%, что ниже, чем для центральных твэлов. Распухание оболочки пристенных твэлов имеет тот же порядок как для центральных. Изменения осевых и окружных напряжений твэлов, максимальных неупругих деформаций во времени в других сечениях по длине активной зоны имеет тот же характер как в сечении с максимальным формоизменением ТВС, но максимальные значения ниже. Уровень осевых напряжений в наиболее «горячих» сечениях в начале кампании не превышает 69 МПа, в конце кампании — 50 МПа. Максимальные окружные напряжения твэлов в сечении на выходе из активной зоны в начале кампании — около 30 МПа, в конце кампании — 50 МПа. Максимальные неупругие деформации и распухание оболочки твэлов в наиболее горячих сечениях составляют ничтожную величину.

Заключение

Стохастический расчет температурного режима твэлов с учетом радиационного формоизменения твэлов в процессе кампании указывает на значительное повышение уровня температуры оболочки отдельных твэлов (\sim 60 °C) и увеличение максимальной азимутальной неравномерности температуры твэлов (до 65 °C) в сечении с максимальным формоизменением (\sim 100 мм ниже центра активной зоны) по сравнению с номинальным расчетом ТВС. Температурный режим твэлов на выходе из активной зоны не сильно отличается от номинального.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния оболочки твэлов показывают, что максимальные значения напряжений имеют место в сечении с максимальным формоизменением. В начале кампании максимальные осевые сжимающие напряжения соответствуют пику температур — $\sigma_z = -180 \text{ M}\Pi a$, наибольшие растягивающие напряжения составляют $\sigma_z = 140 \text{ M}\Pi a$. Окружные напряжения составляют $\sigma_\theta = 50 \text{ M}\Pi a$. В конце кампании вследствие влияния неравномерного распухания материала оболочки на внутреннем волокне оболочки напряжения сжатия переходят в напряжения растяжения и повторяют характер распределения температуры по периметру оболочки.

Максимальные осевые растягивающие напряжения в конце кампании составляют $\sigma_z = 340$ МПа. Окружные напряжения достигают также 340 МПа. Максимальное значение осевых напряжений в области выхода из активной зоны не превышает 69 МПа, а окружных напряжений 50 МПа. Максимальные неупругие накопленные деформации ($\varepsilon_c = 1,5\%$) имеют место в точке наибольшего распухания и высокого уровня окружных напряжений, что объясняется характером зависимости для радиационной ползучести.

Список литературы

- 1. Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М., Багдасаров Ю.Е. и др. Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200 // Атомная энергия. 2010. Т. 108. Вып. 4. С. 201–205.
- 2. *Ошканов Н.Н., Баканов М.В., Потапов О.А.* Опыт эксплуатации энергоблока БН-600 Белоярской АЭС // Атомная энергия. 2004. Т. 96. Вып. 5. С. 342–346.
- 3. Пороло С.И., Шулепин С.В., Дворяшин А.М., Конобеев Ю.В., Забудько Л.М. Результаты исследования твэлов БН-600, облученных в активной зоне первого типа // Атомная энергия. 2015. Т. 118. Вып. 6. С. 313–320.
- 4. Васильев Б.А., Кузавков Н.Г., Мишин О.В. и др. Опыт и перспективы модернизации активной зоны реактора БН-600 // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2011. № 1. С. 158–169.
- 5. *Лихачев Ю.И.*, *Пупко В.Я*, *Попов В.В.* Методы расчета на прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
- 6. *Лихачев Ю.И.*, *Прошкин А.А.*, *Щербакова Ж.Н*. Оценка работоспособности оболочек твэлов быстрых реакторов // Атомная энергия. 1978. Т. 45. Вып. 3 С. 209–210.
- 7. Лихачев Ю.И., Щербакова Ж.Н., Лисенкова Л.А. Влияние неравномерного температурного поля на работоспособность цилиндрического твэла в случае контакта оболочки и топлива: Препринт ФЭИ-1055. Обнинск: ОНТИ ФЭИ, 1980.
- 8. Srbacher F.J. Cladding Tube Deformation and Gore Emergency Cooling in a Loss of Coolant Accident of a Pressurized Water Reactor // Nuclear Engineering and Design. 1977. V. 103. P. 55–64.
- 9. *Казачковский О.Д.*, Жуков А.В., Сорокин А.П. и ∂p . Температурные поля в формоизмененных ТВС быстрых реакторов // Атомная энергия. 1988. Т. 65. Вып. 2. С. 89–97.
- 10. Marbach J. Comportement d"un Faisceau Phenix Sour Irradiation // Irradiation Behaviour of Metallic Materials for fast Reactor Core Components. CEA-DMECH-B.P. N 2-91190 GIF-SUR-YUETTE. 1979. P. 297–301.
- 11. Sorokin A.P., Zhukov A.V., Bogoslovskaya G.P., Matjukhin N.M. Velocity and Temperature Behavior in Fast Reactors of Deformation and Other Factors (Experimental Data) // Proceeding of Fourth International Seminar on Subchannel Analysis, Tokyo September 25-26, 1997. P. 287–308.
- 12. *Казачковский О.Д., Сорокин А.П., Жуков А.В. и др.* Метод сосредоточенных параметров в задаче о температурном поле в формоизмененных ТВС с неадиабатическими граничными условиями: Препринт ФЭИ-1672. Обнинск: ОНТИ ФЭИ, 1985.
- 13. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: теоретические основы и физика процесса. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 14. Sorokin A.P., Bogoslovskaya G.P., Chevolany S., Ninokata H., Rinejsky A.A., Zhu-kov A.V. LMFR core and heat exchanger thermohydraulic design: Former USSR and present Russian approaches // IAEA-TECDOC-1060, January, 1999.

- 15. *Ефанов А.Д.*, *Сорокин А.П.*, *Жуков А.В.* Теплогидравлический анализ активной зоны ядерных реакторов с жидкометаллическим охлаждением. Часть II // Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1. №8. С. 318–331.
- 16. Сорокин Г.А., Жуков А.В., Авдеев Е.Ф., Сорокин А.П. Система замыкающих соотношений в рамках модели поканального теплогидравлического анализа активного зоны ядерных реакторов: Препринт ФЭИ-2829. Обнинск: ОНТИ ФЭИ, 2000.
- 17. *Хмелевский М.Я.*, *Малахова Е.И.*, *Долматов П.С*. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в стержневых цилиндрических твэлах. Программа КОНДОР: Препринт ФЭИ-1853. Обнинск: ОНТИ ФЭИ, 1987.
- 18. *Богословская Г.П., Жуков А.В., Поплавский В.М. и др.* Метод расчета температурного поля в кассете твэлов быстрого реактора при случайном распределении параметров по методу Монте-Карло: Препринт ФЭИ-1340. Обнинск: ОНТИ ФЭИ, 1982.
- 19. Sorokin A.P., Efanov A.D., Yuriev Yu.S., Zhukov A.V., Ushakov P.A., Bogoslovskaya G.P. Methods and codes for modeling thermohydraulics of fast reactor core subassemblies under nominal and non-nominal operation conditions // IAEA-TECDOC-1157, LMFR core thermohydraulics: Status and prospects, June 2000. P. 9–22.
- 20. Богословская Г.П., Сорокин А.П., Жуков А.В. Расчет температурного поля ТВС быстрых реакторов с использованием метода Монте-Карло // Атомная энергия. 1983. Т. 55. Вып. 5. С. 281-285.

Информация об авторах

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, заместитель директора Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

Богословская Галина Павловна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: gpbogoslov@ippe.ru

Труфанов Александр Анатольевич, заместитель директора

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: tral@ippe.ru

Денисова Наталья Александровна, ведущий инженер

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: ndenisova@ippe.ru

УДК 621.039.546

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕНА И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В КАНАЛАХ И СБОРКАХ ТВЭЛОВ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ*

В. И. Рачков, А. П. Сорокин, А. В. Жуков, Ю. А. Кузина, В. В. Привезенцев АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», Обнинск

Представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена и температурных полей в каналах и сборках твэлов быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем, выполненные в ФЭИ. Основные исследования выполнены с использованием ртути, сплавов свинец-висмут и натрий-калий. Анализируется влияние на теплообмен контактного термического сопротивления. Сопоставляются данные о теплоотдаче и азимутальной неравномерности температуры твэлов для сборок с широкой решеткой с относительным шагом s/d = 1,33 с гладкими твэлами и дистанционированием твэлов двухзаходной винтовой навивкой типа «ребро по ребру» и поперечными решетками.

Перспективной концепцией развития ядерной энергетики является реализация замкнутого топливного цикла с системообразующим элементом – быстрыми реакторами с жидкометаллическим теплоносителем [1]. Для разработки быстрых реакторов нового поколения, характеризующихся высокой энергонапряженностью, высокой температурой твэлов, требуются надежные данные о теплогидравлике активной зоны реактора, которая наряду с нейтронной физикой, прочностью и безопасностью является одним из важнейших компонентов в обосновании конструкции и режимных параметров.

В сборках твэлов активной зоны наблюдаются сложные и взаимосвязанные процессы не только гидродинамики и теплообмена, но и массопереноса, имеющие общий физический характер для разных жидкометаллических теплоносителей и оказывающие влияние на теплогидравлику. Так, один из ключевых параметров максимальная температура поверхности твэлов – может быть представлен как суперпозиция температуры теплоносителя на входе в активную зону $t_{\rm BX}$, подогрева теплоносителя Δt_f , среднего температурного напора стенка-жидкость Δt_{α} , перепада температуры на контактном термическом сопротивлении $\Delta t_{\text{кон}}$, неравномерности температуры по периметру твэла Δt_{ϕ} и факторов перегрева ($\Delta t_{\phi\pi}$):

$$t_{_{W}}^{\,\mathrm{max}} = t_{_{\mathrm{BX}}} \, + \Delta t_{_{f}} \, + \Delta t_{_{\alpha}} + \Delta t_{_{\mathrm{KOH}}} + \Delta t_{_{\varphi}} + \Delta t_{_{\varphi\mathrm{I}}} \, .$$

Природные свойства свинца позволяют осуществлять теплоотвод при низком давлении и исключают пожары, химические и тепловые взрывы при разгерметизации контура, течах парогенератора и любых перегревах теплоносителя. С 1950-х годов проведен большой комплекс исследований теплообмена применительно к реакторам с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями - свинцом, свинцомвисмутом. Наряду с ними в исследованиях в качестве моделирующих жидкостей использовались ртуть и натрий-калиевый сплав с числом Прандтля в том же диапазоне.

В исследованиях согласно теории моделирования тепловых процессов использовались безразмерные характеристики теплообмена, являющиеся функциями без-

^{*} Опубликовано в журнале «Атомная энергия». – 2015. – Т. 118. – Вып. 5. – С. 248–257.

размерных геометрических параметров, таких, как относительный шаг решетки твэлов s/d, относительный шаг дистанционирующей проволочной навивки h/d, безразмерная длина энерговыделения l/d и критериев подобия Re (Pe), Pr, ϵ . Для теплообмена в жидких металлах, характеризующихся Pr << 1, основным определяющим критерием является число Пекле.

Исследования позволили выявить общие закономерности и особенности теплообмена жидких металлов в каналах (трубах, пучках твэлов). Одной из таких характерных особенностей явилось влияние на теплообмен качества теплоносителя, состояния примесей в теплоносителе, обусловливающих наличие контактного термического сопротивления на поверхности твэлов.

В ФЭИ проведены исследования теплообмена на моделях гладких твэлов в треугольной решетке для диапазона шага $1 \le s/d \le 2$, изучен теплообмен в тесном пучке s/d = 1,13 с дистанционирующей четырехзаходной винтовой навивкой типа «ребро по ребру». Получены данные о теплообмене на моделях с квадратной решеткой твэлов с гладкими твэлами и при дистанционировании поперечными решетками в диапазоне $1,2 \le s/d \le 1,5$.

Для ТВС быстрых реакторов с жидкими металлами характерен высокий подогрев теплоносителя Δt_f относительно температурных напоров стенка—жидкость Δt_α из-за невысокой объемной теплоемкости теплоносителя. Так, отношение коэффициентов теплообмена $\alpha_{_{\text{Pb-Bi}}}/\alpha_{_{\text{H}_2\text{O}}}$ и относительного подогрева жидких металлов $(\Delta t_f/\Delta t_\alpha)_{_{\text{Pb-Bi}}}/(\Delta t_f/\Delta t_\alpha)_{_{\text{H}_2\text{O}}}$ для Pb—Ві и воды составляют 1,8 и 4,3 (при Re = 10^5). Поэтому температура в ТВС в значительной степени определяется не коэффициентами теплообмена, а распределением подогрева теплоносителя в активной зоне, на которое влияет межканальный обмен теплоносителем. Это существенно повышает требования к организации потока теплоносителя в реакторах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Исследованиями получены данные о межканальном обмене в пучках гладких твэлов и с дистанционированием четырехзаходным винтовым оребрением типа «ребро по ребру».

В настоящее время нет количественных данных, которые характеризуют теплообмен в широких решетках твэлов в активной зоне быстрых реакторов нового поколения со свинцовым теплоносителем для различного дистанционирования твэлов. Получение этих данных наряду с коэффициентами гидравлического сопротивления и межканального обмена при дистанционировании поперечными решетками позволяет замкнуть систему констант для поканального метода теплогидравлического расчета активной зоны реакторов, учитывающего влияние пространственных неоднородностей геометрии и энерговыделения и являющегося эффективным инструментом теплогидравлического анализа на стадии технических проектов быстрых реакторов, а также при анализе их эксплуатационных режимов.

Актуальны задачи дальнейшего развития, валидации методов теплогидравлического расчета активной зоны и верификации расчетных кодов. Так, исследования [2] показывают, что адаптированные под расчет бенчмарк-эксперимента коммерческие трехмерные коды SPIRAL, AQUA, FLUENT, STAR-CD, MATRA, CFX, BRS-TVS лишь приближенно описывают представленные для сравнения экспериментальные данные [2].

Теплообмен в круглых трубах и каналах

Теплоотдача в круглых трубах. Первые исследования коэффициентов теплоотдачи в жидких металлах были начаты в 1947 году [3]. Формула для теплоотдачи в круглых трубах на основе расчетов предложена в исследованиях [4]

$$Nu = 7 + 0.025 Pe^{0.5}.$$
 (1)

Первые исследования теплообмена сплава свинец–висмут в нашей стране были выполнены в ЭНИН им. Г.М. Кржижановского и НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова. ЭНИН при наличии оксидной пленки на стенке рекомендовал формулу [5, 6]

$$Nu = 3 + 0.014 Pe^{0.8}$$

для чистых поверхностей:

$$Nu = (4,5-5) + 0.014 Pe^{0.8}.$$
 (2)

Исследования в области турбулентности [7, 8] привели к развитию численного моделирования теплообмена. Однако основой для разработки расчетных рекомендаций послужили эксперименты и полуэмпирические теории. Был накоплен большой фактический материал.

Дальнейшие исследования развивались по мере совершенствования методик экспериментов [9]. В 1950-е годы, когда методы очистки и контроля чистоты жид-кометаллических теплоносителей еще только развивались, измерения теплоотдачи к ртути и сплаву свинец—висмут дали близкие результаты [10]. Было отмечено сильное влияние оксидов на теплоотдачу. При очистке жидкого металла данные совпали с рекомендацией [4]. Различие между теоретической формулой (1) и экспериментальными данными происходило за счет термического сопротивления на границе теплоотдающей стенки с жидким металлом. Природа этого сопротивления длительное время оставалась неясной, и результаты измерений были противоречивы.

В Ок-Риджской национальной лаборатории (США) были получены неожиданно высокие коэффициенты теплоотдачи к олову в графитовом канале. Специальные исследования ФЭИ не обнаружили каких-либо особенностей теплообмена сплава свинец—висмут в графитовой трубе.

В уникальных исследованиях [11, 12] были измерены профили температуры в трубах в сплавах свинец–висмут и натрий–калий. Отмечено сильное влияние оксидов на теплоотдачу. При тщательной очистке жидких металлов данные совпали с рекомендацией (1).

Концепция согласования закономерностей теплообмена жидких металлов в трубах с теоретической формулой (1) вызывает неудовлетворенность. Для теплоносителей с $\Pr \ge 1$ наблюдается резкое уменьшение числа Нуссельта при переходе от турбулентного к ламинарному течению. Для жидких металлов подобного эффекта нет. С учетом изменения профиля скорости число Nu_0 ($\text{Nu}_0 = 7$ [4]) зависит от числа Рейнольдса и при $\text{Re} = 2.5 \cdot 10^3$ снижается до 5.5 [13].

Для оценки влияния состояния поверхности теплообмена и наличия оксидов в жидкометаллическом теплоносителе две независимые группы сотрудников ФЭИ исследовали теплоотдачу к ртути в трубах из нержавеющей стали и никеля и к сплаву натрий–калий в трубах из нержавеющей стали и меди [14–16]. Перед опытами ртуть фильтровали через замшу, сплав очищали в холодной ловушке. В экспериментах теплоотдача была устойчивой, повторяемость результатов высокой

(рис. 1). Близкие результаты на сплаве натрий—калий получили и французские исследователи [18]. Результаты всех этих экспериментальных исследований с погрешностью $\pm 10\%$ описывались формулой

Nu =
$$5 + 0.025$$
Pe^{0.8},
Pe $< 2 \cdot 10^4$; $3 \cdot 10^3 <$ Re $< 10^6$.

Эта формула, полученная с учетом большого числа экспериментов и частных рекомендаций, принята для практического использования [16, 18, 19].

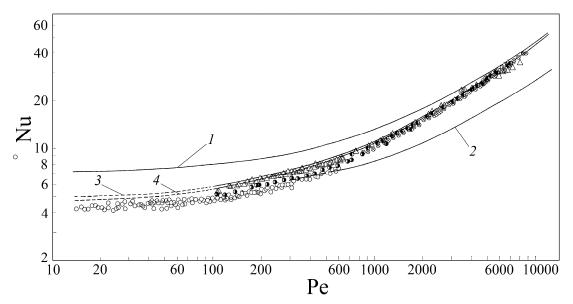


Рис. 1. Стабилизированные числа Нуссельта при течении жидких металлов в разных трубах:

 \otimes — стальная трубка — ртуть, \Pr = 0,023—0,027; \odot , \odot — никелевая трубка — ртуть, \Pr = 0,022—0,026, первая и вторая серия соответственно; Δ — медная трубка — сплав Nа–K, \Pr = 0,018—0,023; \circ —стальная трубка — ртуть [17]; 1, 2 — рассчитанные по формулам (1), (2) соответственно; 3, 4 — рассчитанные по формуле [7] \Pr Nu = C + 4,16(\Pr - C = 2,5+1,3lg(\Pr - C = 0,865 — 0,05 \Pr - 0,05 \Pr для \Pr = 0,02 и 0,03 соответственно

Контактное термическое сопротивление. Выдвинуты различные гипотезы природы контактного термического сопротивления теплообмену, включая несмачиваемость поверхностей теплообмена, образование адсорбированных газовых пленок или пустот на гладкой поверхности теплообмена или в углублениях шероховатости, наличие оксидных пленок или других малотеплопроводных соединений в поверхностном слое металлической стенки, отложение нерастворенных примесей из загрязненного потока жидкого металла на поверхности теплообмена.

Экспериментальными исследованиями ФЭИ [20–23] было показано, что основной причиной контактного термического сопротивления является осаждение на поверхностях теплообмена взвешенных в потоке жидких металлов твердых частиц. Вблизи стенки в области ламинарного подслоя жидкости образуются уплотненный слой примесей, сцепленный со стенкой, и переходный слой с переменной концентрацией. В турбулентном потоке концентрация взвешенных примесей в 1000 раз меньше, чем возле стенки, и близка к концентрации насыщения.

Контактное термическое сопротивление зависит от тех же характеристик, что и толщина ламинарного подслоя, – от скорости течения жидкого металла и диаметра трубы и не зависит от направления теплового потока и времени. Приведенное на рис. 2 безразмерное контактное термическое сопротивление справедливо только для определенных условий, в которых проводились опыты. Гипотеза о подвижном слое оксидов и других отложений вблизи стенки нашла дальнейшее развитие в работах [24]. Наиболее полное обобщение полученных данных о контактном термическом сопротивлении приведено в работах [23, 24]. Для расчета контактного термического сопротивления при наличии взвесей рекомендована формула [24]

$$R_{\kappa} = 7 \frac{d}{\lambda} \operatorname{Re}^{-0.5}. \tag{4}$$

В результате обобщения данных оценено максимально возможное контактное термическое сопротивление [23] (см. рис. 2)

$$R_{\rm K} = 200 \frac{d}{\lambda} \,{\rm Re}^{-0.75}$$
, (5)

где $R_{_{\rm K}} = \left(1/{\rm Nu}_{_k} - 1/{\rm Nu}\right)d/\lambda$, число Nu рассчитывается по формуле (3).

Сопоставление соотношений (4) и (5) с экспериментальными данными приведено на рис. 2.

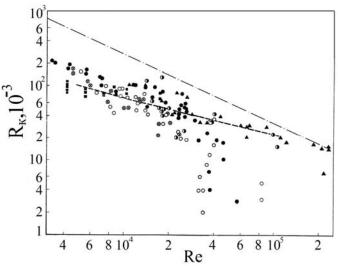


Рис. 2. Зависимость контактного термического сопротивления в трубах от числа Рейнольдса, рассчитанные по формуле (3) (- - -), (4) ($- \cdot -$);

Ф – сплав натрий–калий в медной трубе; ○, ● – сплав натрий–калий в молибденовой трубе;
 ⊗ – литий в молибденовой трубе;
 ■ – литий в стальной трубе;

▲ - сплав свинец-висмут в стальной трубе

Обзор отечественных и зарубежных экспериментальных исследований термического контактного сопротивления в условиях течения жидкометаллических теплоносителей, в том числе и тяжелых, приведен в работе [25].

Экспериментальными исследованиями теплоотдачи от круглой трубы к свинцу в условиях регулирования и контроля содержания кислорода получена зависимость чисел Нуссельта от Пекле при различном содержании кислорода в свинцовом теплоносителе [26].

Кольцевой зазор. Опытные данные имеют большой разброс [27]. Вероятно, надежнее воспользоваться результатами [28, 29]. Предложена следующая зависимость, полученная из профиля скорости в кольцевом зазоре

$$\mathrm{Nu} = a + b \; (\overline{\epsilon} \; \mathrm{Pe})^c \;$$
для $\epsilon \geq 0$, $\overline{\epsilon} \cong 1 - \frac{1,82}{\mathrm{Pr} \left(\nu_{\mathrm{T}} / \nu \right)_{\mathrm{max}}^{1,4}} \;$ для $0,15 \leq \Delta t_\alpha \leq 1$; $\left(\nu_{\mathrm{T}} / \nu \right)_{\mathrm{max}} \cong 4 + 0,002897 \; \mathrm{Re}^{0,919}$.

Коэффициенты a, b и c табулированы.

где

Теплоотдача и поля температуры в сборках твэлов

Решемки гладких **т**вэлов. Соотношения для расчета теплоотдачи и неравномерности температуры в бесконечных треугольных решетках гладких твэлов с жидкометаллическим охлаждением, в том числе, свинцом получены в результате обобщения экспериментов для решеток твэлов в широких интервалах определяющих параметров.

Максимальная азимутальная неравномерность температуры по периметру твэлов в треугольных решетках твэлов рассчитывается по формуле [30, 31]:

$$\Delta T_{\varphi} = \frac{t_{w}^{\text{max}} - t_{w}^{\text{min}}}{\overline{q}R} \lambda_{f} = \frac{\Delta T_{\Pi}}{1 + \gamma(\epsilon_{6}) \operatorname{Pe}^{\beta(s/d)}},$$
 (6)

$$1 \le s/d \le 1.13$$
; $0.27 \le \varepsilon_6 \le 14.8$; $1 \le Pe \le 2000$,

где $\Delta T_{\rm Л}$ – неравномерность температуры твэлов при ламинарном режиме течения жидкометаллического теплоносителя, $\gamma(\epsilon_6)$, $\beta(s/d)$ – эмпирические функции.

Можно также применять соотношение [31]

$$\Delta T_{\varphi} = A(s/d) \frac{1 - \exp(-X)}{X}, \tag{7}$$

$$1 \le s/d \le 1,2$$
; $0,2 \le \varepsilon_6 \le 16$; $20 \le Pe \le 2000$,

где A — функция от s/d; X — функция от s/d и ϵ_6 . Расчеты по этой формуле согласуются с экспериментальными данными с погрешностью $\pm 10\%$.

В соотношениях (6), (7) ε_6 — параметр теплового подобия (эквивалентной теплопроводности) для треугольной решетки твэлов, расчет которого проводится для конкретного твэла по формулам [16, 19].

В решетках гладких твэлов с относительным шагом s/d > 1,2, охлаждаемых жидким металлом, неравномерность температуры по периметру твэлов почти отсутствует, что и приводит к высокой теплоотдаче.

Результаты экспериментальных и расчетных исследований теплоотдачи в треугольной решетке описываются обобщающей зависимостью [19, 30, 31]:

$$Nu = Nu_{\pi} + f(s/d, \varepsilon_6) Pe^{\varphi(s/d)}, \qquad (8)$$

$$1 \le s/d \le 2$$
; $1 \le Pe \le 4000$; $0.001 \le Pr \le 0.03$; $0.2 \le \varepsilon_6 \le 16$,

где Nил — число Нуссельта для ламинарного течения теплоносителя; $f(s/d, \epsilon_6)$, $\phi(s/d)$ — эмпирические функции.

В широких решетках твэлов (с шагом в диапазоне $1,2 \le s/d \le 1,95$) параметр эквивалентной теплопроводности не влияет на теплоотдачу, и формула (8) имеет вид

Nu = 7,55
$$s/d - 20 (s/d)^{-13} + \frac{0,041}{(s/d)^2} Pe^{0,56+0,19(s/d)}$$
. (9)

При дистанционировании твэлов четырехзаходным оребрением «ребро по ребру» для тесной решетки твэлов (s/d = 1,13) теплоотдача оказалась почти равной теплоотдаче для гладких твэлов.

Оребрение твэлов винтовыми навивками «ребро по ребру». Экспериментальные исследования теплообмена ТВС с оребренными твэлами в широкой решетке выполнены с использованием модели, разработанной в соответствии с принципами теплового моделирования [32]. Она представляет собой сборку имитаторов твэлов с косвенным электрообогревом и дистанционирующими двухзаходными винтовыми навивками типа «ребро по ребру», расположенными в треугольной решетке с относительным шагом s/d = 1,33 в шестигранном чехле (рис. 3).

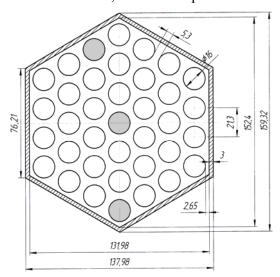


Рис. 3. Поперечное сечение 37-стержневой модельной сборки имитаторов твэлов

Геометрические параметры модельной ТВС следующие:

Внутренний размер обечайки под ключ, мм	,
Толщина стенки обечайки, мм	
Число имитаторов твэлов	,
Внешний диаметр имитаторов, мм	,
Толщина стенки имитаторов, мм	
Относительный шаг решетки твэлов	
Длина участка энерговыделения, мм)
Расстояние между торцевыми решетками, мм)
Расстояние от торца до начала обогрева, мм	
Форма ребер трапецеидальная	I
Шаг винтовой навивки, мм)
Относительный зазор между стенкой и имитаторами, $\Delta/(s-d)$	
Нагревательнихромовая проволока ∅ 2 мм	Į
Гидравлический диаметр центральной ячейки, мм	

Температура поверхности теплообмена измерена поворотными имитаторами (центральным, боковым, угловым) с 12 микротермопарами, заделанными в пазы с шагом 30° равномерно по всей длине энерговыделения. Также измерена температура теплоносителя на выходе ячеек модельной сборки.

В местах касания оболочки имитатора твэла с дистанционирующим ребром наблюдаются значительное повышение температуры оболочки, обусловленное размером ребер из-за большого шага решетки твэлов (рис. 4). Соответственно теплоотдача при оребрении твэлов «ребро по ребру» оказывается значительно ниже, чем для гладких твэлов (рис. 5). С увеличением числа Пекле влияние повышения температуры под ребрами на теплоотдачу уменьшается, роль турбулизации потока теплоносителя возрастает. Если при $Pe \cong 1000$ теплоотдача снижается на 40%, то, как показывает аппроксимация, при $Pe \cong 2300$ теплоотдача оребренных и гладких твэлов сравнивается.

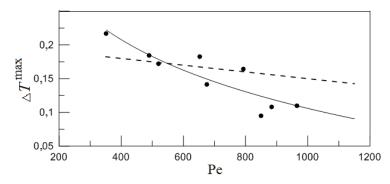


Рис. 4. Зависимость от чисел Пекле общей максимальной неравномерности температуры для центрального имитатора твэла при дистанционировании винтовыми навивками «ребро по ребру» [32] (- - -); опытные точки (●) и аппроксимирующая кривая (—) по показаниям термопары, расположенной внутри дистанционирующей решетки [33]

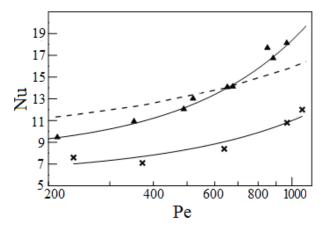


Рис. 5. Зависимость числа Нуссельта от Пекле для центрального имитатора твэла в модельных сборках твэлов с s/d = 1,33: - - - - расчет для решеток гладких твэлов с s/d = 1,33 по формуле (9); ×, \blacktriangle – эксперимент для имитаторов твэлов с двухзаходным оребрением «ребро по ребру» [32] и для гладкой области имитаторов твэлов, дистанционируемых поперечными решетками [33], соответственно

Сравнивая экспериментальную теплоотдачу оребренного центрального имитатора Nu_p с соотношением для гладких твэлов, расположенных в широкой решетке с тем же относительным шагом, получаем

$$Nu_p = Nu_{rr}(0.57 + 10^{-5} Pe^{1.38}),$$

где для гладких твэлов соотношение для теплоотдачи имеет вид

$$Nu_{rr} = 9,55 + 0,023Pe^{0,81}$$
. (10)

Дистанционирование твэлов поперечными решетками. Эксперименты выполнены на 37-элементной модельной сборке с дистанционированием четырьмя поперечными решетками по длине энерговыделения [33]. Подробно исследовалось влияние дистанционирующих решеток на теплоотдачу и распределение температуры по поверхности имитаторов твэлов. На рис. 4 приведены данные о неравномерности температуры по периметру имитаторов твэлов в области решеток [33].

Экспериментальная теплоотдача имитаторов твэлов в областях между дистанционирующими решетками («гладких» областях) почти соответствует зависимости (10) для бесконечной решетки твэлов (см. рис. 5) [33]. Дистанционирующие решетки приводят к локальному всплеску теплоотдачи, которая оказывается выше, чем для «гладкой» области имитаторов. Теплоотдача увеличивается по мере движения теплоносителя в решетке — температурный напор стенка—жидкость уменьшается внутри решетки и становится особенно малым вблизи верхнего ее торца из-за турбулизирующего воздействия на поток теплоносителя. В этом месте наблюдается наибольшее увеличение теплоотдачи.

Ранее в ФЭИ с использованием сплава натрий–калий были получены экспериментальные данные о теплообмене, полях температуры и скорости в 25-стержневых модельных сборках (с квадратной решеткой имитаторов твэлов) с однородной геометрией для относительного шага 1,25, 1,28 и 1,46. Исследования проводили на гладких имитаторах твэлов и при использовании поперечных дистанционирующих решеток. Для изучения влияния на теплообмен неоднородности геометрии использовали модельные сборки с неоднородной решеткой имитаторов твэлов и их переменным энерговыделением [34].

Начальный тепловой участок. Необходимость исследований теплообмена на начальном участке решетки твэлов возникает при расчете теплоотдачи вследствие эффекта влияния на теплоотдачу переменного энерговыделения по длине активной зоны. Экспериментальные данные для длины начального участка по теплоотдаче в треугольных бесконечных решетках твэлов обобщены зависимостью [30]:

$$(l/d_r)_{\text{Nu}} = A - B/(255 + \text{Pe}),$$

1,1 \le s/d \le 1,7; 0 < \text{Pe} < 3000; 50,4 \le \varepsilon_6 \le 1,6,

где A, B – функции от s/d.

Длина начального теплового участка по азимутальной неравномерности температуры оболочки твэлов рассчитывается по формуле [30]:

$$(l/d_{\rm r})_{\Delta T} \approx (l/d_{\rm r})_{\rm Nu} (18.1 - 4.5 \lg \text{Pe}) (s/d - 1) + 1,$$

 $1 \le s/d \le 1.2; \quad 0.4 \le \varepsilon_6 \le 1; \quad 50 \le \text{Pe} \le 2000.$

Рекомендации по оценке этого эффекта приведены в методических указаниях [31].

Температурное поле в нестандартных каналах. Температурное поле периферийных твэлов характеризуется сложным распределением температуры, определяемым геометрией активной зоны, условиями энерговыделения и другими причинами [35] (рис. 6).

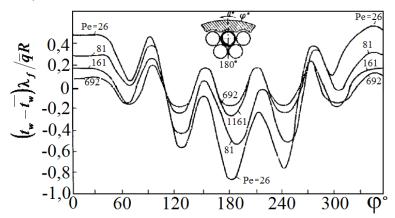


Рис. 6. Температурное поле периферийных твэлов [35]

Деформация решетки твэлов приводит к резкому росту неравномерностей температуры и снижению теплоотдачи. Экспериментальные исследования теплообмена при деформации каналов, вызванной одиночным или групповым смещением твэлов (одиночное смещение твэла вдоль чехла ТВС и по нормали к чехлу ТВС, в направлении под углом к твэлам регулярной решетки, групповое смещение двух, трех или четырех твэлов в характерных зонах ТВС), прогибом одного или нескольких твэлов, формоизменением пучка твэлов и чехла ТВС приведены в работе [36]. Экспериментальные данные обобщены единой зависимостью от площади деформированной ячейки с максимальным проходным сечением. Развиты расчетные и аналитические методики, которыми можно воспользоваться для расчетных оценок применительно к реактору со свинцовым теплоносителем.

Межканальный обмен в сборках твэлов

Межканальный обмен массой, импульсом и энергией через зазоры между твэлами выравнивает неравномерность полей скорости и температуры в сборках твэлов. Исследования межканального взаимодействия особенно актуально для реакторов с жидкометаллическим охлаждением, имеющих высокую энергонапряженность [37, 38].

Межканальный обмен теплом осуществляется путем молекулярного (электронного в жидких металлах) и турбулентного обмена ($\mu_{\scriptscriptstyle T}^{\scriptscriptstyle T}$, $\mu_{\scriptscriptstyle T}^{\scriptscriptstyle T}$), вынужденного конвективного обмена $\mu_{\scriptscriptstyle K}^{\scriptscriptstyle T}$ вследствие воздействия винтового проволочного дистанционирования твэлов, потока рассеяния дистанционирующими решетками, за счет теплопроводности твэлов $\mu_{\scriptscriptstyle TB}^{\scriptscriptstyle T}$. Суммарная эффективность воздействия межканального обмена теплом определяется суперпозицией составляющих

$$\mu_{\scriptscriptstyle 9\varphi}^{\scriptscriptstyle T} = \mu_{\scriptscriptstyle K}^{\scriptscriptstyle T} + \gamma \mu_{\scriptscriptstyle T}^{\scriptscriptstyle T} + \mu_{\scriptscriptstyle M}^{\scriptscriptstyle T} + \mu_{\scriptscriptstyle TB}^{\scriptscriptstyle T} \,.$$

Здесь $\gamma \le 1$ - коэффициент, учитывающий взаимное влияние конвективной составляющей межканального обмена на молекулярную и турбулентную составляющие.

Эффективный межканальный обмен импульсом – сумма составляющих конвективного $\mu^{\scriptscriptstyle \Gamma}_{\scriptscriptstyle K}$ и турбулентного $\mu^{\scriptscriptstyle \Gamma}_{\scriptscriptstyle T}$ переноса

$$\mu_{ab}^{\Gamma} = \mu_{\kappa}^{\Gamma} + \gamma \mu_{\tau}^{\Gamma}$$
.

Согласно плоской модели перемешивания предполагается, что в параллельных каналах имеет место равномерный профиль температуры, и в зазоре между каналами происходит скачкообразное изменение температуры. Поперечный поток массы в этом случае переносит за счет конвекции максимально возможное количество тепла, и тепловой коэффициент обмена равен массовому $\mu_{\kappa}^{\mathsf{T}} = \mu_{\kappa}^{\mathsf{M}}$. Отклонение от положений плоской модели перемешивания (учет переноса за счет молекулярной и турбулентной диффузии) приводит к неравномерному профилю температуры по сечению каналов и обусловливает перенос с перетекаемой из канала в канал жидкостью (за счет конвекции) меньшего количества тепла, чем в случае равномерной по сечению канала температуры. Это учитывается коэффициентом неэквивалентности переноса тепла и массы $\beta = \mu_{\kappa}^{\mathsf{T}}/\mu_{\kappa}^{\mathsf{M}}$. Этот коэффициент ($0 < \beta < 1$) зависит от числа Прандтля и прямо пропорционален ему. Для жидких металлов $\beta \cong 0,7$.

Для быстрых реакторов определены как эффективные коэффициенты межканального обмена, так и отдельные их составляющие в широких интервалах изменения определяющих параметров при разном дистанционировании твэлов [37-40]. Гидродинамические исследования полей скорости в модельной сборке с поперечными решетками показывают, что в области решеток энергия перераспределяется в турбулентном потоке между радиальным и тангенциальным направлениями, в результате чего интенсивность поперечного турбулентного переноса в следе за решетками может даже снизится [41].

Заключение

Анализ указывает на надежные соотношения для расчета теплообмена в каналах и пучках гладких твэлов в условиях чистого теплоносителя (без оксидов во взвешенном состоянии). Новые данные о теплообмене в ТВС с широкой решеткой, характерной для быстрого реактора со свинцовым охлаждением, указывают на ухудшение теплоотдачи при дистанционировании винтовыми навивками и увеличение азимутальной неравномерности температуры твэлов по сравнению с гладкими твэлами и при дистанционировании поперечными решетками.

Анализ показывает, что наиболее значимыми факторами, определяющими контактное термическое сопротивление, являются концентрация примесей в теплоносителе и его скорость. Для корректного учета влияния на теплоотдачу твэлов переменного энерговыделения твэлов, что является важным во второй половине активной зоны, необходимо получение дополнительных данных о длине релаксации, которая определяется из длины начального теплового участка для теплоотдачи.

Для корректного расчета температурных режимов твэлов в области неоднородности геометрии и энерговыделения в активной зоне необходимы данные о перемешивании в сборках, дистанционируемых решетками, а также температурные поля в указанных областях для верификации кодов теплогидравлического расчета.

Бенчмарк-эксперимент по теплогидравлике модельной ТВС [2] показывает необходимость дальнейшего совершенствования теплогидравлических кодов для активной зоны реакторов с охлаждением тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Актуальна задача валидации методов теплогидравлического расчета ак-

тивной зоны и верификации созданных расчетных кодов. Для ее решения необходимы разработка верификационных матриц, систематизация экспериментальных исследований, создание баз данных по теплогидравлике активной зоны реакторов с жидкометаллическим охлаждением [42], разработка системы верификационных тестов.

Список литературы

- 1. Адамов Е.О., Джалавян АВ., Лопаткин А.В. и др. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. // Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 6, с. 319–330.
- 2. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. Анализ бенчмарк-эксперимента по гидравлике и теплообмену в сборке имитаторов твэлов с жидкометаллическим охлаждением // Там же, 2005, т. 99, вып. 5, с. 336–348.
- 3. *Martinelli R*. Heat transfer to molten metals // Transactions ASME, 1947, v. 69, N 8, p. 947–959.
- 4. *Lyon R*. Liquid metal heat transfer coefficient // Chem. Engng Progress Ser., 1951, v. 47, N 2, p. 75–82.
- 5. *Михеев М.А., Баум В.А., Воскресенский К.Д., Федынский О.С.* Реакторостроение и теория реакторов. М.: АН СССР, 1955.
- 6. *Кутателадзе С.С., Боришанский В.М., Новиков И.И., Федынский О.С.* Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1958.
- 7. *Булеев Н.И.* Теоретическая модель механизма турбулентного обмена / В сб.: Теплопередача, М.: АН СССР, 1962, с. 64–98.
- 8. *Ибрагимов М.Х.*, *Субботин В.И.*, *Бобков В.П.*, *Сабелев Г.И*. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. М.: Атомиздат, 1975.
- 9. *Минашин В.Е., Субботин В.И., Ушаков П.А., Шолохов А.А.* Применение микротермопар в исследованиях теплоотдачи / В кн.: Вопросы теплообмена, М.: АН СССР, 1959, с. 193–199.
- 10. Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Ушаков П.А. Исследование теплоотдачи при турбулентном течении в трубах жидких металлов // Атомная энергия, 1960, т. 8, вып. 1, с. 54-56.
- 11 *Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ивановский М.Н. и др.* Теплоотдача при турбулентном течении жидких металлов в трубах // Там же, 1961, т. 11, вып. 2, с. 133–139.
- 12. Кириллов П.Л., Субботин В.И., Суворов М.Я., Троянов М.Ф. Теплоотдача к сплаву натрия с калием и к ртути // Там же, 1959, т. 6, вып. 4, с. 382-390.
- 13. Новиков И.И., Воскресенский К.Д. Прикладная термодинамика и теплопередача. М.: Госатомиздат, 1961.
- 14. *Субботин В.И., Ушаков П.А., Габрианович Б.Н. и др.* Теплообмен при течении жидких металлов в круглых трубах // Инж.-физ. журн., 1963, т. IV, №4, с. 16–21.
- 15. *Таланов В.Д., Ушаков П.А.* Исследование теплообмена жидких металлов в круглых трубах / В сб.: Жидкие металлы. М.: Атомиздат, 1967, с. 9–15.
- 16. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М.: Атомиздат, 1975.
- 17. *Петухов Б.С., Юшин А.Я.* О теплообмене при течении жидкого металла в ламинарной и переходной областях / В сб.: «Доклады АН СССР», 1960, № 6, т. 136, с. 1321–1324.
- 18. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках (для студентов вузов). М.: Энергоатомиздат, 1986.

- 19. *Кириллов П.Л.*, *Бобков В.П.*, *Жуков А.В.*, *Юрьев Ю.С*. Справочник по теплогидравлическим расчетам в атомной энергетике. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ / Под общей ред. П.Л. Кириллова. М.: ИздАТ, 2010.
- 20. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Орлов Ю.И. Термическое контактное сопротивление при охлаждении каналов жидкими металлами // Теплофизика высоких температур, 1967, т. 5, №6, с. 1025-1031.
- 21. Орлов Ю.И. Обобщение данных по теплообмену в среде жидкометаллических теплоносителей с учетом термического сопротивления в пристенных зонах / В сб.: «Исследования в области теплофизики ядерных энергетических установок» (к 60-летию теплофизического отдела ФЭИ). Обнинск, ФЭИ, 2014, с. 125–160.
- 22. Ивановский М.Н., Субботин В.И., Орлов Ю.И. Термическое контактное сопротивление при охлаждении каналов жидкими металлами / В сб.: Технология высокотемпературных жидкометаллических теплоносителей и тепловых труб. Обнинск, ФЭИ, 2005, с. 24–30.
- 23. *Кириллов П.Л.* Учет контактного термического сопротивления теплообмену жидкого металла в круглой трубе: Препринт ФЭИ-284, 1971.
- 24. *Ивановский М.Н.*, *Субботин В.И.*, *Арнольдов М.Н. и др*. Теплоотдача при турбулентном течении жидких металлов в трубах // В сб.: Технология высокотемпературных жидкометаллических теплоносителей и тепловых труб. Обнинск, ФЭИ, 2005, с. 31–37.
- 25. Орлов Ю.И. Обобщение данных по теплообмену в среде жидкометаллических теплоносителей с учетом термического сопротивления в пристенных зонах / В сб.: Исследования в области теплофизики ядерных энергетических установок (к 60-летию создания теплофизического отдела ФЭИ). Обнинск, ФЭИ, 2014, с. 125–160.
- 26. *Безносов А.В., Семенов А.В., Давыдов Д.В и др.* Экспериментальное исследование теплоотдачи от круглой трубы к свинцовому теплоносителю при регулируемом содержании кислорода // Атомная энергия, 2004, т. 97, вып. 5, с. 345–349.
 - 27. Боришанский В.М. Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1967.
- 28. Dwyer O., Tu P. Analytical study of heat transfer rates for parallel flow of liquid metals tube bundles. Pt 1 // Chem. Engng Progress Ser., 1960, v. 56, N 3, p. 183–193.
- 29. *Dwyer O.* On the transfer of heat to fluids flowing through pipes, annuli, and parallel plates // Nucl. Sci. and Engng, 1963, v.17, N 3, p. 336–334.
- 30. Жуков А.В., Кириллов П.Л., Матюхин Н.М. и др. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- 31. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. РТМ 1604. 008-88 / Под ред. А.В. Жукова, А.П. Сорокина. Обнинск, ФЭИ, 1989.
- 32. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П., Привезенцев В.В. Температурные поля и теплоотдача оребренных имитаторов твэлов, охлаждаемых жидким металлом (оребрение «ребро по ребру») / В сб.: Итоги деятельности Института ядерных реакторов и теплофизики за 2013 год / Под ред. О.Ф. Кухарчука, А.П. Сорокина, А.А. Труфанова, В.Л. Чернонога. Обнинск, ФЭИ, 2014.
- 33. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Привезенцев В.В., Сорокин А.П. Температурные поля и теплоотдача в раздвинутых решетках твэлов, охлаждаемых тяжелым жидкометаллическим теплоносителем / В сб.: Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики. М., АО «НИКИЭТ», 2014, с. 433–442.
- 34. *Кузина Ю.А., Жуков А.В., Сорокин А.П.* Теплообмен и температурные поля в активной зоне реактора БРЕСТ на быстрых нейтронах со свинцовым охлаждением // Известия вузов. Ядерная энергетика, 2002, №4, с. 91–99.

- 35. Жуков А.В., Сорокин А.П., Ефанов А.Д., Кузина Ю.А. Температурные режимы твэлов корабельных ядерных установок с жидкометаллическим охлаждением // Известия вузов. Ядерная энергетика, 2007, №1, с. 56–68.
- 36. *Казачковский О.Д., Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.* Температурные поля в формоизмененных ТВС быстрых реакторов // Атомная энергия, 1988, т. 65, вып. 2, с. 89–97.
- 37. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: расчетные программы и практическое приложение. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- 38. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: теоретические основы и физика процесса. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 39. *Богословская Г.П., Сорокин А.П., Кириллов П.Л. и др.* Экспериментальные и расчетные исследования поперечного турбулентного переноса импульса и энергии в каналах сложных форм // Теплофизика высоких температур, 1996, т. 34, №6, с. 903–908.
- 40 LMFR Core and Heat Exchanger Thermohydraulic Design: Former USSR and Present Russian Approaches. IAEA-TECDOC-1060, 1999.
- 41. *Rowe D., Chapman C.* Measurement of Turbulent Velocity, Intensity and Scale in Rod Bundle Flow Channel Containing a Grid Spacer. BNWL-1737, Washington, 1973.
- 42. Сорокин А.П., Жуков А.В., Кузина Ю.А. и др. База экспериментальных данных по теплогидравлике реакторов на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением и возможности верификации расчетных кодов / В сб: Тепломассоперенос и свойства жидких металлов (Теплофизика-2007). Обнинск, ФЭИ, с. 19–21.

Информация об авторах

Рачков Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, научный руководитель АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, заместитель директора Института ядерных реакторов и теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

Жуков Альберт Владимирович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Института ядерных реакторов и теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Кузина Юлия Альбертовна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Института ядерных реакторов и теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: ukuzina@ippe.ru

Привезенцев Виталий Владимирович, канд. техн. наук, начальник лаборатории Института ядерных реакторов и теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: privezentsev@ippe.ru

УДК 621.039.534

СВОЙСТВО ПОДОБИЯ ГИДРОДИНАМИКИ РАЗДАЮЩИХ КОЛЛЕКТОРНЫХ СИСТЕМ С РАЗЛИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ ПОДВОДА ЖИДКОСТИ В КОЛЛЕКТОР*

В. Н. Дельнов

АО «ГНЦ РФ — Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», Обнинск, Россия

В статье рассматриваются раздающие коллекторные системы (РКС). РКС многообразны, имеют сложную конструкцию и являются характерными элементами проточных частей ядерных энергетических установок (ЯЭУ) и теплообменного оборудования. Цель работы — обоснование подобия гидродинамики проточных частей осесимметричных РКС с различными условиями подвода жидкости в коллектор и отвода жидкости из него. Выполнено сопоставление гидродинамики проточных частей цилиндрической и плоской РКС с центральным подводом и боковым отводом жидкости, цилиндрической и плоской РКС с боковым подводом и центральным отводом жидкости.

Установлено неизвестное ранее свойство подобия гидродинамики проточных частей осесимметричных РКС цилиндрического и плоского типов с обратным поворотом жидкости при различных местах ее подвода и отвода. Указанное свойство основано на наличии в проточной части указанных РКС струйно-вихревого течения жидкости, затопленных и полузатопленных струй, универсальности характерных для этого типа течения свойств жидкости, идентичности механизмов преобразования одних типов струй в другие и влиянии на распределение массового расхода на выходе из коллектора отдельных гидродинамических характеристик падающей на выходной элемент струй и отношения коэффициентов местного гидравлического сопротивления выходного элемента и коллектора.

Данное свойство обусловлено следующими гидродинамическими эффектами: увеличением площади поперечного сечения затопленных и полузатопленных струй и, соответственно, снижением средней скорости жидкости в них, происходящим за счет торможения жидкости; течением затопленных и полузатопленных струй с углом одностороннего расширения равным 12°; преобразованием затопленных струй в полузатопленные струи и наоборот; изменением местоположения максимальной скорости в поперечном сечении струи при ее повороте и далее по ходу течения жидкости; совпадением между собой местоположений максимальной скорости жидкости в падающей на выходной элемент струе и массового расхода жидкости на выходе из него; прямо пропорциональной зависимостью средней скорости в падающей на выходной элемент струе от максимального массового расхода (скорости) жидкости на выходе коллектора; обратной степенной зависимостью максимального массового расхода (скорости) жидкости на выходе из коллектора от отношения коэффициентов местного гидравлического сопротивления выходного элемента и коллектора; дросселированием потока и, соответственно, увеличением скорости течения жидкости во входной части коллектора при отношении площадей проходного сечения подводящего канала и кольцевого (щелевого) зазора во входной части коллектора большем либо равном единице; входом одной части жидкости в отверстия (каналы) выходного элемента, расположенные в месте встречи струи, и растеканием другой части жидкости вдоль остальной части выходного элемента с изменением расхода по пути при попадании струи на выходной элемент.

Раздающие коллекторные системы многообразны, имеют сложную конструкцию и являются характерными элементами проточных частей ЯЭУ и теплообменного

^{*} Опубликовано в журнале «Вопросы атомной науки и техники». Серия: Ядерно-реакторные константы, 2018, Вып. 5. – С. 208–222. – Эл. ресурс: http://vant.ippe.ru/archiv/year2018.html

оборудования. На работоспособность и тепловую эффективность ЯЭУ и теплообменного оборудования существенно влияют гидродинамические эффекты, наблюдаемые в проточной части РКС.

Цель работы — обоснование подобия гидродинамики проточных частей осесимметричных РКС с различными условиями подвода жидкости в коллектор и отвода жидкости из него.

Для второго контура промежуточного теплообменника (ПТО) реакторной установки (РУ) типа БН характерна РКС цилиндрического типа в виде осесимметричного обратного поворота с центральным подводом и боковым отводом жидкости.

В корпусных РУ используют РКС цилиндрического типа в виде осесимметричного обратного поворота с боковым подводом и центральным подводом жидкости.

Обоснование подобия выполнено путем сопоставления гидродинамики проточных частей РКС цилиндрического и плоского типов с центральным подводом и боковым отводом жидкости и РКС цилиндрического и плоского типов с боковым подводом и центральным отводом жидкости.

Примерно пятьдесят лет назад в Теплофизическом отделении ФЭИ (в настоящее время в Отделении теплофизики АО «ГНЦ РФ — ФЭИ») под руководством Габриановича Б.Н., Кириллова П.Л., Ушакова П.А. и Юрьева Ю.С. проводились комплексные расчетно-аналитические и экспериментальные исследования по гидродинамике проточных частей осесимметричных РКС различных типов теплообменников и реакторов ЯЭУ. Отдельные наиболее значимые результаты указанных исследований представлены в работах [1—25].

Экспериментальные исследования на моделях РКС плоского типа проведены на гидролотке, а на моделях РКС цилиндрического типа выполнены на аэродинамическом и гидравлическом стендах. Принципиальные схемы четырех характерных вариантов РКС представлены на рисунке 1.

1. Коллекторная система с центральным подводом и боковым отводом жидкости

Типичную проточную часть осесимметричной РКС цилиндрического типа с центральным подводом и боковым отводом жидкости образуют следующие последовательно расположенные элементы: центральная труба — входная, основная и выходная части коллектора — трубный пучок — выходная камера (рис. 1а).

Типичную проточную часть симметричной РКС плоского типа с аналогичными условиями подвода и отвода жидкости образуют следующие последовательно расположенные элементы: центральный канал — входная, основная и выходная части коллектора — каналы системы пластин — пара отводящих каналов (рис. 1б). Вертикальные плоские пластины в РКС плоского типа имитируют продольное осевое сечение РКС цилиндрического типа.

В РКС цилиндрического типа жидкость через центральную трубу попадает в коллектор, изменяет в нем направление движения и выходит из коллектора через трубный пучок, расположенный в боковом кольцевом канале, образованном корпусом и центральной трубой.

В РКС плоского типа жидкость через центральный канал попадает в коллектор, изменяет в нем направление движения и выходит из коллектора через каналы систем пластин, расположенные в боковых отводящих каналах, образованных корпусом и пластинами центрального канала.

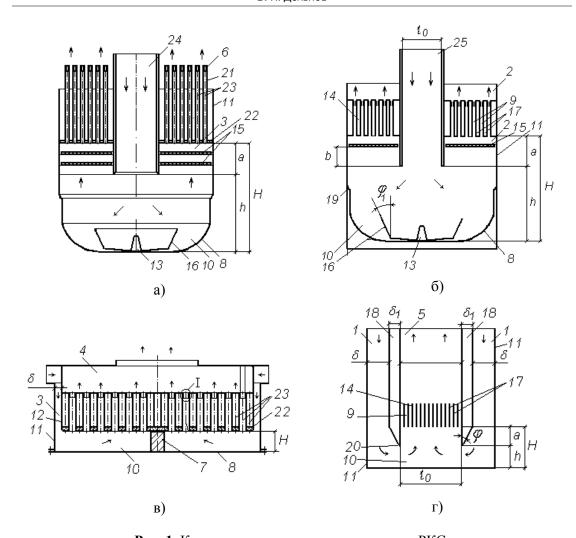


Рис. 1. Конструкции характерных вариантов РКС:

а), б) РКС цилиндрического и плоского типов с центральным подводом и боковым отводом жидкости соответственно; в), г) РКС цилиндрического и плоского типов с боковым подводом и центральным отводом жидкости соответственно; 1 — боковой входной канал; 2 — боковой канал; 3 — боковой кольцевой канал; 4 — выходная камера; 5 — выходной канал; 6 — диафрагма; 7 — дистанционирующая вставка; 8 — днище; 9 — канал системы пластин; 10 — коллектор; 11 — корпус; 12 — обечайка; 13 — обтекатель; 14 — пластина решетки; 15 — решетка; 16 — распределитель; 17 — система пластин; 18 — стенка выходного канала; 19 — ступень; 20 — торцевая часть стенки выходного канала; 21 — трубка; 22 — трубная доска; 23 — трубный пучок; 24 — центральная труба; 25 — центральный канал

На гидролотке для РКС плоского типа получены характер течения воды в проточной части (рис. 2).

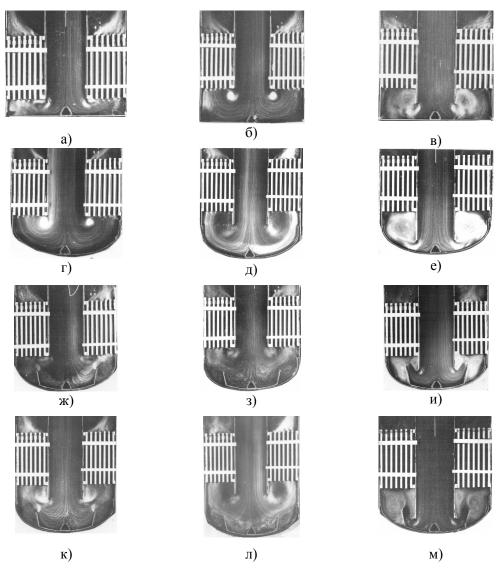


Рис. 2. Характер течения воды в проточной части РКС плоского типа с центральным подводом и боковым отводом воды при $Re = 3,26 \cdot 10^4 - 4,62 \cdot 10^4$:

$$a \longrightarrow \tilde{H} = \tilde{h} = 0,41; \ \tilde{a} = 0; \ 6 \longrightarrow \tilde{H} = \tilde{h} = 0,97; \ \tilde{a} = 0; \ \mathbf{B} \longrightarrow \tilde{H} = 0,76; \ \tilde{h} = 0,41; \ \tilde{a} = 0,38;$$

$$\Gamma \longrightarrow \tilde{H} = \tilde{h} = 0,97; \ \tilde{a} = 0; \ \mathbf{H} \longrightarrow \tilde{H} = 1,35; \ \tilde{h} = 0,97; \ \tilde{a} = 0,38; \ \mathbf{e} \longrightarrow \tilde{H} = 1,16; \ \tilde{h} = 0,41; \ \tilde{a} = 0,75;$$

$$\mathbf{K} \longrightarrow \tilde{H} = \tilde{h} = 0,97; \ \tilde{a} = 0 \ \mathbf{H} \ \phi_p = 10 \div 14^\circ; \ \mathbf{S} \longrightarrow \tilde{H} = \tilde{h} = 1,29; \ \tilde{a} = 0,38 \ \mathbf{H} \ \phi_p = 10 \div 14^\circ;$$

$$\mathbf{H} \longrightarrow \tilde{H} = 0,97; \ \tilde{h} = 0,60; \ \tilde{a} = 0,38; \ \phi_p = 10 \div 14^\circ; \ \mathbf{K} \longrightarrow \tilde{H} = 1,35; \ \tilde{h} = 0,97; \ \tilde{a} = 0,38 \ \mathbf{H}$$

$$\phi_p = 10 \div 14^\circ; \ \mathbf{H} \longrightarrow \tilde{H} = 1,67; \ \tilde{h} = 1,29; \ \tilde{a} = 0,38 \ \mathbf{H} \ \phi_p = 10 \div 14^\circ;$$

$$\mathbf{H} \longrightarrow \tilde{H} = 1,16; \ \tilde{h} = 0,41; \ \tilde{a} = 0,75 \ \mathbf{H} \ \phi_p = 10 \div 14^\circ$$

В РКС плоского типа изменяются высота коллектора H, высота входа в него h, расстояние от системы пластин до торцевой части стенок входного канала a, угол раскрытия распределителя ϕ и расстояние от решетки до торцевой части центрального канала b. Коллектор имеет днище плоской и эллиптической формы. В коллекторе предусмотрена возможность установки распределителя потока и решеток на входе в систему пластин. При определении относительных размеров \tilde{H} , \tilde{h} , \tilde{a} и \tilde{b} в качестве масштабного фактора используется ширина внутренней части входного канала l_0 . Число Рейнольдса Re соответствует режиму течения воды в центральном канале.

Схемы течения жидкости в РКС. В проточной части РКС цилиндрического типа течение жидкости имеет сложный характер и в основном определяется соотношением размеров и конструкцией РКС, режимом течения жидкости и соотношением коэффициентов гидравлического сопротивления элементов ее проточной части. Характерные схемы течения жидкости в проточной части указанного типа РКС (рис. 3) получены с учетом результатов различных экспериментальных работ [1, 2, 4, 9, 10, 14]. Наиболее существенное проявление особенностей течения жидкости имеет место во входной, основной и выходной частях коллектора указанного типа.

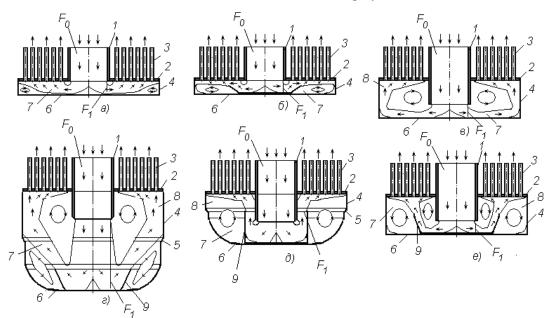


Рис. 3. Типичные конструкции и схемы течения жидкости в осесимметричных РКС цилиндрического типа с центральным подводом и боковым отводом жидкости:
а), в) РКС с относительно малой высотой входа в коллектор при отсутствии и наличии вылета центральной трубы из трубной доски, соответственно;
б) РКС с относительно малой высотой входа в коллектор при наличии распределителя и отсутствии вылета центральной трубы из трубной доски; г) РКС с относительно большой высотой входа в коллектор при наличии распределителя и вылета центральной трубы из трубной доски; д), е) РКС с распределителем и вылетом центральной трубы из трубной доски при затесненной входной части коллектора и относительно малой высоте входа в него, соответственно;

```
1 — центральная труба; 2 — трубная доска; 3 — трубка пучка; 4 — корпус; 5 — ступень; 6 — днище; 7 — коллектор; 8 — боковой кольцевой канал, 9 — распределитель
```

Во входной части коллектора течение жидкости зависит от соотношения площадей проходного сечения центральной трубы F_0 и входной части коллектора F_1 .

Площадь F_1 соответствует минимальному щелевому зазору между торцевой частью центральной трубы и днищем и (или) распределителем.

В РКС с вылетом $\tilde{a} \ge 0$ и отношении площадей $F_0/F_1 < 1$ возможны два варианта преобразования струи. В одном варианте при относительно большой высоте \tilde{h} осесимметричная круглая затопленная струя в результате поворота над расположенной у днища застойной зоной либо сразу принимает вид кольцевой полузатопленной струи на корпусе, либо последовательно преобразуется в цилиндрическую затопленную струю и кольцевую полузатопленную струю на корпусе. В другом варианте при относительно малой высоте \tilde{h} круглая затопленная струя достигает центральной части днища и в результате поворота либо сразу принимает вид кольцевой полузатопленной струи на корпусе, либо преобразуется в цилиндрическую или коническую полузатопленные струи соответственно на днищах плоской и эллиптической форм и затем принимает вид кольцевой полузатопленной струи на корпусе.

В названиях струй в качестве одного из отличительных признаков используется тип их поперечного сечения. Например, осесимметричной круглой струе соответствует круглое поперечное сечение, цилиндрической и конической струям соответствуют поперечные сечения в виде боковых поверхностей круглых цилиндра и усеченного конуса.

Затопленная струя движется в окружающей ее жидкости без касания конструктивных элементов РКС, а полузатопленная струя движется с одновременным касанием поверхностей конструктивных элементов и окружающей ее жидкости.

Площадь поперечного сечения конической или цилиндрической полузатопленных струй f_1 во входной части коллектора зависит от отношения площадей F_0/F_1 . При отношении площадей $F_0/F_1 < 1$ площадь f_1 примерно соответствует максимальной площади поперечного сечения осесимметричной круглой затопленной струи во входной части коллектора, а при отношении площадей $F_0/F_1 \ge 1$ площадь $f_1=(0,7-0,8)$ F_1 .

В основной части коллектора можно выделить следующие характерные особенности течения жидкости.

При вылете $\tilde{a}=0$, отношении площадей $F_0/F_1\geq 1$ и отсутствии распределителя полузатопленная струя преобразуются в поток, движущийся по направлению к периферии коллектора между днищем и трубной доской с раздачей потока по пути через отверстия средней и (или) периферийной частей трубной доски (рис. 3а). Установка распределителя в коллектор данного типа практически не оказывает влияние на характер течения жидкости внутри распределителя и приводит к изменению гидродинамики проточной части РКС за его пределами (рис. 3б). Жидкость после прохождения кольцевого зазора между торцевой частью распределителя и трубной доской преобразуется в цилиндрическую полузатопленную струю, движущуюся вдоль средней и (или) центральной частей трубной доски с раздачей расхода по ее отверстиям. При этом наличие ступени на стыке эллиптического днища и корпуса практически не оказывает влияния на распределение расхода жидкости по отверстиям трубной доски.

В РКС с вылетом $\tilde{a} \ge 0$, отношении площадей $F_0/F_1 < 1$ и относительно большой высоте \tilde{h} установка на днище (в застойной зоне) распределителя, имеющего относительно малую высоту h_1 по сравнению с высотой \tilde{h} , практически не оказывает влияния на характер течения жидкости.

В основной части коллектора при вылете $\tilde{a} \ge 0$ и различных отношениях площадей F_0/F_1 течение жидкости осуществляется в виде кольцевой полузатопленной струи вдоль стенки корпуса (рис. 3в, г) и внутренней поверхности боковой стенки распределителя, параллельной продольной оси симметрии, конической затопленной струи после выхода из распределителя (рис. 3г, е), кольцевой затопленной струи после выхода со ступени в месте стыка торцевых частей днища эллиптической формы и корпуса, цилиндрической и конической полузатопленных струй соответственно вдоль днища плоской (рис. 3в) и эллиптической форм.

В результате обратного пространственного поворота осесимметричная круглая затопленная струя в нижней и верхней частях распределителя преобразуется соответственно в конические полузатопленную и затопленную струи. Первая из них располагается на внутренней поверхности боковой стенки распределителя, а вторая — в его верхней части. При взаимодействии конической затопленной струи с верхней частью распределителя происходит отклонение направления ее движения по отношению к боковой стенки распределителя в сторону периферии.

При $\tilde{a} > 0$ во входной части кольцевого канала в направлении трубной доски имеет место течение кольцевой затопленной струи, движение жидкости с одновременным касанием внутренней и наружной боковых поверхностей соответственно корпуса и центральной трубы (рис. 3д), течение кольцевой полузатопленной струи вдоль внутренней или наружной боковых поверхностей соответственно корпуса (рис. 3в, г) или центральной трубы (рис. 3д).

Течение жидкости в РКС характеризуется наличием застойных и (или) вихревых зон, а также перераспределением профиля скорости в струях в результате их расширения и поворота.

В выходной части коллектора при вылете $\tilde{a} \ge 0$ установлены следующие характерные особенности течения жидкости.

В месте встречи кольцевых затопленной и полузатопленной струй со средней и (или) центральной частью трубной доски, средней и (или) периферийной частью трубной доски одна часть жидкости, соответствующая ядру потока, непосредственно входит в отверстия трубной доски, а оставшаяся часть жидкости движется вдоль трубной доски с раздачей расхода по пути через отверстия в трубной доске. При попадании струи в центральную часть трубной доски жидкость движется вдоль ее средней и (или) периферийной части в направлении корпуса, при попадании струи в среднюю часть трубной доски жидкость одновременно растекается от места встречи с трубной доской вдоль ее центральной и периферийной частей соответственно в направлении центральной трубы и корпуса, а при попадании струи в периферийную часть трубной доски жидкость движется вдоль средней и (или) центральной частей трубной доски в направлении центральной трубы.

В зависимости от соотношения размеров РКС и используемых в ней конструктивных элементов струя попадает на трубную доску под различными углами.

В проточной части РКС плоского типа характер течения жидкости подобен характеру течения жидкости в РКС цилиндрического типа.

Конструктивные характеристики, определяющие гидродинамику проточной части РКС цилиндрического типа: внутренние радиусы нижней и верхней частей корпуса (при наличии ступени); внутренний и наружный радиусы центральной трубы, высота коллектора и высота входа в него, расстояние от днища до ступени на корпусе

(при наличии ступени), угол раскрытия, радиусы нижнего и верхнего оснований распределителя (при его наличии), расстояние от решеток до торцевой части центральной трубы и относительно друг друга (при наличии решеток) (рис. 1a).

Конструктивные характеристики, влияющие на гидродинамику проточной части РКС плоского типа: ширина нижней и верхней части корпуса (при наличии ступени), наружная и внутренняя ширина центрального канала, высота коллектора и высота входа в него, расстояние от днища до ступени на корпусе (при наличии ступени), угол раскрытия, ширина нижнего и верхнего оснований распределителя (при его наличии) (рис. 1б).

2. Коллекторная система с боковым подводом и центральным отводом жидкости

Типичную проточную часть симметричной РКС цилиндрического типа с боковым подводом и центральным отводом жидкости образуют следующие последовательно расположенные элементы: кольцевой канал — входная, основная и выходная части коллектора — отверстии трубной доски — выходная камера (рис. 1в).

Типичную проточную часть симметричной РКС плоского типа с боковым подводом и центральным отводом жидкости образуют следующие последовательно расположенные элементы: пара боковых входных каналов — входная, основная и выходная части коллектора — каналы системы пластин — центральный канал (рис. 1г).

В РКС цилиндрического типа жидкость через боковой кольцевой канал попадает в коллектор, изменяет в нем направление движения и выходит из коллектора через отверстия трубной доски.

В РКС плоского типа жидкость через два боковых входных канала попадает в коллектор, изменяет в нем направление движения и выходит из коллектора через каналы систем пластин, расположенные в выходном канале.

На гидролотке применительно к РКС плоского типа получены характер течения воды в проточной части РКС (рис. 4).

В РКС плоского типа изменяются высота коллектора H, высота входа в него h, расстояние от системы пластин до торцевой части стенок выходного канала a, ширина входного канала δ и толщина стенки выходного канала $\tilde{\delta}_1$. Коллектор имеет днище плоской формы. При определении относительных размеров \tilde{H} и \tilde{h} в качестве масштабного фактора используется ширина входного канала δ , при определении относительных размеров \tilde{a} и $\tilde{\delta}_1$ — ширина решетки l_0 , а при определении относительного размера проходного сечения решетки \tilde{s} — удвоенная ширина входного канала 2δ . Число Рейнольдса R соответствует режиму течения воды в каналах решетки.

Схемы течения жидкости в РКС. В проточной части РКС цилиндрического типа течение жидкости имеет сложный вид и в основном определяется соотношением размеров и конструкцией РКС, режимом течения жидкости и соотношением коэффициентов гидравлического сопротивления элементов ее проточной части. Характерные схемы течения жидкости в проточной части рассматриваемого типа РКС получены с учетом результатов экспериментальных работ [1, 3, 5, 6, 10—13]. Наиболее яркие особенности течения жидкости проявляются на входном, основном и выходном участках проточной части рассматриваемой РКС (рис. 5).

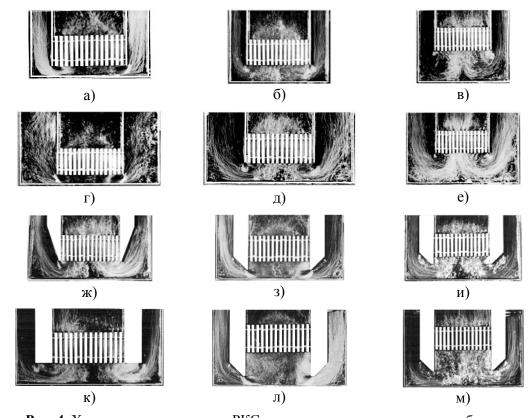


Рис. 4. Характер течения воды в РКС плоского типа с симметричным боковым подводом и центральным отводом жидкости из него при \tilde{H}_1^0 =0,31 и Re=(1,4—2,1)·10³: а) \tilde{H} =0,5; \tilde{a} =0, \tilde{s} =4,0; $\tilde{\delta}$ =0,011 и ϕ =90°; б) \tilde{H} =1,0; \tilde{a} =0; \tilde{s} =2,0; $\tilde{\delta}$ =0,011 и ϕ =90°;

в)
$$\tilde{H} = 2.0$$
; $\tilde{a} = 0$, $\tilde{s} = 2.0$; $\tilde{\delta} = 0.011$ и $\phi = 90^{\circ}$; г) $\tilde{H} = 0.25$; $\tilde{a} = 0$; $\tilde{s} = 4.0$; $\tilde{\delta} = 0.011$ и $\phi = 90^{\circ}$;

д)
$$\tilde{H}$$
 =0,5; \tilde{a} =0; \tilde{s} =2,0; $\tilde{\delta}$ =0,011 и ϕ =90°; e) \tilde{H} =1,0; \tilde{a} =0; \tilde{s} =1,0; $\tilde{\delta}$ =0,011 и ϕ =90°; ж), к) \tilde{H} = \tilde{h} =1,0, \tilde{a} =0, \tilde{s} =2,0; $\tilde{\delta}$ =0,022 при ϕ равных 30 и 90°, соответственно;

3), л) \tilde{h} =0,5; \tilde{s} =4; ϕ =60°; $\tilde{\delta}$ =0,0217 при \tilde{H} =1,0; \tilde{a} =0,14 и \tilde{H} =1,78 и \tilde{a} =0,36, соответственно:

и), м)
$$\tilde{h}$$
 =1,0; \tilde{s} =2; ϕ =60°; $\tilde{\delta}$ =0,0217 при \tilde{H} =1,5; \tilde{a} =0,14 и \tilde{H} =2,28 и \tilde{a} =0,36

Во входной части коллектора течение жидкости зависит от соотношения площадей проходного сечения кольцевого канала F_0 и входной части коллектора F_1 .

После выхода жидкости из кольцевого канала во входную часть коллектора на стенке корпуса образуется кольцевая полузатопленная струя.

В РКС с расстоянием $\tilde{a} \ge 0$ и отношении площадей $F_0/F_1 < 1$ возможны два варианта преобразования струи. В одном варианте при относительно большой высоте \tilde{h} кольцевая полузатопленная струя в результате поворота над расположенной у днища застойной зоной либо сразу принимает вид осесимметричной круглой струи, расположенной на продольной оси РКС, либо последовательно преобразуется в цилиндрическую затопленную струю и осесимметричную круглую струю, расположенную на продольной оси РКС. В другом варианте при относительно малой высоте \tilde{h} кольцевая полузатопленная струя достигает периферийной части днища и в результате поворота потока либо сразу становится круглой осесимметричной струёй, либо

преобразуется в цилиндрическую или коническую полузатопленную струю соответственно на днищах плоской и эллиптической форм и принимает вид осесимметричной круглой струи.

Площадь поперечного сечения цилиндрической и конической полузатопленных струй f_1 во входной части коллектора зависит от отношения площадей F_0/F_1 . При отношении площадей $F_0/F_1<1$ площадь f_1 примерно соответствует максимальной площади поперечного сечения кольцевой полузатопленной струи во входной части коллектора, а при отношении площадей $F_0/F_1 \ge 1$ площадь $f_1=(0,7-0,8)$ F_1 .

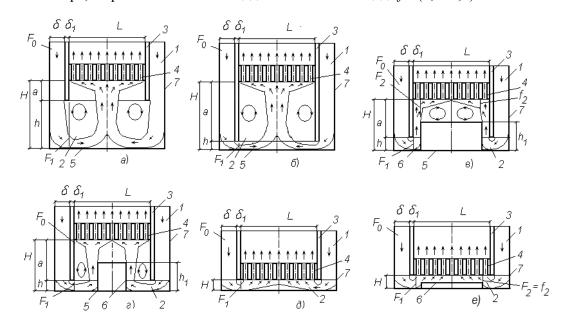


Рис. 5. Типичные конструкции и схемы течения жидкости в проточных частях осесимметричных РКС цилиндрической формы с боковым подводом и центральным отводом жидкости:

- а), б) РКС с относительно большой и малой высотой входа в коллектор и смещенной решеткой в центральной обечайке; в), г) РКС с относительно малой высотой входа в коллектор со смещенной трубной доской в центральной обечайке при наличии на днище вставок относительно большого и малого диаметров, соответственно;
- д), е) РКС с относительно малой высотой входа в коллектор без смещения решетки в центральной обечайке при отсутствии и наличии на днище вставок, соответственно;
 - 1 кольцевой канал; 2 коллектор; 3 обечайка; 4 трубная доска; 5 днище; 6 цилиндрическая вставка; 7 корпус

В основной части коллектора течение жидкости определяется положением трубной доски в обечайке.

При расстоянии a=0 и отношении площадей $F_0/F_1 \ge 1$ полузатопленная струя преобразуются в поток, движущийся к центру коллектора в щелевом канале между днищем и трубной доской с раздачей потока по пути через отверстия средней и (или) центральной части трубной доски (рис. 5д).

При расстоянии $a \ge 0$ и отношении площадей $F_0/F_1 < 1$ полузатопленная струя (при относительно малой высоте \tilde{h}) или затопленная струя (при относительно большой высоте \tilde{h}) в результате поворота преобразуются в круглую затопленную струю (рис. 5a, б).

При a > 0 во входной части центральной обечайки возможно течение круглой затопленной струи (рис. 5a, б), движение жидкости с касанием внутренней поверхности боковой стенки центральной обечайки и наружной поверхности боковой стенки цилиндрической вставки (рис. 5в) и течение жидкости с касанием наружной поверхности боковой стенки цилиндрической вставки (рис. 5г).

В РКС с цилиндрической вставкой в центральной части коллектора течение жидкости определяется отношением высоты цилиндрической вставки h_1 к расстоянию от днища коллектора до торцевой части центральной обечайки h. При $a \ge 0$ и $h_1/h \le 1$ кольцевая полузатопленная струя течет вдоль боковой стенки вставки (рис. 5г), а при a > 0 и $h_1/h > 1$ — также вдоль боковой стенки цилиндрической вставки и (или) кольцевая полузатопленная струя преобразуется в стесненный поток жидкости в кольцевом канале между боковыми стенками центральной обечайки и вставки (рис. 5в). После ее выхода с боковой стенки цилиндрической вставки или жидкости из кольцевого канала образуются кольцевая затопленная струя или полузатопленная струя на боковой стенке центральной обечайки.

Течение жидкости в РКС характеризуется наличием застойных и (или) вихревых зон, а также перераспределением профиля скорости в струях в результате их расширения и поворота.

В выходной части коллектора возможны различные варианты попадания жидкости на трубную доску.

В РКС без дополнительных конструктивных элементов круглая затопленная струя при $a \ge 0$ в зависимости от расстояния между ее начальным поперечным сечением и трубной доской попадает на ее центральную и (или) среднюю части (рис. 5а, б). При попадании струи в среднюю и (или) центральную части трубной доски одна часть жидкости непосредственно входит в ее отверстия в месте встречи с трубной доской, а другая часть жидкости движется соответственно вдоль периферийной и (или) средней частей трубной доски с раздачей потока по пути через отверстия соответствующих частей трубной доски.

В РКС с цилиндрической вставкой возможен случай одновременного попадания жидкости на периферийную и (или) среднюю части трубной доски (рис. 5в, г). Одна часть жидкости в месте встречи с трубной доской входит непосредственно в ее отверстия, а другая часть в результате поворота попадает в щелевой канал, образованный трубной доской и крышкой цилиндрической вставки. Течение жидкости в щелевом канале определяется отношением площади проходного сечения его входной части F_2 к площади поперечного сечения жидкости на входе в него f_2 . При f_2/F_2 =1 жидкость движется с касанием крышки вставки и центральной и (или) средней частей трубной доски (рис. 5е), а при f_2/F_2 <1 — только вдоль центральной и (или) средней части трубной доски в виде плоской полузатопленной струи (рис. 5в). В обоих случаях жидкость движется к центру коллектора с раздачей потока по пути через отверстия соответствующих частей трубной доски.

Конструктивные характеристики, определяющие гидродинамику проточной части РКС цилиндрического типа без дистанционирующей вставки: максимальный радиус перфорированной части трубной доски, высота коллектора и высота входа в

него, число и радиус отверстий в трубной доске, наружный радиус обечайки, внутренние радиусы обечайки и корпуса. Для подобной РКС при наличии дистанционирующей вставки кроме перечисленных ранее характеристик гидродинамику определяют минимальный радиус перфорированной части трубной доски и радиус дистанционирующей вставки (рис. 1в).

Конструктивные характеристики, влияющие на гидродинамику проточной части РКС плоского типа: высота коллектора и высота входа в него (при смещения системы пластин от торцевой части стенки выходного канала), расстояние от системы пластин до торцевой части стенки выходного канала, число и ширина каналов в системе пластин, ширина корпуса и центрального канала, толщина стенки центрального канала и угол среза ее торцевой части (при наличии среза) (рис. 1г).

3. Свойство подобия и отличия гидродинамики проточных частей РКС

В РКС различных типов с различными условиями подвода и отвода жидкости общими характерными участками проточной части являются входная, основная и выходная части коллектора.

В результате сравнительного анализа установлено неизвестное ранее свойство подобия гидродинамики проточных частей осесимметричных РКС цилиндрического и плоского типов с обратным поворотом жидкости при различных местах ее подвода и отвода.

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

Указанное свойство обусловлено:

- увеличением площади поперечного сечения затопленных и полузатопленных струй и, соответственно, снижением средней скорости жидкости в них, происходящим за счет ее торможения;
- течением затопленных и полузатопленных струй с углом одностороннего расширения равным 12° ;
 - преобразованием затопленных струй в полузатопленные струи и наоборот;
- изменением местоположения максимальной скорости в поперечном сечении струи при ее повороте и далее по ходу течения жидкости;
- совпадением между собой местоположений максимальной скорости жидкости в падающей на выходной элемент струе и максимального массового расхода жидкости на выходе из него;
- прямо пропорциональной зависимостью средней скорости в падающей на выходной элемент струе от максимального массового расхода (скорости) жидкости на выходе коллектора;
- обратной степенной зависимостью максимального массового расхода (скорости) жидкости на выходе из коллектора от отношения коэффициентов местного гидравлического сопротивления выходного элемента и коллектора;

- дросселированием потока и, соответственно, увеличением скорости течения жидкости во входной части коллектора при отношении площадей проходного сечения подводящего канала и кольцевого (щелевого) зазора во входной части коллектора большем либо равном единице;
- входом одной части жидкости в отверстия (каналы) выходного элемента, расположенные в месте встречи струи, и растеканием другой часть жидкости вдоль остальной части выходного элемента с изменением расхода по пути при попадании струи на выходной элемент.

Следует отметить, что в РКС цилиндрического и плоского типов в качестве выходного элемента используют соответственно трубную доску и систему пластин, а на выходе из выходного элемента определяют соответственно распределение массового расхода жидкости и ее скорость.

В результате сравнительного анализа также выявлен ряд отличий гидродинамики проточных частей РКС различных типов.

РКС цилиндрического типа имеют место осесимметричная круглая, цилиндрическая, коническая и кольцевая струи, а для РКС плоского типа характерны струи с прямоугольным (квадратным) поперечным сечением.

В РКС цилиндрического типа по ходу потока один тип струй преобразуется в другой тип, а в РКС плоского типа общая струя делится на отдельные части или отдельные части струи сливаются в общую струю.

РКС с различными местами подвода и отвода жидкости различаются последовательностью преобразования одних типов струй в другие.

Перечисленные отличия не ставят под сомнение факта установления неизвестное ранее свойство подобия гидродинамики проточных частей осесимметричных РКС цилиндрического и плоского типов с обратным поворотом жидкости при различных местах подвода и отвода жидкости.

Указанное свойство подобия гидродинамики проточных частей осесимметричных РКС имеет важное практическое значение. Его использование позволяет прогнозировать характер течения жидкости в коллекторе и получать полуэмпирические соотношения для расчета распределения массового расхода (скорости) жидкости на выходе из РКС цилиндрического и плоского типов с обратным поворотом жидкости при различных сочетаниях мест подвода и отвода жидкости.

Конструкции РКС второго контура ПТО РУ типа БН и корпусных РУ, обеспечивающие необходимый характер гидродинамической неравномерности на выходе из коллектора, защищены в виде патентов РФ на изобретения [23—36] и полезные модели [37, 38].

Рассмотренное свойство использовано при гидродинамической оптимизации проточных частей осесимметричных РКС реакторов и теплообменников ЯЭУ без проведения многочисленных дорогостоящих экспериментов и расчетов.

Выводы

1. Установлено неизвестное ранее свойство подобия гидродинамики проточных частей осесимметричных РКС цилиндрического и плоского типов с обратным поворотом жидкости, заключающееся в проявлении подобной гидродинамики проточных частей РКС с различными сочетаниями мест подвода и отвода жидкости. Указанное свойство основано на наличии в проточной части указанных РКС струйно-вихревого

течения жидкости, затопленных и полузатопленных струй, универсальности характерных для этого типа течения свойств течения жидкости, идентичности механизмов преобразования одних типов струй в другие и влияния отдельных гидродинамических характеристик падающей на выходной элемент струй и отношения коэффициентов местного гидравлического сопротивления выходного элемента и коллектора на распределение массового расхода на выходе из коллектора.

2. Свойство подобия гидродинамики проточных частей осесимметричных РКС позволяет прогнозировать характер течения жидкости в проточной части коллектора и получать полуэмпирические соотношения для расчета распределения массового расхода (скорости) жидкости на выходе из РКС цилиндрического и плоского типов с обратным поворотом жидкости при различных сочетаниях мест подвода и отвода жидкости.

Список литературы

- 1. *Gabrianovich B.N., Del'nov V.N.* Hydrodynamics of Liquid Metal Cooled NPP header systems. Proc. 11th Meeting of the International Association for Hydraulic Research. TWG-FR/125. Hydrodynamics and heat transfer in reactor components cooled by liquid metal coolants in single/two-phase. Obninsk, 2004, pp. 380—402.
- 2. *Gabrianovich B.N., Delnov V.N.* Investigation of hydrodynamics in the distributing header of the second circuit of the intermediate heat exchanger for fast reactor. Proc. 6th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulic. Grenoble, France, 1993, pp. 1013—1020.
- 3. *Габрианович Б.Н.*, *Дельнов В.Н.* Гидродинамика коллекторных систем ядерных энергетических установок // Известия вузов. Ядерная энергетика, 2007, № 1, с. 113—121.
- 4. Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н. Гидродинамика раздающего коллектора второго контура промежуточного теплообменника реакторной установки типа БН. Том 2. Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. С. 203—215.
- 5. *Габрианович Б.Н.*, *Дельнов В.Н.* Гидродинамические неравномерности теплоносителя на входе в активную зону ядерного реактора, обусловленные коллекторным эффектом // Атомная энергия, 2011, том 11, вып. 3, с. 177—180.
- 6. *Габрианович Б.Н.*, *Дельнов В.Н.* Гидродинамические эффекты в раздающей коллекторной системе реакторной установки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем // Новые промышленные технологии, 2011, № 1, с. 43—47.
- 7. Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н. Закономерности формирования гидравлических неравномерностей на выходе из коллекторной системы реакторной установки // Теплоэнергетика, 2014, № 5, с. 54—59.
- 8. Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н., Юрьев Ю.С. Закономерности формирования гидравлических неравномерностей на выходе из коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ // Труды научно-техн. конф. «Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Теплофизика-2012». Обнинск, 2012.
- 9. Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н. Методика определения расхода теплоносителя на выходе из напорной камеры промежуточного теплообменника РУ типа БН. Труды научно-технической конф. «Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Теплофизика-2011». Обнинск, 2011.
- 10. Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н. Особенности гидродинамики проточных частей коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. 215 с.

- 11. *Габрианович Б.Н.*, *Дельнов В.Н.* Особенности гидродинамики раздающих коллекторных систем ядерных реакторов типа BBЭP / Труды 4-й межд. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с BBЭР». Подольск, 2005.
- 12. Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н., Юрьев Ю.С. Особенности течения теплоносителя в раздающих коллекторных системах реакторов ЯЭУ с жидкометаллическим охлаждением / Труды 3 межотрасл. конф. ТЖМТ-2008 «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». Обнинск, 2008.
- 13. Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н. Оценка гидродинамических неравномерностей на выходе из осесимметричных цилиндрической и плоской раздающих коллекторных систем с боковым подводом и центральным отводом потока. Препринт ФЭИ-3197. Обнинск, 2010. 12 с.
- 14. Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н. Оценка гидродинамических неравномерностей на выходе из осесимметричных цилиндрической и плоской раздающих коллекторных систем с центральным подводом и боковым отводом потока. Препринт ФЭИ-3222. Обнинск, 2012. 14 с.
- 15. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. и др.* Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990. $360 \, \mathrm{c}$.
- 16. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С.* Гидродинамические расчеты: справочное учебное пособие. Обнинск, 2007. 184 с.
- 17. *Номофилов Е.В. Романова Т.М.* Исследование некоторых особенностей течения жидкости в прямоугольном и цилиндрическом раздаточных коллекторах. Препринт ФЭИ-647. Обнинск, 1975. 20 с.
- 18. *Номофилов Е.В., Романова Т.М.* Расчет гидродинамики криволинейного напорного коллектора // ВАНТ. Серия: Ядерная техника и технология, 1989, вып. 4, с. 20—28.
- 19. *Номофилов Е.В., Романова Т.М., Филимонов В.Т.* Методика расчета полей скорости и давления в плоском раздаточном коллекторе. Препринт ФЭИ-391. Обнинск, 1972. 20 с.
- 20. *Номофилов Е.В., Романова Т.М., Филимонов В.Т.* Расчет полей скорости и давления в цилиндрическом раздаточном коллекторе. Препринт ФЭИ-451. Обнинск, 1973. 45 с.
- 21. *Номофилов Е.В., Романова Т.М., Филимонов В.Т.* Расчеты полей скорости и давления в плоском раздаточном коллекторе: Препринт ФЭИ-391. Обнинск, 1973. 36 с.
- 22. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М.: Атомиздат. 1975. 408 с.
- 23. *Субботин В.И., Кащеев В.М., Номофилов Е.В. и др.* Решение задач реакторной теплофизики на ЭВМ. М.: Атомиздат, 1979. 144 с.
- 24. *Трубаков Ю.П., Шалина О.В.* Оптимизация гидродинамических характеристик модели симплексным методом планирования эксперимента. Препринт ФЭИ-1936. Обнинск, 1988. 12 с.
- 25. Юрьев Ю.С., Владимиров М.А. Расчет гидравлических характеристик плоского осесимметричного раздаточного коллектора. Препринт ФЭИ-1327. Обнинск, 1982. 18 с.

Информация об авторах

Дельнов Валерий Николаевич, д-р техн. наук, начальник управления интеллектуальной собственности АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: delnov@ippe.ru

МАССОПЕРЕНОС ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ В КОНТУРАХ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ*

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

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», Обнинск, Россия

Для расчета массопереноса продуктов коррозии выделен гидравлический тракт с циркуляцией основной массы теплоносителя. Замкнутый контур условно разбивается на ряд участков, характеризующихся постоянными геометрическими и гидродинамическими параметрами. Элементы проточной части моделируются круглыми каналами. Используется лагранжева система координат при математическом описании процессов в каналах.

Создано два вида моделей для оценки массопереноса продуктов коррозии в контурах с натриевым теплоносителем в одномерном приближении. В модели первого вида учитываются растворение и кристаллизация, а также образование взвеси переносимой примеси в натрии. Модель второго вида учитывает также химическое взаимодействие примеси в натрии. В модели второго вида рассматривается массоперенос хрома в натрии с учетом образования NaCrO₂ и железа в натрии с учетом образования Na4FeO₃.

Применительно к свинцовому теплоносителю разработана модель оксидирования стали для случая, когда преобладает механизм образования двухслойной оксидной пленки на поверхности стали. Решена задача моделирования в одномерном приближении массопереноса железа в стальном контуре со свинцом с учетом процессов образования и переноса взвесей частиц и химического взаимодействия примесей в теплоносителе, а также образования двухслойной оксидной пленки на поверхности стали.

Получена зависимость максимальной скорости коррозии стали от толщины подслоя железо-хромистой шпинели и температуры, а также зависимость распределения толщины подслоев магнетита и шпинели на поверхности стали по длине циркуляционной петли. В местах с высокой температурой контура магнетитный подслой отсутствует, а в областях с низкой температурой увеличивается его толщина. Изменение толщины шпинельного подслоя на поверхности стали по всей длине контура в течение времени положительно, а скорость его роста в местах с высокой температурой примерно на порядок выше, чем в областях с низкой температурой. Определено распределение размера частиц продуктов коррозии в натриевых и свинцовых контурах.

В ходе эксплуатации энергетических установок с жидкометаллическими теплоносителями в контурах систем теплосъема наблюдается массоперенос продуктов коррозии, образующихся при взаимодействии жидких металлов с конструкционными материалами. Массоперенос продуктов коррозии может приводить к отрицательным эффектам в циркуляционных контурах установок, таким как ухудшение гидравлических характеристик и теплообмена, что в конечном итоге может стать причиной аварийных ситуаций и потере работоспособности установки.

Основной задачей исследований массопереноса является определение количественных характеристик, позволяющих оценить допустимые режимы работы циркуляционных контуров.

Для различных видов жидкометаллических теплоносителей существуют как общие закономерности, так и частные, присущие данному теплоносителю. В представленном докладе рассмотрены два различных теплоносителя, натрий и свинец.

_

 $^{^*}$ Опубликовано в сборнике докладов на V Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии атомной энергетики (МНТК НИКИЭТ – 2018)», АО «НИКИЭТ», г. Москва, 2–5 октября 2018 г. – М.: Издво АО «НИКИЭТ», 2018. С. 500–511. – 1 CD–8.

Предложено два вида моделей для оценки массопереноса продуктов коррозии в контурах с натриевым теплоносителем в одномерном приближении. В модели первого вида учитываются растворение и кристаллизация, а также образование взвеси переносимой примеси в натрии. С использованием данной модели выполнены расчеты массопереноса продуктов коррозии в неизотермическом натриевом контуре [1].

Модель второго вида учитывает также химическое взаимодействие примеси в натрии. В модели второго вида рассматривается массоперенос хрома в натрии с учетом образования NaCrO₂ и железа в натрии с учетом образования Na₄FeO₃ [2].

Применительно к свинцовому теплоносителю разработана модель оксидирования стали для случая, когда преобладает механизм образования двухслойной оксидной пленки на поверхности стали.

Решена задача моделирования в одномерном приближении массопереноса железа в стальном контуре со свинцом с учетом процессов образования и переноса взвесей частиц и химического взаимодействия примесей в теплоносителе, а также образования двухслойной оксидной пленки на поверхности стали. Полученные значения концентрации кислорода в свинце реактора не ниже равновесных в области существования Fe-Cr шпинели, что подтверждает устойчивость данного оксидного покрытия в рассматриваемых условиях [3].

1. Массоперенос продуктов коррозии в натриевом контуре без учета химического взаимодействия примесей

Для расчета массопереноса продуктов коррозии в неизотермическом замкнутом натриевом контуре выделен гидравлический тракт с циркуляцией основной массы теплоносителя. Контур условно разбивается на ряд участков, характеризующихся постоянными геометрическими и гидродинамическими параметрами. Элементы проточной части моделируются круглыми каналами. Используется лагранжева система координат при математическом описании процессов в каналах.

Модель дает комплексное описание процесса массопереноса примесей в контурах с натрием, включая следующие этапы:

- 1) выход компонентов конструкционных материалов (Fe, Cr, Ni) в теплоноситель;
 - 2) перенос компонентов конструкционных материалов потоком теплоносителя;
- 3) образование зародышей твердой фазы при критическом пересыщении теплоносителя по металлическим примесям (хром);
 - 4) коагуляция частиц в образовавшейся мелкодисперсной системе;
 - 5) осаждение частиц на поверхности проточной части;
 - 6) осаждение растворенных примесей на поверхности каналов проточной части.

Эволюция дисперсной системы описывается уравнением (основное кинетическое уравнение коагуляции):

$$\frac{df(m)}{d\tau} = \frac{1}{2} \int_{0}^{m} \beta(m - m') f(m - m') f(m') dm' - \int_{0}^{\infty} \beta(m, m') f(m) f(m') dm' + \frac{I1(m) + I2(m)}{m \cdot dm} - k_{o}(m) f(m) \frac{S}{V} - kz(m) f(m), \tag{1}$$

где f(m) — плотность распределения частиц по массам;

m, m' – массы соударяющихся частиц;

 β – ядро кинетического уравнения;

S и V – площадь поверхности, омываемой теплоносителем, и объём рассматриваемого участка проточной части циркуляционного контура;

 k_0 (*m*) – коэффициент отложения частиц на поверхности каналов;

kz(m) – коэффициент, характеризующий осаждение частиц в застойных зонах;

I1(m), I2(m) — интенсивности объемного и эрозионного источников взвеси для частиц массой m, кг/(м³·с).

Расчеты процесса массопереноса продуктов коррозии в неизотермическом натриевом контуре [1] показали, что примерно через 5,5 часов в натрии первого контура устанавливается равновесная дисперсная система, параметры которой (плотность распределения и концентрация частиц) не изменяются при дальнейшем увеличении времени. Параметры сформировавшейся дисперсной системы не зависят от формы кривой плотности распределения зародышей частиц.

Расчет позволил получить количественные характеристики образующейся самосохраняющейся дисперсной системы продуктов коррозии в натриевом контуре. Средний размер частиц взвесей продуктов коррозии составляет около 0,02 мкм, размеры основной массы частиц дисперсной фазы не превышают 0,04 мкм. Концентрация всего спектра частиц составляет около 0,0004 млн⁻¹, и они, наряду с растворенными компонентами конструкционного материала, в основном определяют массоперенос продуктов коррозии в контуре, рисунок 1.

Как следует из расчета, в местах с наибольшей плотностью потока массы скорость роста отложений составляет около 0,38 мкм/год в зоне нагрева (без учета растворения отложений) и 0,08 мкм/год в промежуточном теплообменнике при пористости отложений 50%.

В зоне нагрева образование отложений происходит на входном участке, на выходе из этой зоны имеет место растворение конструкционного материала в натрии.

Распределение плотности потока массы продуктов коррозии по длине промежуточного теплообменника и зоны нагрева представлены на рис. 2 и рис. 3.

Полученные данные свидетельствуют о том, что массоперенос продуктов коррозии конструкционного материала в установившемся режиме работы установки (на номинальных параметрах), не приведет к изменению эксплуатационных характеристик натриевого контура в течении всего срока эксплуатации.

Результаты исследований массопереноса компонентов стали в натрии при низком содержании кислорода в натрии представлены в [1].

Анализ отложений показал, что их состав в основной массе близок к составу растворяемой стали. Оксидов компонентов стали и двойных оксидов в отложениях не обнаружено. Поэтому химическое взаимодействие компонентов стали с натрием не учитывалось.

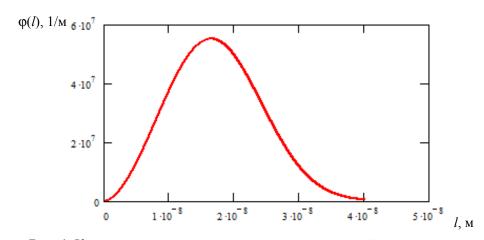


Рис. 1. Кривая плотности распределения массы взвесей продуктов коррозии по размерам частиц в натрии первого контура на входе в промежуточный теплообменник [1]



Рис. 2. Распределение плотности потока массы продуктов коррозии, переносимых на поверхность каналов, по длине промежуточного теплообменника [1]

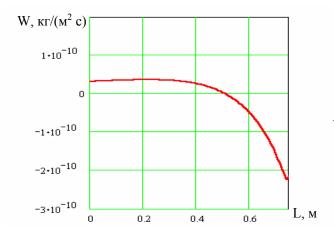


Рис. 3. Распределение плотности потока массы продуктов коррозии, переносимых на поверхность (с поверхности) каналов, по длине зоны нагрева [1]

2. Моделирование массопереноса хрома в натриевом контуре с учетом их химического взаимодействия с кислородом

В контурах из хромоникелевой нержавеющей стали при определенном содержании кислорода в натрии и температуре образуются наряду с оксидом натрия Na₂O соединения кислорода и натрия с элементами конструкционных материалов Na₄FeO₃ и NaCrO₂.

Условия образования соединения NaCrO₂ на поверхности хромоникелевой нержавеющей стали исследованы в работе [4]. Получена зависимость для определения границы стабильности NaCrO₂ на поверхности стали в виде

$$\lg c = -3326/T + 4,51 - 0,5\lg(a(Cr)),$$
 (2)

где c – концентрация кислорода в натрии, млн⁻¹, a(Cr) – активность хрома в стали; T – температура, К.

В соответствии с этой зависимостью для стали AISI 316 (a(Cr) = 0,4) соединение NaCrO₂ стабильно не выше температуры 600 °C при $c \approx 8$ млн⁻¹.

Рассматривается массоперенос хрома в натрии с учетом образования системы натрий-кислород-хром и протекания следующей реакции в теплоносителе

$$Cr + 2Na2O = 3Na + NaCrO2.$$
 (3)

Полагаем, что кислород в натрии находится в форме Na₂O. Другими реакциями оксида натрия пренебрегаем. С учетом конвективного переноса растворенного сложного оксида в натрии получим изменение его концентрации в теплоносителе в мольных долях:

$$\frac{dc(\text{NaCrO}_2)}{d\tau} = K \rightarrow \left(c(\text{Cr})c(\text{Na}_2\text{O})^2 - \frac{c(\text{NaCrO}_2)}{K}\right) + 4\chi_{ox}\left(\frac{c(\text{NaCrO}_2)_w - c(\text{NaCrO}_2)}{D_k}\right), (4)$$

где $c(NaCrO_2)$, $c(Na_2O)$, c(Cr) – концентрации компонентов в м. д.;

K – константа равновесия реакции (3);

K → – константа скорости реакции (3);

 D_k – диаметр канала;

 χ_{ox} — коэффициент массоотдачи сложного оксида от стенки канала;

индекс w характеризует пристеночные значения концентраций.

Аналогичные зависимости получены для изменения концентрации хрома и кислорода. Для замыкания полученной системы уравнений определяются пристеночные концентрации компонентов реакции.

Решение полученной системы уравнений совместно с уравнением (1) и замыкающими соотношениями позволяет рассчитать распределение растворенных компонентов реакции в натрии и взвесей, а также их потоки на стенки каналов в контуре. При этом производительность источника дисперсной фазы в потоке теплоносителя оценивается на основании превышения поступления компонентов реакции в натрий над пределом их растворимости в нем.

Выполнены эксперименты и проведены расчеты массопереноса хрома для охлаждаемого канала. Эксперименты проводились при содержании кислорода в натрии 80 млн^{-1} ($\mathbb{N} \ 1$) и 140 млн^{-1} ($\mathbb{N} \ 2$) и повышенной температуре (до 770 °C на источнике примеси). Характеристики источника примесей и условия экспериментов приведены в табл. 1.

По результатам анализа проб из охлаждаемого канала на содержание хрома получены данные о потоке хрома на стенки канала, которые представлены на рис. 4.

Проведены параметрические расчеты для модели и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными по определению распределения отложений хрома в канале охлаждаемой трубки при концентрации кислорода в натрии 80 и 140 млн⁻¹ (рис. 4).

Таблица 1. Характеристики источника примесей и условия экспериментов

Условия эксперимента	Эксперимент № 1	Эксперимент № 2
Материал тепломассообменной трубки	никель	железо
Источник примеси	стружка Х18Н10Т	
Площадь поверхности стружки; S, м ²	1,03	1,09
Вес стружки; т, кг	0,58	0,99
Температура натрия; t, °C:		
в источнике примеси	770	780
на входе в массообменную трубку	745	745
на выходе из массообменной трубки	420	505
Концентрация кислорода в натрии на входе в ВТУ, млн ⁻¹	80	140
Скорость натрия в тепломассообменной трубке; v, м/с	0,55	1,0
Время накопления примеси; т, ч	116	161

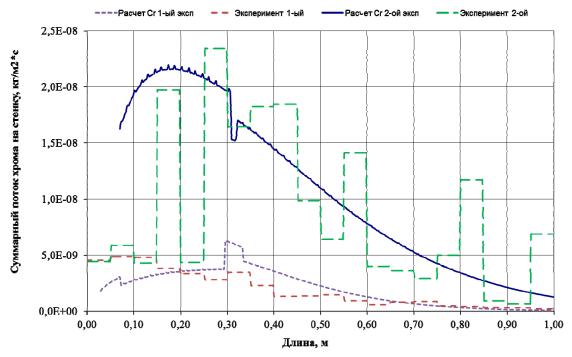


Рис. 4. Распределение удельного потока хрома на стенку по длине канала (концентрация кислорода в натрии: 1-й эксперимент ≈ 80 млн⁻¹, 2-й — ≈ 140 млн⁻¹)

3. Моделирование массопереноса продуктов коррозии стали в контурах со свинцовым теплоносителем

Модель массопереноса продуктов коррозии стали в контурах со свинцовым теплоносителем состоит из двух частей: в первой части моделируются процессы выхода железа из стали в теплоноситель через оксидное покрытие и связанные с этим процессы образования или распада оксидной пленки; во второй части моделируются процессы химического взаимодействия железа с кислородом в свинце и переноса продуктов этой реакции в циркуляционном контуре. Обе части модели органически связаны между собой, поскольку процессы образования или распада оксидного покрытия взаимно влияют на процессы переноса компонентов реакции в циркуляционном контуре.

Описание первой части модели, представлено в докладе [5], оно было уточнено в соответствии с данными [6].

Состав оксидной пленки на поверхности стали в свинцовом теплоносителе может изменяться от железной шпинели до железо-хромистой шпинели нестехиометрического состава. Ее рост может быть обусловлен как образованием магнетита в поверхностном слое оксида, контактирующим со свинцом, так и образованием оксидов хрома, в слое, прилегающем к поверхности раздела оксид-сталь.

Рассмотрен случай двухслойной оксидной пленки. В зависимости от условий верхний слой, контактирующий со свинцом, (обозначим его толщину x_2) состоит из магнетита либо отсутствует вообще. Нижний слой (толщиной x_1) термодинамически более устойчив, чем верхний, его состав идентифицирован как смесь магнетита и двойного оксида $FeCr_2O_4$ и в некоторых случаях описывается формулой ($Fe_{0,88}Cr_{0,12}$) $_3O_4$. Такой состав шпинели принят в нашем рассмотрении. Дополнительно вводится толщина диффузионного слоя для хрома в материале стальной стенки x_{Cr} . Эта величина пропорциональна толщине шпинельного подслоя x_1 , поэтому

$$x_{\rm Cr} = k_{sp} x_1, \tag{5}$$

где k_{sp} – коэффициент, величина которого зависит от стехиометрии шпинели.

Потоками кислорода в материал стенки и хрома в магнетитный подслой пренебрегаем ввиду их малости для рассматриваемого случая.

Для определения активности хрома в шпинельном подслое a_{Cr}^{x} используем зависимости константы равновесия реакций образования магнетита (6) и двойного оксида (7):

$$3Fe + 4PbO \Leftrightarrow Fe_3O_4 + 4Pb,$$
 (6)

$$Fe + 2Cr + 4PbO \Leftrightarrow FeCr_2O_4 + 4Pb.$$
 (7)

Основная система уравнений представлена в [5]. В уравнение для активности кислорода на границе между магнетитным и шпинельным слоями a_x^{O} введена величина x_{Cr} (вместо x_1):

$$a_x^{O} = a_2^{O} - \frac{64}{19} \cdot \frac{x_2}{x_{Cr}} \cdot \frac{K_{np}^{Cr}}{K_{np2}^{O}} (a_{Cr} - a_{Cr}^x).$$
 (8)

Совместное решение полученных уравнений при заданных граничных условиях позволяет определить потоки примесей, идущие на образование оксидов на поверхности стали, выход железа из стали и поступление его в свинец.

Для подтверждения правильности модели формирования оксидного покрытия на стали в потоке свинца выполнялись расчеты для температуры 650 °C. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по окислению стали ЭИ-852 при a_0 =0,01 показывает их удовлетворительное соответствие. Получено, что для рассматриваемых условий при активности кислорода в свинце от 1 до 10^{-3} преобладает магнетитный механизм образования оксидного покрытия, ниже 10^{-3} имеет место смешанный (магнетитный + Fe-Cr шпинельный) механизм оксидирования. При активности кислорода 0,0001 и ниже имеет место только Fe-Cr шпинельный механизм оксидирования, магнетит практически не образуется.

Вторая часть модели массопереноса продуктов коррозии стали в контурах со свинцовым теплоносителем рассматривает процессы химического взаимодействия железа с кислородом в свинце и переноса продуктов этой реакции в циркуляционном контуре из нержавеющей стали. Предполагается, что в объеме жидкого металла протекает реакция (6) между растворенными примесями.

Учитывая конвективный перенос магнетита в канале (круглого сечения), получим в мольных долях

 $dc(\text{Fe}_3\text{O}_4)/d\tau = K^{\rightarrow}(c(\text{Fe})^3 c(\text{Pb O})^4 - c(\text{Fe}_3\text{O}_4)/K) + 4\chi_{ox}(c(\text{Fe}_3\text{O}_4)_w - c(\text{Fe}_3\text{O}_4))/D_k$ (9) где c(Fe), $c(\text{Fe}_3\text{O}_4)$, c(PbO) – концентрации железа, магнетита и оксида свинца в потоке теплоносителя;

 $c(\text{Fe}_3\text{O}_4)_w$ – концентрация магнетита в свинце у стенки канала;

 D_k – гидравлический диаметр канала;

K – константа равновесия реакции (6);

K→ – константа скорости реакции (6);

 χ_{ox} — коэффициент массоотдачи магнетита от стенки канала.

Аналогичные зависимости получены для изменения концентрации железа и оксида свинца в теплоносителе.

В расчеты по представленной выше методике введены дополнительные условия: при достижении пересыщения примесей, достаточного для образования зародышей твердой фазы в объеме теплоносителя, пересыщение снимается, а образовавшаяся дисперсная система добавляется к уже имеющейся в теплоносителе системе частиц.

Решение полученных уравнений совместно с уравнением (1) и замыкающими соотношениями производится в системе координат, связанной с потоком теплоносителя. Это позволяет рассчитать распределение растворенных компонентов реакции и взвесей в контуре, а также скорости выхода железа из стали в теплоноситель через оксидное покрытие и образования или распада оксидной пленки.

Расчеты по предложенной модели проводились применительно к первому контуру реакторной установки со свинцовым теплоносителем [7]. Для их проведения в этом контуре выделен гидравлический тракт с циркуляцией основной массы теплоносителя, рис. 5. Основной тракт состоит из ряда участков, отличающихся геометрическими и гидродинамическими характеристиками. Участки моделируются прямыми круглыми каналами.

На рис. 6 показаны расчетные кривые плотности распределения по размерам установившейся системы частиц в свинцовом теплоносителе. Примерно через 19 часов работы в контуре устанавливается равновесная система частиц со средним размером около 1 мкм.

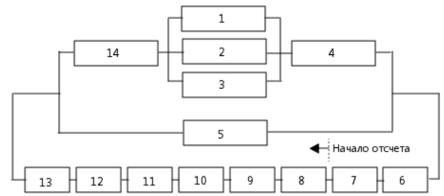


Рис. 5. Схема расположения участков основного контура циркуляции установки: 1, 2, 3 – зоны нагрева; 4 – верхнее пространство; 5 – боковое пространство; 6 – подъемный участок; 7 – патрубки ПГ; 8 – ПГ (начало цикла); 9 – входной коллектор насоса; 10 – выходной коллектор насоса; 11 – бассейн; 12 – опускной участок; 13 – напорная камера; 14 – нижнее пространство

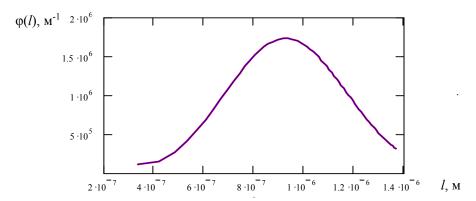


Рис. 6. Плотность распределения массы взвесей по размерам частиц в свинце для установившейся дисперсной системы

Распределение потоков магнетита и частиц, осаждающихся на поверхность проточной части, по длине циркуляционного контура (характеризуется временем прохождения по контуру) приведено на рис. 7. Начальное значение толщины оксидной пленки по всей поверхности принято равным 10 мкм. Отрицательные значения потока соответствуют диссоциации магнетита. Точка начала отсчета времени находится на входе теплоносителя в парогенератор. Как видно из рис. 7, имеет место диссоциация магнетита на входе в парогенератор. По длине парогенератора направление потока магнетита меняет знак. Поток частиц на поверхность каналов в парогенераторе на входе имеет максимальное значение $2 \cdot 10^{-9}$ кг/($m^2 \cdot c$) и постепенно снижается к выходу до значения 10^{-9} кг/($m^2 \cdot c$). На поверхности бассейна происходит накопление отложений: магнетита из раствора со скоростью 10^{-9} кг/($m^2 \cdot c$) и с потоком частиц около $8 \cdot 10^{-11}$ кг/($m^2 \cdot c$). Потоки магнетита на стенки резко увеличи-

ваются в каналах зоны нагрева (на графике время прохождения теплоносителем каналов зоны нагрева от 112,04 до 112,73 с включает последовательно время прохождения каждого из трех параллельных участков в соответствующем масштабе). На выходе из зоны нагрева может происходить уменьшение толщины оксидного слоя за счет диссоциации магнетита со скоростью примерно в 3 раза выше, чем его нарастание за счет накопления отложений при осаждении частиц взвеси.

Результаты расчета распределения потоков растворенного железа, выходящего из стали, по длине гидравлического тракта первого контура установки показали, что максимальный выход железа из стали имеет место на выходе каналов зоны нагрева. В экстремальной точке поток железа достигает $7.5 \cdot 10^{-9}$ кг/(м²·с), что соответствует уменьшению толщины стальной стенки со скоростью около 30 мкм/год.

При длительной эксплуатации установки за счет массопереноса происходит изменение толщины оксидного покрытия, причем в различных участках контура с различной скоростью. Кроме того, при установившейся концентрации кислорода в свинце в зависимости от температуры и скорости потока в одних участках контура может происходить увеличение толщины оксидного покрытия, а в других — его уменьшение. Более того, если рассматривать отдельно каждый подслой оксидного покрытия, то изменение их толщины в зависимости от расположения в контуре может происходить как в одном, так и в противоположных направлениях. В участках контура с повышенной температурой происходит диссоциация магнетитного подслоя; при этом через определенное время он исчезает. На поверхности стали остается только слой оксида из железо-хромистой шпинели.

При изменении распределения толщины оксидного покрытия на стали по длине контура изменяется вся картина массопереноса продуктов коррозии в контуре, включая распределение потоков железа и кислорода, а также поступление железа и кислорода в теплоноситель.

Выполнен расчет изменения толщины оксидного покрытия в контуре в ходе эксплуатации установки. В начальный момент времени (начало эксплуатации) предполагается, что оксидное покрытие равномерно распределено по поверхности всей проточной части первого контура и состоит из двух подслоев: внешнего слоя

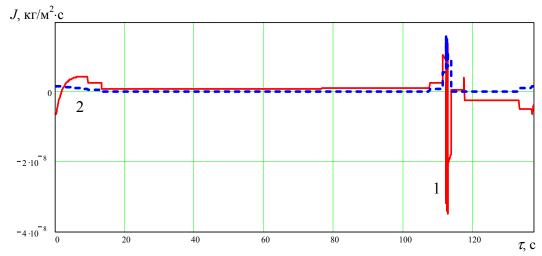


Рис. 7. Распределение потоков магнетита, осаждающегося на поверхность проточной части, по длине циркуляционного контура: 1 — кристаллизация из раствора, 2 — осаждение частиц

из магнетита толщиной 10 мкм и внутреннего подслоя из Fe-Cr шпинели известного состава (Fe_{0,88}Cr_{0,12})₃O₄ толщиной 0,1 мкм. В результате расчета получено распределение толщины магнетитного и шпинельного подслоев на поверхности стали по длине циркуляционного контура через 365 суток от начала эксплуатации в номинальном режиме: в участках контура с повышенной температурой магнетитный подслой отсутствует, а в участках с пониженной температурой отмечается рост его толщины: на выходе из парогенератора примерно в 2 раза, а на входе в активную зону в 5,5 раз. Изменение толщины шпинельного подслоя на поверхности стали по всей длине циркуляционного контура в течение времени имеет положительное значение, причем скорость его роста в участках контура с повышенной температурой примерно на порядок выше, чем в участках с пониженной температурой.

На рис. 8 показано изменение толщины магнетитного подслоя на выходе из зоны нагрева. Время диссоциации составляет порядка 37 суток, после этого оксидное покрытие на данном участке контура состоит из одного Fe-Cr шпинельного подслоя. Изменение толщины магнетитного подслоя на поверхности стали на входе в зону нагрева показано на рис. 9. Рост толщины магнетитного подслоя на входе зоны нагрева относительно велик, что может привести через большой промежуток времени к заметным нарушениям теплогидравлического режима.

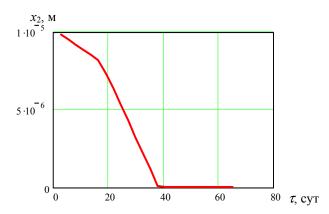


Рис. 8. Изменение толщины магнетитного подслоя на поверхности стали на выходе из зоны нагрева в течение времени

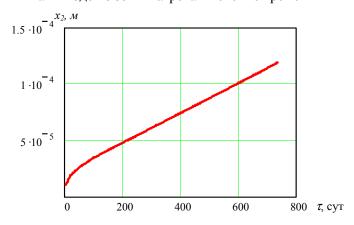


Рис. 9. Изменение толщины магнетитного подслоя на поверхности стали на входе в активную зону в течение времени

Сравнение различных скоростей коррозии стали в свинце при $550\,^{\circ}$ С приводится в табл. 2.

При отсутствии в оксидном слое железо-хромистого шпинельного подслоя скорость максимальной коррозии возрастает еще в большей степени и достигает экстремальной величины, см. рис. 10 (кривая 1). В этом случае при 650 °C экстремальная скорость коррозии составляет 13 мм/год.

Для сравнения полученных данных с экспериментом на этом же рисунке точками показаны значения скорости коррозии, полученные для стали ЭП-823 в насыщенном кислородом свинце (ромбические точки 4: при температурах 550 и 650 °C — 80 и 3,82 мм/год соответственно [8]), и для аналогичной стали Х6СгNiMo17-12-2 (кольцеобразная точка 5: при температуре 550 °C — 830 мкм/год [9]); расчет по обобщенной для всех жидких металлов зависимости для нержавеющей стали в соответствии с данными [10] (кривая 6). Расчет в соответствии с [10] дает завышенные значения экстремальной скорости коррозии при температуре ниже 600 °C, а при более высокой температуре — заниженные значения.

При повышении температуры максимальная скорость коррозии резко возрастает. Для оценки этого эффекта было смоделировано повышение температуры на выходе из зоны нагрева до 700 °C. Толщина слоя магнетита принималась равной 10 мкм, подслоя из железо-хромистой шпинели – 0,1 мкм. Активность кислорода в высокотемпературной зоне контура составляла 0,013 (соответствует пороговой активности кислорода). В результате расчетов получена зависимость скорости максимальной коррозии от температуры на выходе из зоны нагрева, представленная на рис. 10 (кривая 2). При температуре 650 °C скорость максимальной коррозии составляет 3,1 мм/год.

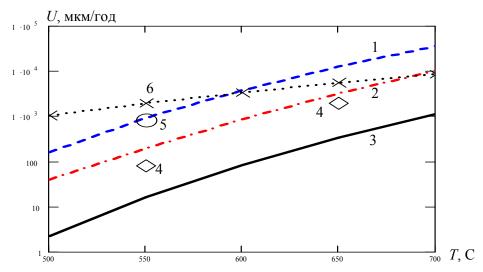


Рис. 10. Зависимость скорости коррозии от температуры для стали ЭП-823 при толщине базового оксидного слоя 10 мкм: 1 − экстремальная коррозия, отсутствие подслоя железо-хромистой шпинели; 2 − коррозия при активности кислорода в свинце >0,013 при толщине подслоя из железо-хромистой шпинели 0,1 мкм; 3 − нормальная коррозия; 4 − экспериментальные данные [8]; 5 − экспериментальные данные [9]; 6 − расчет в соответствии с зависимостью [10]

Таблица 2. Сравнение различных скоростей коррозии стали ЭП-823 в свинце при 550 °C

Скорость коррозии	Абсолютная	Экстремальная	Максимальная	Нормальная
U, мкм/год	50000	900	200	16
Толщина магнетитного подслоя, мкм	0	10	10	10
Толщина подслоя железо-хромистой шпинели, мкм	0	0	0,1	1,0
Активность кислорода в свинце	_	> 0,013	> 0,013	3 · 10-4

Список литературы

- 1. Alexeev V.V., Kozlov F.A., Orlova E.A., Vorobjeva T.A., Torbenkova I.Yu. Modelling of corrosion products mass transfer in sodium circuits. // Hydrodynamics and heat transfer in reactor components cooled by liquid metal coolants in single/two phase. 11-th Meeting of the IAHR, July 5-9, 2004, Obninsk, Russian Federation. IAEA, TWG-FR/125, Vienna, 2005, p. 447–460.
- 2. Алексеев В. В., Кондратьев А. С. Моделирование массопереноса продуктов коррозии в контурах ЯЭУ с натриевым теплоносителем // Известия вузов. Ядерная энергетика. -2010. № 4. С. 162–171.
- 3. Алексеев В.В., Орлова Е.А., Козлов Ф.А., Варсеев Е.В. Эволюция двухслойного оксидного покрытия на поверхности стали первого контура в ходе эксплуатации ЯЭУ // ИФЖ, 2016. Т. 89. № 1. С. 262–268.
- 4. *Nicholas M.G., Cavell I.W.* Materials Development Division, A.E.R.E. // Proc. Second Int. Conf. on Liquid Metal Technology in Energy Production, 20-24 April 1980, Richland/CONF-800401, p. 3-35–3-41
- 5. Alexeev V.V., Kozlov F.A., Orlova E.A., Torbenkova I.Yu. The theoretical and calculation analysis of oxide formation process on steel in lead coolant // 3rd Conference Heavy Liquid-Metal Coolants In Nuclear Technologies (HLMC-2008) Obninsk, Russia, September 15-19, 2008
- 6. *Martinelli L., Courouau J-L., Balbaud-Celerier F.* Oxidation of steels in liquid lead-bismuth: oxygen control to achieve efficient corrosion protection // 3rd Conference Heavy Liquid-Metal Coolants In Nuclear Technologies (HLMC-2008). Obninsk, Russia, September 15-19, 2008
- 7. Алексеев В.В., Орлова Е.А., Козлов Ф.А., Торбенкова И.Ю., Кондратьев А.С. Моделирование процессов массопереноса и коррозии сталей в ядерных энергетических установках со свинцовым теплоносителем (Часть 2: Разработка одномерной модели массопереноса): Препринт № 3154. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2009. 27 с.
- 8. *Eliseeva O.I. and Tsisar V.P.* Effect of temperature on the interaction of ép823 steel with lead melts saturated with oxygen. // Materials Science. Vol. 43. No. 2. 2007. P. 230-237.
- 9. Schroer C., Wedemeyer O., Novotny J., Skrypnik A., Konys J. Long-term service of austenitic steel 1.4571 as a container material for flowing lead-bismuth eutectic // Journal of Nuclear Materials. 418. 2011. P. 8–15.
- 10. *Иванов В.А.* Растворение сталей в потоке лития // Ат. техн. за рубежом. 1979. №10. С. 9–13.

Информация об авторах

Алексеев Виктор Васильевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник

Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: alexeev@ippe.ru

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник

Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

Кузина Юлия Альбертовна, канд. техн. наук, заместитель генерального директора –

директор Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, AO «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: ukuzina@ippe.ru

УДК 621.039.534

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАТРИЯ КАК ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ*

Ф. А. Козлов, В. В. Алексеев, А. П. Сорокин

АО «ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск

Рассмотрен достигнутый уровень развития натриевой технологии по направлениям: физическая химия и технология натриевого теплоносителя; очистка натрия от примесей; контроль содержания примесей в натрии; массоперенос примесей в натрии. Сформулированы основные задачи в рамках дальнейшего развития технологии натрия вследствие необходимости дальнейшего повышения безопасности и экономичности действующих и проектируемых реакторов на быстрых нейтронах нового поколения: моделирование физикохимических, теплогидравлических и технологических процессов в натриевых контурах ЯЭУ; получение фундаментальных данных о физико-химических процессах для тройных и более сложных систем в натрии; изучение процессов переноса и трансформации примесей в газовых полостях натриевых контуров, массопереноса и накопления продуктов коррозии стали и трития в натриевых контурах; усовершенствование технологий отмывки оборудования натриевых контуров, в том числе ХЛ, уничтожения и переработки отходов натрия; обоснование технологических режимов в натриевых контурах при переходе на более высокие параметры теплоносителя.

Знания и приобретенный опыт эксплуатации ЯЭУ позволяют утверждать, что будущая ядерная энергетика будет базироваться на двух типах реакторов: быстрых и тепловых [1, 2]. Соотношение между ними, по-видимому, будет меняться в пользу первого. Одним из основных требований, предъявляемых к будущей ядерной энерготехнологии — её крупномасштабность [3], что предполагает более высокий уровень безопасности всех её элементов, начиная с реакторных установок и кончая технологиями закрытого ядерного топливного цикла [4]. Одним из направлений формирования новой технологической платформы ядерной энергетики, работа над которой в настоящее время ведётся в Государственной корпорации «Росатом», является разработка инновационных быстрых реакторов с напряженными температурными и дозовыми нагрузками, использующими жидкометаллические теплоносители [5, 6].

Поскольку концепция перспективной ядерной энергетики сформулирована, необходимо выбрать теплоноситель для быстрых реакторов, разработать технологию обращения с ним, гарантировать совместимость выбранного теплоносителя и конструкционных материалов реакторной установки (РУ) и т. д.

В качестве теплоносителя АЭС с реакторами на быстрых нейтронах во всех странах, ученые которых работали над этой проблемой, был выбран натрий благодаря своим физико-химическим свойствам и простоте выполнения технологических операций, обеспечивающих поддержание заданного качества теплоносителя. В задачи натриевой технологии входят очистка натрия от примесей и контроль за их содержанием, безопасная эксплуатация реакторной установки в рабочих режимах и при проведении ремонтных работ. Эти задачи успешно решались при создании отечественных установок БР-5, БОР-60, БН-350, БН-600 [7—9]. На основе накопленно-

^{*} Опубликовано в журнале «Атомная энергия». – 2014. – Т. 116. – Вып. 4. – С. 228–234.

го опыта сооружается АЭС с реактором БН-800, запуск которого в эксплуатацию осуществляется в настоящее время. Разрабатывается инновационный проект РУ БН-1200 мощностью 1200 МВт, предназначенной для серийного строительства [10].

Целью работы анализ состояния исследований и разработок в области физической химии и технологии натриевого теплоносителя, определение задач дальнейших работ.

Исследования в области физической химии натриевого теплоносителя

При освоении натрия-теплоносителя пройден длинный путь от решения инженерных проблем до изучения физико-химических характеристик системы теплоноситель — конструкционные (технологические) материалы — защитный газ. Получены константы по растворимости и диффузии примесей в жидких металлах, по их состоянию в теплоносителе и защитном газе, структуре расплавов, по кинетике их взаимодействия с газами, водой, маслами, графитом. Исследованы теплогидравлические и массообменные закономерности поведения этой системы [11, 12].

На этой основе разрабатываются модели процессов массопереноса в жидкометаллических системах, необходимые для создания кодов, позволяющих прогнозировать поведение системы во всех режимах эксплуатации РУ.

Наиболее существенными примесями в натриевом теплоносителе являются кислород, водород, углерод и их соединения, включая продукты реакции натрия с воздухом и водой, с углеводородами (машинным маслом), продукты коррозии конструкционных материалов при длительной эксплуатации реакторов, радионуклиды (включая тритий) [9]. Изучены источники примесей, их интенсивность, возможные негативные последствия, обусловленные примесями, при эксплуатации АЭС.

Наиболее полный анализ массового состава примесей натрия и фильтрата натриевого теплоносителя, проведенный в 2000 году после 30 лет эксплуатации БОР-60, показал, что при длительной эксплуатации реактора основными примесями натриевого теплоносителя являются продукты коррозии конструкционных материалов (Fe, Cr, Ni, Mn), Mg, C и Si (табл. 1). В фильтрате преобладают и составляют основную массу частицы от 5 до 20 мкм, частицы менее 1 мкм образуют агломераты (рис. 1). Суммарная радиоактивность фильтрата (2,5 ГБк/г) определялась в основном адсорбированными частицами продуктами деления. Основную долю активности фильтрата через приблизительно 14 суток после остановки реактора определяли ¹⁴¹Се, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁰³Ru, ¹³⁷Сs и ¹⁴⁰Ва. Основными продуктами деления, определяющим радиационную обстановку являются изотопы Сs.

Таблица 1. Результаты анализа состава примесей в натрии и фильтрате теплоносителя I контура реактора БОР-60*

Элемент	Массовая доля примеси, %	
	в натрии	в сухом остатке из фильтров
Fe	1.10^{-3}	21
Cr	2.10-3	33
Mg	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	13
Mn	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	5—10
Ni	≤1·10 ⁻³	6,7
Si	≤6·10 ⁻³	5,3

Al	$7,5\cdot 10^{-4}$	2
Zr	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	1
Nb	7.10^{-3}	0,7
Ca	$2 \cdot 10^{-3}$	0,47
Ti	<2.10 ⁻³	0,14
Mo	<8.10 ⁻⁴	$2 \cdot 10^{-2}$
В	<5.10 ⁻⁴	$2 \cdot 10^{-2}$
Bi	<1,5.10 ⁻⁴	$1,4\cdot 10^{-2}$
Pb	7.10^{-4}	7.10^{-3}
С	2-3.10-3	~10

^{*}Результаты предоставлены Корольковым А.С. и Штындой Ю.Е.

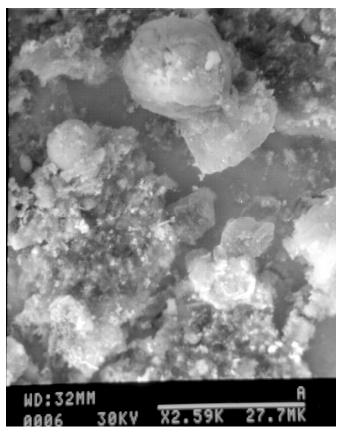


Рис. 1. Внешний вид частиц фильтрата при 500-кратном увеличении (предоставлено Корольковым А.С. и Штындой Ю.Е.)

На основании проведенных исследований было обосновано допустимое содержание примесей в теплоносителе и защитном газе и разработан стандарт отрасли (ОСТ 95 10582-2003) на натрий при поставке и в период эксплуатации РУ.

Кислород опасен с точки зрения коррозионного воздействия на конструкционный материал. Содержание кислорода в натрии, поставляемом с завода, не должно превышать 50 млн^{-1} , а при эксплуатации на номинальных параметрах его концентрация должна быть ниже 5 млн^{-1} . Перенос углерода в неизотермическом натрие-

вом контуре может привести к ухудшению механических свойств стали в участках с повышенной температурой. Для параметров современных АЭС рекомендованы следующие нормы содержания углерода в натрии: для I контура 20 млн^{-1} , для II контура 30 млн^{-1} . На стадии поставки натрия с завода на АЭС содержание углерода не должно превышать 30 млн^{-1} . Водород оказывает меньшее коррозионное воздействие на конструкционные материалы, чем кислород, однако при высоких концентрациях совместное присутствие этих примесей увеличивает скорость коррозии сталей. Норма содержания в натрии для водорода — 0.5 млн^{-1} . Присутствие азота в защитном газе приводит к азотированию стали при повышенной температуре. Поэтому было принято, что при температурах выше 300 °C концентрация азота в защитном газе над натрием должна быть меньше $\sim 0.3\%$ об.

Определены растворимости кислорода, водорода, углерода, серы и кремния в натрии. С учетом анализа литературных данных рекомендованы аналитические зависимости по растворимости более 20 индивидуальных веществ в натрии [13]. Следует отметить, что данные различных авторов по растворимости различных элементов отличаются на порядки.

Изучение кинетики скоростей реакции летучих продуктов взаимодействия нефтепродуктов с натрием показало, что контроль попадания масла в натрий по углеводородам в газовой фазе над натрием наиболее целесообразно осуществлять по концентрации метана. Экспериментально установлено, что взаимодействие карбоната натрия с натрием начинается при температурах 350—360 °C. Конечными продуктами реакции являются окись натрия и свободный углерод.

В результате исследований взаимодействия натрия с графитом показано [14], что абсорбция натрия в графите соответствует эффективному коэффициенту диффузии $D_{\rm Эфф}$ от $0.2\cdot 10^{-11}$ до $2\cdot 10^{-11}$ м²/с. Процесс пропитки графита натрием характеризуется линейной зависимостью между относительными изменениями объема графита и массового содержания в нем натрия, имеющей вид $\delta V = 0.85\cdot \delta M$.

Очистка натрия от примесей. Необходимое качество натриевого теплоносителя поддерживается посредством специальных средств очистки с использованием различных физических принципов: отстаивание, дистилляция, фильтрация, очистка холодными и горячими ловушками. Основными для ЯЭУ и экспериментальных стендов были выбраны два последних метода. Для их обоснования выполнен значительный объём как экспериментальных, так и расчётно-теоретических работ. Практическая апробация их подтвердила оптимальность принятых решений [15].

Холодные ловушки (ХЛ) используются в качестве основного средства очистки натрия в контурах быстрых реакторов от кислорода, водорода, трития, частично от продуктов коррозии конструкционных материалов, и некоторых радиоактивных примесей. Использованные в мировой практике конструкции ХЛ различные. Их основные характеристики, например ёмкость по примесям, отличаются в несколько раз, иногда на порядок. Поэтому были исследованы характеристики процессов тепло- и массообмена в ХЛ как на специальных экспериментальных участках, моделирующих различные зоны ХЛ, так и на моделях прототипов ХЛ, которые проектировались в ФЭИ и ОКБМ [8].

Результаты исследований определили отечественный подход к конструированию ХЛ, которая имеет три последовательно расположенных зоны: охлаждаемый отстойник, зону окончательного охлаждения и изотермический фильтр. Испытания ХЛ показали, что они эффективно очищают натрий от кислорода и водорода (при времени пребывания натрия в ловушке более 15 мин коэффициент удержания при-

месей близок к единице). Очистка натрия от продуктов коррозии и, особенно от углерода, менее эффективна. С использованием результатов исследований были оптимизированы конструкции ХЛ для БОР-60, БН-350, БН-600. Их многолетняя (более чем 90 лет) эксплуатация подтвердила проектные характеристики.

Для увеличения ёмкости XЛ необходимо, чтобы распределение отложений в ловушке было наиболее равномерным. Это в настоящее время является главным критерием, по которому проводится расчетное моделирование накопления примесей внутри ловушки.

Учитывая необходимость повышения безопасности, экономичности и экологичности оборудования быстрых реакторов, принято решение о размещении всех систем с радиоактивным натрием в баке реактора. Поэтому габариты системы очистки первого контура, а, следовательно, и их производительность и ёмкость по примесям ограничены.

Размещение ХЛ в баке реактора БН-1200 в целях исключения истечения радиоактивного натрия в атмосферу приводит к появлению опасности, связанной с накоплением водорода в ХЛ, использованием для охлаждения ХЛ аргона под давлением 15 атм, возможностью разогрева ХЛ от натрия в баке реактора. Для устранения этих недостатков предложено за счет реализации режимов работы ХЛ для первого и второго контуров при температурах на выходе из них 150 и 120 °C, соответственно, исключить накопление водорода в ХЛ первого контура. Расчеты подтвердили возможность реализации таких режимов.

Сопоставление характеристик рассматриваемых вариантов XЛ с охлаждением аргоном и натрием [15], а также результаты оценок времени очистки после аномального загрязнения теплоносителя до 20 млн^{-1} по кислороду при отсутствии источников примесей приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сопоставление характеристик ХЛ

Varranzez	Тип охлаждения ХЛ			
Критерий	аргон	натрий		
Обеспечение необходи- мой концентрации кисло- рода	обеспечивается 3 млн ⁻¹	обеспечивается 1,5 млн ⁻¹		
Производительность по кислороду (время очистки 3-мя ХЛ от концентрации 20 млн ⁻¹), час	1300 (до 3,3 млн ⁻¹) 300 (при очистке до 10 млн ⁻¹)	870 (до 2 млн ⁻¹) 200 (при очистке до 10 млн ⁻¹)		
Эффективность теплопередачи	на «грязной» XЛ недостаточна	недостаточна		
Конструкторские решения	без дополнительных охлаждающих поверхностей в объеме рабочей полости	дополнительные охла- ждающие поверхности в виде змеевика		
Безопасность	 Опасность аварии с разгерметизацией полости аргона с 15 кг/см². Опасность прекращения охлаждения ловушки. Аккумуляция водорода в ХЛ 	Опасность прекращения охлаждения ловушки.Аккумуляция водорода в XЛ		

Исследования показывают принципиальную возможность создания XЛ с емкостью по примесям в несколько раз превышающей заложенную в проекты БОР-60, БН-350, БН-600. В настоящее время для реализации этой возможности теплогидравлические и массообменные характеристики XЛ, закладываемой в проект, оптимизируются с использованием кодов TURBOFLOW и MASKA-LM, а также программного модуля на основе открытого пакета программ OpenFOAM. Планируется испытание их прототипов.

Система очистки натрия первого контура быстрого реактора, включающая в себя встроенные в бак реактора XЛ, должна содержать самостоятельный циркуляционный контур с хладоагентом, подаваемым внутрь ХЛ для отвода тепла. Использование встроенной в бак реактора ХЛ с натриевой системой охлаждения позволяет увеличить емкость XЛ по примесям, скорость очистки и безопасность по сравнению с вариантом с газовым охлаждением. Но учитывая, возникающие при этом сложности с реализацией системы охлаждающего натрия, обусловленные принятыми проектными решениями, в качестве основного проекта сегодня рассматривается ХЛ, охлаждаемая аргоном.

Уровень температуры теплоносителя в современных установках позволяет использовать для очистки натрия от примесей геттеры. Геттерная очистка натрия первого контура от примесей в некоторых случаях может конкурировать с холодной очисткой. В работе [15] показано, что ГЛ, содержащая цирконий в виде фольги толщиной 0,15 мм, при ее массе 400 кг, обеспечивает необходимую концентрацию кислорода в натрии при работе на номинальных параметрах.

Эти результаты говорят о целесообразности проработки варианта комбинированной системы очистки, где XЛ является обязательным элементом системы очистки, встроенной в бак реактора, а ГЛ могут обеспечить очистку от кислорода при работе АЭС на номинальном режиме.

На реакторах БОР-60, БН-350 и БН-600 для очистки от радионуклидов цезия в период перегрузок реакторов многократно использовались, малогабаритные абсорберы одноразового использования (МАВР) гранулами из малозольного графита (ГМЗ), они устанавливались в активную зону вместо ТВС или вместо сборки бокового экрана. Позднее в Институте Горючих Ископаемых (ИГИ) разработан углеграфитовый сорбент — карбонизат. Равновесный коэффициент распределения цезия между карбонизатом был выше чем у применявшемся ранее гранулированного ГМЗ: например, при 220° С коэффициент распределения в ГМЗ $K_{\Gamma M3} = 5 \cdot 10^4$ кг/кг [7], а у карбонизата — $K_S = 4 \cdot 10^5$ кг/кг, который обладает высокими коэффициентами сорбции радионуклидов цезия из натрия при температурах до 300— 320° С, что позволяет использовать адсорберы для очистки теплоносителя и контура как на остановленном реакторе, так и при работе реактора на мощности. Исследована стойкость карбонизата к разрушению в потоке натрия: в экспериментах получено, что потеря карбонизата (диаметр гранул 2—3 мм) при выдержке в натрии 430 часов при температуре 220° С и скорости натрия 0,5 м/с составляет 3—4% вес. [16].

Для очистки теплоносителя от радионуклидов цезия и взвешенных частиц примесей разработаны и испытаны компактные адсорберы, содержащие до $600 \, \mathrm{r}$ активированного карбонизата плотностью $650 \, \mathrm{kr/m^3}$, удельная поверхность пор — $870 \, \mathrm{m^2/r}$, средний размер гранул — $2.5 \, \mathrm{mm}$ и пористый металлический фильтр с тонкостью фильтрации 10— $20 \, \mathrm{mkm}$ [17]. Адсорбер имеет наружную геометрию штатной TBC — это обеспечивает поддержание и измерение расхода натрия, транспор-

тировку и безопасное захоронение адсорбера с накопленной активностью с использованием штатной технологии для заливки негерметичных ТВС свинцом [18].

Контроль содержания примесей в натрии

Требования к методам контроля по оперативности, диапазону концентрации, чувствительности учитывают не только создание условий для длительной безаварийной работы промышленных установок и их прототипов, поддержание радиационной обстановки и минимизации дозовых нагрузок, но и необходимость обеспечения экспериментальных работ [19].

Пробоотборные устройства должны обеспечивать представительный пробоотбор, необходимую чувствительность и точность анализа. Из большого количества разработанных пробоотборников нашли применение три типа устройств: трубчатый пробоотборник, пробоотборник-дистиллятор и пробоотборник радиоактивного натрия. При отработке режима дистилляции в пробоотборниках-дистилляторах и при анализе проб, отобранных в трубчатый пробоотборник, первостепенное внимание уделено обоснованию параметров этого процесса и обеспечению минимальных загрязнений пробы в последующем анализе. Пределы обнаружения для пробоотборника дистиллятора составляют по кислороду (оксидная, гидроксидная и карбонатная формы) — 2 млн⁻¹, углероду (нелетучие формы) — 4 млн⁻¹, азоту (нитридные формы) — 1,6 млн⁻¹, хлоридам — 2 млн⁻¹. При контроле активности радионуклидов в контуре было показано, что представительность и воспроизводимость результатов анализов повышается при использовании устанавливаемых на байпасе первого контура проточных трубчатых пробоотборников и методики измерения активности без выплавки натрия.

Среди оперативных методов контроля примесей в натрии основное внимание уделяется пробковым индикаторам (ПИ), датчикам с диффузионными мембранами и электрохимическим методам. Экспериментально были определены значения параметров, гарантирующих достоверность показаний ПИ. Проведена градуировка ПИ по кислороду, водороду и продуктам взаимодействия натрия с водой. В настоящее время перед нашими разработчиками стоит задача создания встроенного в бак реактора пробкового индикатора, аналогичного уже созданному французскими специалистами индикатору с азотным охлаждением [20].

Для контроля углерода в натрии разработан датчик с мембраной из железа Армко [7]. Одна сторона мембраны омывается натрием, имеющим температуру 750°С, вторая — специальным газом, который, взаимодействуя с углеродом на поверхности мембраны, образует окись углерода или метан. Измеряемое количество образующейся окиси углерода или метана пропорционально термодинамической активности углерода в натрии. Эта система применялась при исследовании поведения углерода в натрии.

Для своевременного обнаружения течей воды в натрий используются индикаторы водорода в натрии с водородопроницаемой мембраной. Для АЭС БОР-60, БН-350 и БН-600 на основе промышленного магниторазрядного насоса НМД-0,0063 был разработан индикатор водорода в натрии ИВА-1У. Новая разработка малогабаритного прибора ИВА-М для контроля водорода в натрии выполнена по схеме, аналогичной индикатору водорода ИВА-1У (рис. 2), и обеспечивает все функции последнего, включая возможность оперативной проверки чувствительности с помощью дозировки водорода [21].

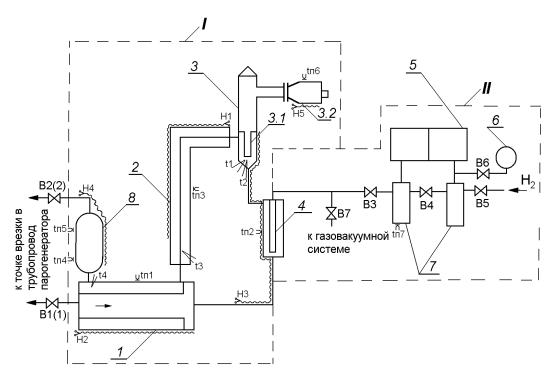


Рис. 2. Схема индикатора водорода в натрии ИВА-М [12]:

I – блок измерения содержания водорода в натрии:

I — рекуператор; 2 — основной нагреватель; 3 — первичный преобразователь-датчик водорода (высоковакуумный блок); 3.1 — никелевая мембрана; 3.2 — магниторазрядный насос;

II – блок градуировки: 4 – узел с никелевой мембраной дозатора водорода;

5 – дифференциальный манометр «Метран»; 6 – мановакууметр;

7 – мерные сосуды; 8 – электромагнитный насос–расходомер.

Нагреватели: H1 – основной; 1,2 кВт, 48 В, 500 °С; H2 – рекуператор; 1,2 кВт, 48 В, 500 °С;

H3 – участок рекуператор–основной нагреватель; 0,35 кВт, 48 В, 250 °С;

H4 – выходные линии с ЭМН-расходомером; 1,0 кВт, 48 В, 250 °С;

 ${
m H5}$ – термостат для насоса; 0,15 кВт, 48 B, 60 °C

В настоящее время на АЭС внедряется электрохимический датчик контроля водорода (ЭХДВ) с никелевой мембраной на основе стабилизированного диоксида циркония [22]. Этот электролит хорошо изучен, имеется большой опыт использования его в гальванических концентрационных элементах, налажено промышленное производство электролита. На рис. 3 приведена конструкция такого датчика.

Массоперенос примесей в натриевых контурах

Предложены модели гомогенного и гетерогенного массопереноса примесей в натриевых контурах. На их основе разработаны компьютерные коды для расчета интегрального массопереноса водорода и трития, а также продуктов коррозии конструкционных материалов.

Модель массопереноса трития в трехконтурной ЯЭУ с натриевым теплоносителем основана на рассмотрении баланса трития и водорода в натрии первого и второго контуров. Расчёты для стационарного состояния системы, а также с учетом нестационарности процесса показали, что основное количество трития, образующегося в быстром реакторе, поступает в ХЛ первого и второго контуров.

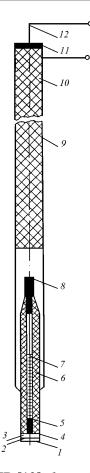
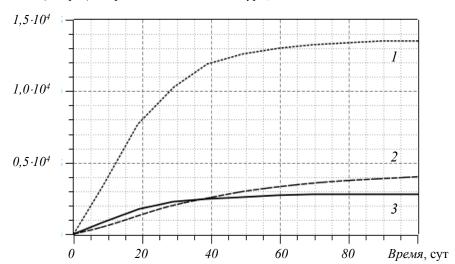


Рис. 3. Принципиальная схема ЭХДВ [13]: I — диффузионная никелевая мембрана; 2 — стабилизатор давления водяного пара; 3 — камера измерительного электрода; 4 — изолятор; 5 — электрод сравнения; 6, 9 — гермо-вводы; 7 — корпус; 8 — изоляционные (запорные) блоки; 10 — потенциальный вывод; 11 — электролит; 12 — платиновое покрытие

При этом, например, в XЛ первого контура установки типа БН-600 его накапливается примерно в полтора раза больше. В третий контур через парогенераторы трития выносится примерно на два порядка меньше, чем накапливается в XЛ [23].

Результаты расчёта изменения концентрации трития в воде третьего контура при начальной концентрации трития в воде и натрии равной нулю для установок БН-600 и «Феникс» представлены на рис. 4. Известные данные измерений содержания трития в воде третьего контура БН-600 соответствуют результатам проведенных расчетов $(8,1\cdot10^3~{\rm K}/{\rm J})$.

Применительно к неизотермическим циркуляционным натриевым контурам разработана модель массопереноса продуктов коррозии конструкционных материалов [24]. Она учитывает одновременный перенос растворенных примесей и взвесей компонентов стали в натрии. На основании проведенных экспериментов по исследованию массопереноса продуктов коррозии в неизотермическом участке натриевого контура уточнены значения физических констант, необходимых для численной реализации расчетного кода.



Концентрация трития в воде 3-го контура, Бк/л

Рис. 4. Изменение концентрации трития в воде третьего контура установок БН-600 (кривые *1* и *3* соответствуют величине потерь воды в третьем контуре 10 т/ч и 50 т/ч) и Феникс (кривая *2* соответствует величине потерь 14 т/ч)

С использованием предложенной модели рассчитаны плотности потока массы продуктов коррозии, осаждающихся на поверхности гидравлического тракта установки БН-600. Показано, что за 20 лет непрерывной эксплуатации реактора толщина отложений в ПТО в максимуме составит около 1,6 мкм. Наибольшая скорость коррозии стали имеет место в высокотемпературной зоне (около 1 мкм/год). Выход продуктов коррозии из активной зоны реактора составляет 11 кг/год.

Последующие исследования массопереноса продуктов коррозии учитывали химическое взаимодействие компонентов стали с кислородом в натрии [25, 26].

Экспериментально исследовался массоперенос продуктов коррозии на высокотемпературном участке натриевого стенда в натрии, содержащем 80 и 140 млн⁻¹ кислорода и температуре на входе в участок ~ 750°С. Источником растворенных компонентов стали служила стружка из стали X18H10T. По результатам химического анализа отложений, накопленных в охлаждаемом канале, получено распределение потоков хрома по его длине (рис. 5). На основании сравнения экспериментальных данных с результатами расчетов уточнены значения констант, характеризующих массоперенос хрома в натрии [27].

Основные задачи в рамках дальнейшего развития технологии натрия

Ниже представлен перечень основных проблем, решение которых не должно откладываться на последующий период, ввиду необходимости дальнейшего повышения безопасности и экономичности действующих и проектируемых перспективных ЯЭУ.

1. Получение фундаментальных данных о физико-химических процессах для тройных и более сложных систем в натрии, необходимых для обоснования моделей, закладываемых в коды, и проведение опытов для получения данных по верификации кодов. Как первоочередные эти работы должны включать изучение: физико-химического взаимодействия компонентов конструкционных материалов и приме-

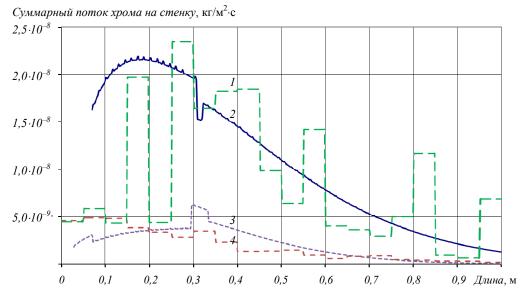


Рис. 5. Распределение удельного потока хрома на стенку по длине канала (концентрация кислорода в натрии: 1-й эксперимент ≈ 80 млн⁻¹, 2-й эксперимент ≈ 140 млн⁻¹): I – эксперимент 2-й; 2 – расчет 2-й эксперимент; 3 – расчет 1-й эксперимент; 4 – эксперимент 1-й

сей в натрии; спонтанного образования зародышей кристаллов в объеме пересыщенных растворов натрия; адгезионных, диффузионных и дисперсных характеристик системы теплоноситель — примеси — конструкционные материалы — защитный газ; сепарацию взвесей в различных участках натриевого контура, вынос их из участков различной геометрии, массопереноса в газовых полостях натриевых контуров; взаимодействия вероятных теплоносителей третьего (второго) контура с натрием.

- 2. Разработка верифицированного комплекса кодов, учитывающих взаимосвязь ядерно-физических, теплогидравлических, физико-химических, термомеханических, массообменных и технологических процессов для обоснования ресурса ЯЭУ с учетом всей совокупности процессов и режимов её эксплуатации.
- 3. Усовершенствование приборов контроля содержания примесей в натрии. Внедрение виброакустического метода контроля состояния оборудования натриевых контуров.
- 4. Разработка комбинированной системы очистки натрия от примесей, включая радионуклиды и взвеси, встроенной в бак реактора.
- 5. Исследование процессов массопереноса и накопления трития в контурах ЯЭУ. Разработка методов улавливания и надежной локализации трития, выделяющегося при проведении различных технологических операций.
- 7. Усовершенствование технологий отмывки оборудования натриевых контуров, в том числе XЛ, уничтожения и переработки отходов натрия.
- 9. Решение других, в том числе, локальных, задач, связанных с продлением ресурса установок, разработкой и созданием перспективных АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с повышенными параметрами теплоносителя.

Список литературы

- 1. *Говердовский А.А.*, *Калякин С.Г.*, *Рачков В.И.* Альтернативные стратегии развития ядерной энергетики в XXI в. // Теплоэнергетика, 2014, №5, с. 3—9.
- 2. Говердовский А.А., Калякин С.Г., Рачков В.И. Инновационная ядерная энерготехнология основа крупномасштабной ядерной энергетики // Известия вузов. Ядерная энергетика, 2014, №1, с.
- 3. *Рачков В.И*. Научно-технические проблемы формирования крупномасштабной ядерной энергетики // Энергосбережение и водоподготовка, 2013, №5, с. 2—8.
- 4. *Рачков В.И.* Разработка технологий закрытого ядерного топливного цикла с быстрыми реакторами для крупномасштабной ядерной энергетики // Известия вузов. Ядерная энергетика, 2013, №3, с. 5—14.
- 5. Жидкие металлы в ядерной, термоядерной энергетике и других инновационных технологиях / В.И. Рачков, М.Н. Арнольдов, А.Д. Ефанов, С.Г. Калякин, Ф.А. Козлов, Н.И. Логинов, Ю.И. Орлов, А.П. Сорокин. // Теплоэнергетика, 2014, №5, с. 20—30
- 6. От первой АЭС до ЯЭУ IV поколения (к 60-летию Первой АЭС) / В.И. Рачков, С.Г. Калякин, О.Ф. Кухарчук, Ю.И. Орлов, А.П. Сорокин. // Теплоэнергетика, 2014, №5, с. 11—19.
- 7. 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.
- 8. Алексеев В.В., Ефанов А.Д., Козлов Ф.А., Сорокин А.П. Теплогидравлика, физическая химия и технология в АЭС с реакторами на быстрых нейтронах //Теплоэнергетика, 2007, №12, с. 2—9.
- 9. Kozlov F.A., Alexeev V.V., Zagorulko Yu.I. et al. The Summery of the Sodium Coolant Technology Development in Application to LMFBRs // Working Material "TM on the Coordinated Project (CRP) "Analysis of the Lessons Learned from the Operational Experience with Fast Reactor Equipment and Systems"/ Obninsk, February 14—18, 2005 / TM-27172 and TM-26984, TWG-FR/123. IAEA, Vienna, 2005, p. 237—259.
- 10. Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М. и др. Концепция перспективного энергоблока с быстрым реактором БН-1200 //Атомная энергия, 2010, т. 108, Вып. 4, с. 201—205.
- 11. *Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н.* Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. М.: Атомиздат, 1970.
- 12. Субботин В.И. Арнольдов М.Н., Козлов Ф.А., Шимкевич А.Л. Жидкометаллические теплоносители для ядерной энергетики // Атомная энергия, 2002, т. 92, вып. 1, с. 31—42.
- 13. Poplavsky V.M., Kozlov F.A., Orlov Yu.I., Sorokin A.P., Korolkov A.S., Shtynda Yu.Ye. Liquid metal coolants technology for fast reactors International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Challenges and Opportunities, FR 09, 7—11 December 2009, Kyoto, Japan. IAEA-CN-176/FR09P1105.
- 14. Козлов Ф.А., Алексеев В.В., Орлова Е.А. и др. Изучение поведения системы графит натрий применительно к ЦПК БН-600 // Атомная энергия, 2006, т. 101, вып. 6, с. 431—437.
- 15. Алексеев В.В., Ковалев Ю.П., Калякин С.Г. и др. Системы очистки натриевого теплоносителя АЭС с реактором БН-1200 // Теплоэнергетика, 2013, №5, с. 9–20.
- 16. Соболев А.М., Краснояров Н.В. Стойкость образцов графита в потоке натриевого теплоносителя // ВАНТ. Серия «Ядерная техника и технология», 1991, вып. 6, с. 47—50.

- 17. *Рыбин А.А., Соболев А.М.* Испытания фильтрующих пористых материалов // ВАНТ. Серия «Ядерная техника и технология», 1991, вып. 1, с. 34—48.
- 18. \overline{K} изин В.Д., Соболев А.М., Поляков В.И. Подготовка к захоронению радионуклидных ловушек реакторов на быстрых нейтронах // ВАНТ. Серия «Ядерная техника и технология», 1991, вып. 6, с. 44—46.
- 19. Козлов Ф.А., Иваненко В.Н. Натрий теплоноситель АЭС с быстрыми реакторами Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 5, с. 337—345.
- 20. *Latge C*. Sodium Quality Control: French Developments from Rapsodie to EFR International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Challenges and Opportunities, FR09, 7—11 December 2009, Kyoto, Japan. IAEA-CN-176/02-08P, p. 104—105.
- 21. Алексеев В.В., Сергеев Г.П., Козуб П.С. и др. Опытный образец прибора ИВА-М для контроля водорода в натриевом теплоносителе // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2011, №3, с. 47—55.
- 22. *Блохин В.А., Шимкевич А.Л.* Мониторинг водорода в различных средах твердоэлектролитным сенсором / Сборник статей к 80-летию В.И. Субботина «Теплофизические исследования». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1990, с. 250—255.
- 23. Козлов Ф.А., Алексеев В.В. Влияние технологических параметров на перенос трития в АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем // Атомная энергия, 1990, т. 68, вып. 2. с. 94—98.
- 24. *Alexeev V., Kozlov F., Kumaev V. et al.* The calculational modeling of impurity mass transfer in NPP circuits with liquid metal coolant // Journal of Physics: Conference Series 98, 2008, 072009.
- 25. Алексеев В.В., Кондратьев А.С. Моделирование массопереноса продуктов коррозии в контурах ЯЭУ с натриевым теплоносителем // Известия вузов. Ядерная энергетика, 2010, №4, с. 162—171.
- 26. Алексеев В.В., Козлов Ф.А., Сорокин А.П. и др. Экспериментальные исследования в обоснование констант массопереноса продуктов коррозии нержавеющей стали в натрии Научно-технический сборник «Итоги научно-технической деятельности ИЯРиТ за 2011 год». Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2012, с. 164—174.
- 27. Алексеев В.В., Козлов Ф.А., Сорокин А.П. и др. Экспериментальное изучение фундаментальных физико-химических закономерностей массообмена в высокотемпературной неизотермической системе конструкционные материалы-натрий-примеси на натриевом стенде / Научно-технический сборник «Итоги научно-технической деятельности ИЯРиТ за 2012 год». Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2013, с. 212—224.

Информация об авторах

Козлов Федор Алексеевич, д-р техн. наук, советник директора Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, заместитель директора Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

Алексеев Виктор Васильевич, д-р техн. наук, заместитель начальника отдела Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: alexeev@ippe.ru

УДК 621.039.534

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАБОТ ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЯЖЁЛЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ (Pb, Pb-Bi)*

Р. Ш. Асхадуллин, В. А. Гулевский, К. Д. Иванов, А. Ю. Легких, В. П. Мельников, Ю. И. Орлов, А. М. Посаженников, В. В. Ульянов, И. В. Ягодкин

АО «ГНЦ РФ — Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», Обнинск

Проведённый анализ показал, что современные мероприятия по технологии тяжёлых жидкометаллических теплоносителей включают научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по обоснованию, проектированию и созданию методов и средств технологии теплоносителя, а также непосредственное проведение процессов технологии при подготовке теплоносителя, при пуске циркуляционных контуров с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями, при их ресурсной эксплуатации и при выводе из эксплуатации. Современные методы и средства технологии теплоносителей включают систему водородной очистки теплоносителя и контура от шлакообразующих примесей, систему регулирования растворённого кислорода в теплоносителе для обеспечения противокоррозионной защиты сталей от коррозии, систему фильтрации теплоносителя и защитного газа, системы контроля теплоносителя как в реакторных, так и в нереакторных условиях. Современные процессы технологии тяжёлых жидкометаллических теплоносителей предусматривают тщательную подготовку теплоносителей до загрузки и при загрузке в циркуляционный контур, проведение комплекса мероприятий в пусковых режимах и минимальное отвлечение обслуживающего персонала на проведение процессов технологии теплоносителя при ресурсной эксплуатации. Также, актуальным вопросом, определяющим надёжную работу будущих циркуляционных контуров с теплоносителями Pb, Pb-Bi, в настоящее время является подготовка кадров со специализацией по вопросам технологии тяжёлых жидкометаллических теплоносителей.

Известно [1], что начальный этап освоения тяжёлых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) сопровождался трагическими аварийными событиями на первой атомной подводной лодке (АПЛ) зак. 645 в 1968 г., где из-за шлаковой (в том числе оксидной) блокады активной зоны реактора произошло расплавление тепловыделяющих элементов, попадание топлива в циркулирующий теплоноситель с соответствующими последствиями, в том числе с гибелью членов экипажа АПЛ. Аналогичные события в то же время развивались и на наземном прототипе АПЛ — на установке 27ВТ/5. Только своевременное снижение мощности реактора позволило избежать аварийной ситуации. Последствия перекрытия активной зоны оксидами и другими примесями раскрыты, хорошо известны и опубликованы [2].

За весь последующий период с 1968 г. по настоящее время произошли кардинальные изменения в культуре обращения с тяжёлыми теплоносителями и в понимании механизма физико-химических процессов, происходящих в циркуляционном жидкометаллическом контуре при длительной эксплуатации [3, 4]. Были выявлены причины аварийных ситуаций на первых этапах освоения ТЖМТ и обоснован ком-

_

^{*} Опубликовано в журнале «Атомная энергия». – 2014. – Т. 116. – Вып. 4. – С. 234–240.

плекс методов и средств по исключению подобных аварий. В настоящее время в России создана признанная в мире технология тяжёлых теплоносителей, которая включает методы и средства очистки теплоносителя и поверхностей циркуляционного контура (в том числе поверхностей тепловыделяющих сборок), контроль и регулирование содержания примесей в теплоносителе, обеспечение противокоррозионной защиты сталей, исходную подготовку теплоносителя, регламент обращения с теплоносителем при ремонтах и перегрузках, подготовку теплоносителя к повторному использованию и ряд других процессов и систем.

В настоящее время существует несколько альтернативных стратегий развития ядерной энергетики [5, 6]. Одно из основных требований, предъявляемых к будущей ядерной энерготехнологии, — её крупномасштабность, что предполагает более высокий уровень безопасности всех её элементов, начиная с реакторных установок и кончая технологиями замкнутого ядерного топливного цикла [7, 8]. Одним из направлений формирования новой технологической платформы ядерной энергетики, работа над которой в настоящее время ведётся в Государственной корпорации «Росатом», является разработка инновационных быстрых реакторов с напряжёнными температурными и дозовыми нагрузками, использующими натрий, свинец и свинец-висмут в качестве теплоносителей [9].

Следует отметить, что в результате использования методов и средств технологии теплоносителя после 1968 г. ни на одной из АПЛ со свинцово-висмутовым теплоносителем уже не наблюдалось негативных ситуаций, происшедших ранее на зак.645, где методы и средства по технологии теплоносителя отсутствовали.

К сегодняшнему дню сформировались три основных задачи технологии теплоносителей Рb-Bi и Pb:

- 1) обеспечение чистоты теплоносителя и поверхностей циркуляционного контура для поддержания проектных теплогидравлических характеристик при длительных ресурсах работы (несколько десятков лет при работе реакторной установки на мощности до 100%);
- 2) предотвращение коррозии и эрозии конструкционных материалов при длительных ресурсах работы (несколько десятков лет, при работе реакторной установки на мощности до 100%);
- 3) обеспечение современных требований безопасности на различных этапах эксплуатации реакторной установки (подготовка ТЖМТ, пуск реакторной установки, текущая эксплуатация, ремонты и перегрузки, разгерметизация, режимы отклонения от условий нормальной эксплуатации).

Из этих задач следует, что современный комплекс мер по технологии теплоносителей Pb-Bi и Pb должен обеспечивать: 1) подготовку теплоносителя (Pb-Bi или Pb) и его загрузку; 2) контроль и регулирование кислородного потенциала теплоносителя; 3) водородную очистку теплоносителя и поверхностей циркуляционного контура от шлаков на основе PbO; 4) фильтрацию теплоносителя; 5) очистку защитного газа от аэрозолей теплоносителя.

Подготовка теплоносителя и его загрузка в циркуляционный контур

При приёмке исходного материала (металла) для будущего теплоносителя осуществляется контроль следующих примесей: Ag, Cu, Zn, As, Sb, Sn, Mg, Fe, Tl, Hg, Al, In, Cd, Na, Ca, Ni, Cr, Mn, Te, Co, Au, а в случае подготовки свинцового теплоносителя и примеси Bi.

Источники этих примесей могут быть самыми разнообразными: генетические примеси из исходного сырья (Ag, Cu, Zn, As, Sb, Sn, Bi, Fe, Tl, Ni, Mn, Co, Au); технологические примеси, поступающие из реагентов при производстве «металласырца» (Si, Ca, Fe, C); наконец, технологические примеси, поступающие при очистке «металла-сырца» (Na, B, F, Cl, Si).

С учётом вышеперечисленных примесей при выборе промышленной марки свинца и висмута для последующего использования в качестве загружаемого теплоносителя используются следующие критерии: влияние примесей в теплоносителе на радиационную обстановку в период эксплуатации реакторной установки; влияние примесей на ядерно-физические свойства реакторной установки; интенсивность наработки Po²¹⁰ из Bi²⁰⁹ и Pb²⁰⁸ и интенсивность миграции Po²¹⁰ из газового контура реакторной установки; влияние примесей на коррозию конструкционных материалов; влияние примесей в стартовом теплоносителе на процесс шлакообразования.

Всем критериям (с учётом возможной доочистки по нерегламентируемым примесям в промышленных марках свинца и висмута) относительно разработанных к настоящему времени технических условий на свинцовый и свинцово-висмутовый теплоносители в наибольшей степени удовлетворяют марки С1 для свинца и ВИ00 для висмута. Весь перечень потенциальных для использования в качестве теплоносителей промышленных марок свинца и висмута приведён в таблице.

Таблица 1. Промышленные марки свинца и висмута для использования в качестве загружаемого в циркуляционный контур теплоносителя

Элемент	C2	C2C	C1	C0	C00	ВИ1	ВИ00		
	Массовая доля, %								
Pb	99,95	99,97	99,985	99,992	99,9985	1,8	0,01		
Ag	0,0015	0,002	0,001	0,0003	0,00001	0,12	0,00002		
Cu	0,001	0,002	0,001	0,0005	0,00001	0,01	0,0001		
Zn	0,001	0,002	0,001	0,001	0,0001	0,003	0,0005		
Bi	0,03	0,02	0,006	0,004	0,0005	98	99,98		
As	0,002	0,002	0,0005	0,0005	0,0005	0,0002	0,00007		
Sn	0,002	0,001	0,0005	0,0005	0,0005	н/р			
Sb	0,005	0,005	0,001	0,0005	0,0001	0,005	0,00002		
Fe	0,002	0,001	0,001	0,001	0,0001	0,001	0,001		
Mg			0,003 0,002		0,0001				
Ca	0,015	0,003 0,003		0,002	0,0001				
Na				0,0001	не регламентируется				
Tl	не регламентируется				0,0001				
Cd					0,0001	(0,0001)	0,00005		
Al					0,0005	не регламентируется			
Hg					0,0001				
In					0,0001				

Для загрузки стартового теплоносителя в первый контур реакторной установки наиболее подходящими являются монжусная (рис. 1) или баковая (рис. 2) системы.



Рис. 1. Монжусная система загрузки (с подготовкой монжусов на заводе)



Рис. 2. Баковая система загрузки (на примере 6 баков)

Контроль и регулирование кислородного потенциала теплоносителя

Важнейшей примесью в тяжёлых жидкометаллических теплоносителях является растворённый химически активный кислород. При снижении его концентрации ниже критического значения не обеспечивается надёжная антикоррозионная защита конструкционных сталей. С другой стороны, присутствие в контуре значительного количества кислорода нежелательно, так как это может привести к накоплению недопустимого количества твердофазных оксидов в теплоносителе [10]. Поэтому одними из основных контролируемых параметров при эксплуатации систем с теплоносителями на основе свинца, проведении экспериментальных исследований процессов массопереноса в циркуляционных контурах с этими теплоносителями являются концентрация (C) и термодинамическая активность кислорода, растворённого в теплоносителе (ТДА, a). Направление и интенсивность протекающих процессов, как правило, определяются уровнем и изменением значений a. Измерение a осуществляется кислородными датчиками.

В теплоносителях на основе свинца принято определять a из соотношения: $a = C / C_S$, где C и C_S , соответственно, текущая концентрация и концентрация насыщения растворённого кислорода в объёме теплоносителя с фиксированной температурой. Т.е. при постоянстве C и температуры сохраняется постоянство a, а каждому температурному распределению C соответствует строго заданное температурное распределение a, определяемое температурной зависимостью C_S .

Для температурного диапазона $t=400\text{-}700\,^{\circ}C$ в свинце рекомендуется соотношение $\ell gC_S=3,438-\frac{5240}{T}$, где: T — температура, K; размерность C_S — мас. %. Функциональная связь a и T при заданных значениях C носит линейный характер.

При проведении экспериментальных исследований в системах с ТЖМТ обычно используются кислородные датчики на основе гальванических концентрационных ячеек с твёрдым электролитом $ZrO_2+Y_2O_3$ и с электродом сравнения $Bi-Bi_2O_3$. Показания таких датчиков в свинце выражается уравнением: $E(B) = 131,2-1,54\cdot10^{-2} T(1+6,61 \lg a)$.

Используя эти знания, строятся диаграммы E-C-a-t, E-C-t или $E-C-C_{Fe}-t$. Последние получают дополнением диаграмм E-C-t линиями изоконцентраций железа (линиями температурного распределения концентраций кислорода, равновесных с Fe_3O_4 и с заданными концентрациями железа). Полученными диаграммами пользуются при исследовании процессов, протекающих в системах с ТЖМТ. При этом количество и место расположения датчиков в каждом конкретном случае выбирается, с одной стороны, исходя из содержания и целей проводимых исследований. С другой стороны, на этот выбор существенное влияние оказывают представления исследователей о характере распределения примеси кислорода в теплоносителе.

В настоящее время доминирует точка зрения, что в реальном циркуляционном контуре реализуется изоконцентрационное распределение примесей в теплоносителях, т.к. циркуляция теплоносителя способствует выравниванию содержания примесей во всех его объёмах.

Помимо контроля кислорода для обеспечения ресурсной работоспособности конструкционных сталей и отсутствия шлакообразования в контуре на всех стадиях эксплуатации реакторных и исследовательских установок с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями необходимы также штатные средства, позволяющие поддерживать на заданном уровне и в заданной форме содержание примеси растворённого кислорода в теплоносителе при любых предусмотренных эксплуатационных режимах. Без таких средств работа систем с рассматриваемыми теплоносителями недопустима.

Кислород можно подать в теплоноситель разными способами. Например, ранее были распространены газофазные методы как наиболее простые. Однако опыт [1] показал, что при их применении возможны отрицательные побочные явления (шлаконакопление, ухудшение теплоотвода от тепловыделяющих элементов, трудность доставки газовых реагентов в диспергированном виде в различные участки контура и др.). Масштабы этих явлений и их возможные последствия таковы, что использование газовых смесей с целью непрерывного регулирования кислородного потенциала либо нецелесообразно (двойные смеси He-O2), либо допустимо лишь в ограниченном спектре эксплуатационных режимов реакторных установок (тройные смеси Н2-Н2О-Не). Оптимальным методом для регулирования ТДА кислорода в теплоносителе признан [11], так называемый, твердофазный метод регулирования, предложенный специалистами ГНЦ РФ – ФЭИ. Данный метод подразумевает использование в качестве источника кислорода растворяемых гранул оксида свинца, размещаемых и удерживаемых в ограниченном по объёму участке циркуляционного контура, сообщающемся по расплаву с основным контуром. При этом гранулы РьО, контактируя с циркулирующим ТЖМТ, растворяются с выделением кислорода, который далее транспортируется по всему контуру с потоком ТЖМТ.

Техническая реализация твердофазного метода регулирования осуществляется с помощью специально разрабатываемых устройств — массообменных аппаратов [12]. Твердофазные устройства отвечают требованию регулирования кислородного потенциала в различных установках с большей точностью и плавностью. Перед каждым конкретным массообменным аппаратом формулируются требования к нему, исходящие из задачи установки. В их число входят: вид объекта регулирования; диапазон кислородного регулирования; ресурс работы; весогабаритные требования; точность регулирования и т. п. Объектами регулирования кислородного потенциала в теплоносителе могут быть: малогабаритные (объем ТЖМТ от 1 до 10 л)

статические установки; экспериментальные циркуляционные стенды (петлевые, интегрально-баковые); ядерные энергетические установки или ускорительноуправляемые системы.

К настоящему времени накоплен значительный опыт по длительной эксплуатации различных конструкций массообменных аппаратов на исследовательских стендах и статических установках со свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями, который свидетельствует об их надёжности, возможности тонкого регулирования скорости ввода кислорода и отсутствии отрицательного воздействия на контур в целом.

Водородная очистка ТЖМТ и поверхностей циркуляционного контура от шлаков на основе оксида свинца

Необходимость проведения водородной очистки Pb и Pb-Bi, а также поверхностей циркуляционного контура определяется следующим.

При заполнении теплоносителем и эксплуатации контура в нём возможно образование загрязнений. Загрязнения эти могут образовываться, в основном, в результате взаимодействия теплоносителя с кислородом воздуха. Кислород может попадать в контур при разгерметизации последнего в холодном или разогретом состоянии. При разгерметизациях разогретого контура кислород может непосредственно взаимодействовать с зеркалом теплоносителя. При разгерметизациях холодного контура кислород может сорбироваться поверхностями контура и теплоносителя. В дальнейшем при разогреве контура кислород может десорбироваться и окислять теплоноситель. При этом образуются твёрдые оксиды, которые отлагаются на поверхностях контура и зеркале теплоносителя. Отложения могут блокировать теплопередающие поверхности (в первую очередь, проходные сечения активной зоны), нарушать работу насосов, арматуры, увеличивать гидравлическое сопротивление трактов и т.д.

Как правило, отложения больше всего содержат свинец (для контуров с жидким свинцом) и компоненты эвтектики — свинец и висмут (для контуров со сплавом свинец-висмут). Оксиды свинца и оксиды компонентов конструкционных материалов (в основном железа) присутствуют в отложениях в значительных количествах.

Соотношение свинца (или компонентов эвтектики), оксидов свинца и оксидов железа в различных видах отложений может сильно изменяться, но сохраняются их характерные особенности. Прежде всего, несмотря на высокую массовую долю свинца (или компонентов эвтектики), отложение — это не транспортируемая, неперекачиваемая масса сложного состава, блокирующая самые разные участки циркуляционного контура. Роль основного связующего вещества в отложениях играет оксид свинца. Именно оксид свинца с примесью оксидов компонентов конструкционных материалов обеспечивает пористую пространственную структуру, внутренние объёмы которой (ячейки) заполнены неокисленными компонентами ТЖМТ.

Ликвидация указанных отложений проводится при помощи специального технологического мероприятия (водородной очистки), результатом которого является извлечение компонентов теплоносителя из отложений. При этом отложения разрушаются, а свинец и висмут возвращаются в теплоноситель. Водородная очистка проводится при помощи газовых смесей H₂–H₂O–Ar. Газовые смеси могут подаваться в контур двумя способами: 1) только в газовый объём контура; 2) одновременно в газовый объём контура и непосредственно в циркулирующий поток ТЖМТ.

В первом случае водород взаимодействует с отложениями, присутствующими только на свободных поверхностях теплоносителя. Во втором — газовая смесь может разноситься по всему контуру, а водород взаимодействовать с отложениями во всех частях контура. Поэтому водородная очистка, организованная 2-м способом, является более эффективной.

При водородной очистке протекают следующие процессы:

а) водородное восстановление металла (Me) из оксидов (Me_xO_y) в отложениях на поверхностях теплоносителя и конструкций контура по реакции: $Me_xO_y + y H_2 \leftrightarrow x Me + y H_2O$, приводящее к разрушению отложений и последующему увлечению их частиц потоком ТЖМТ; б) водородное восстановление Me из оксидных образований, циркулирующих вместе с ТЖМТ; в) извлечение из теплоносителя растворённого кислорода по реакции: $[O] + H_2 \leftrightarrow H_2O$ ([O] - растворённый кислород); г) растворение в раскисленном теплоносителе оксидов из отложений на поверхностях и оксидных образований, циркулирующих вместе с теплоносителем: $Me_xO_y \leftrightarrow x [Me] + y [O]$; д) механическое разрушение отложений на поверхностях контура за счёт усиления динамического воздействия на них двухкомпонентного потока. Усиление динамического воздействия происходит вследствие возникновения дополнительных (по сравнению с однокомпонентным потоком) тангенциальных и нормальных напряжений вблизи твердых поверхностей загрязнений.

Для контуров установок петлевой конструкции ввод смеси H_2 — H_2O —Ar в циркулирующий со скоростью $U \ge 1$ м/с теплоноситель можно проводить любым практически осуществимым способом, обеспечивающим размер вводимых в теплоноситель пузырьков газа радиусом $r \sim 1$ мм. В дальнейшем, с учётом незначительной длины соединяющих элементы контура трубопроводов, малой площади свободных поверхностей теплоносителя, эффективного дробления газа в активной зоне, парогенераторах и насосах, такие пузыри эффективно транспортируются потоком ТЖМТ по всему контуру [1].

В контурах усовершенствованной петлевой и моноблочной конструкции имеются каналы большой протяженности и с низкими ($U \ge 0,2-0,3$ м/с) скоростями течения ТЖМТ, а также большие свободные поверхности ТЖМТ. Поэтому в них существуют условия для эффективной агломерации и сепарации газовых пузырей с $r \ge 1$ см. Для обеспечения доставки газовой фазы во все участки контура необходимо применять только такие способы ввода в теплоноситель газа, которые обеспечивают его дробление до пузырьков размером $r \le 0,3$ мм.

На сегодняшний день предусмотрены следующие мероприятия для полного исключения перекрытий проходных сечений активной зоны, парогенераторов, насосов и другого оборудования оксидами свинца в реакторных установках с ТЖМТ:

- очистка исходных свинца и висмута на заводе-изготовителе и непосредственно в процессе загрузки свинца (или свинца и висмута) в первый контур реакторной установки;
- сведение к минимуму, вплоть до полного исключения возможности попадания воздуха в первый контур реакторной установки на всех этапах эксплуатации;
- специальные твердофазные дозаторы (массообменные аппараты, рассмотренные ранее в настоящей статье) растворённого кислорода для формирования защитных покрытий на сталях с исключением образования избыточных оксидов свинца на теплообменных поверхностях реакторной установки;

- ранний мониторинг признаков попадания воздуха в первый контур для своевременного выявления причин и их устранения;
- эффективная система водородной очистки теплоносителя и поверхностей контура от оксидов свинца при наличии признаков их образования;
- бескислородный водно-химический режим второго контура для исключения образования оксидов свинца при вероятном наличии микротечи парогенератора;
- фильтрация теплоносителя и газового контура для удаления примесей и аэрозолей, не удаляемых водородной очисткой;
- перегрузочное и ремонтное оборудование, исключающее попадание воздуха в теплоноситель, а, следовательно, исключающее образование избыточной фазы оксидов свинца при ремонтах и перегрузках.

Как уже говорилось, в результате использования водородной очистки ни на одной из АПЛ со свинцово-висмутовым теплоносителем или исследовательских стендах с теплоносителями свинец и свинец-висмут уже не наблюдалось негативных ситуаций, связанных с избыточным накоплением шлаков на основе оксида свинца.

Фильтрация ТЖМТ

Фильтрация свинца или свинца-висмута необходима по следующим причинам. Данные теплоносители представляют собой низкоконцентрированную высокодисперсную суспензию, в которой во взвешенном состоянии могут находиться мельчайшие твёрдые частицы оксидов свинца, висмута, железа, хрома, марганца и др. примеси. В зависимости от условий эксплуатации их суммарная концентрация в теплоносителе может достигать величины $\sim 10^{-3}$ % мас. и более [13].

В результате в локальных местах контура могут образовываться шлаковые отложения на основе оксидов компонентов конструкционных сталей и теплоносителя, повышающие температуру стенки, увеличение гидравлического сопротивления трактов, нарушение работы насосов, арматуры и т.д. Указанные примеси образуются, главным образом, в результате происходящих в контуре медленных коррозионно-эрозионных процессов, разгерметизации контура, попадания в него кислорода атмосферы, масла и т.д. Интенсивное образование невосстанавливаемых водородом твёрдых примесей в контуре сопровождает также водородную очистку теплоносителя и контура. Непрерывное удаление твердых примесей из теплоносителя фильтрованием приобретает, таким образом, важное значение.

Поскольку внутреннюю поверхность циркуляционного контура следует рассматривать в качестве конкурирующей относительно поверхности самого фильтра, эффективность последнего должна быть высокой настолько, чтобы предотвратить интенсивное образование отложений на различных элементах теплотехнического оборудования, в узких проходных сечениях каналов и т.д.

В общем случае, в циркуляционном замкнутом контуре, содержащем фильтр, изменение концентрации взвеси при действии её источника можно представить со-

отношением
$$\frac{dc}{d\tau} = \frac{q}{V} - \frac{(C - C_{\rm B})G}{V} - R_{\rm K}C$$
, где: C – текущая концентрация взвеси в

теплоносителе, кг/м³; C_B – концентрация взвеси на выходе из фильтра, кг/м³; q – интенсивность источника примесей, кг/ч; τ – время, ч; V – объём теплоносителя в контуре, м³; G – объёмный расход теплоносителя через фильтр, м³/ч; R_K – экспериментальная константа, характеризующая интенсивность вывода взвеси из потока теп-

лоносителя на поверхность контура, 1/ч. При этом для контура без фильтра справедливо соотношение: $C \approx C_0.e^{-R_K.\tau}$, где C_0 и C — начальная и текущая концентрации взвеси, кг/м³. Величину R_κ можно представить как: $R_{\rm K} \approx \frac{2,3lq^{C_0/C}}{\Delta \tau}$, где $\Delta \tau$ — промежуток времени до измерения концентрации примеси C в теплоносителе.

Была проведена обработка большого массива экспериментальных данных, полученных на промышленных и лабораторных циркуляционных контурах, позволившая по времени жизни частиц оценить значения R_{κ} для взвеси, состоящей в основном из оксидов свинца, висмута и железа, сформировавшихся за счет подачи газообразного кислорода в жидкий металл или искусственно подававшихся в контур примесей. Оказалось, что величины R_{κ} лежат в пределах следующих значений [10]: $R_{\kappa} = 0.29 - 0.72$ (1/ч) – для оксидов свинца и висмута и $R_{\kappa} = 0.11 - 2.16$ (1/ч) – для оксидов железа.

Как видно, имеет место существенный разброс в значениях R_{κ} , что связано, очевидно, с различием геометрических характеристик контуров, режимов циркуляции и дисперсного состава примесей, определяющих интенсивность их гидродинамической сепарации.

Если потребовать, чтобы фильтр на порядок более интенсивно улавливал примеси по сравнению с контуром, то получаем: $n=\frac{G}{V}\geq \frac{10\,R_{\rm K}}{E}$, где: n – кратность циркуляции, 1/ч, E – эффективность очистки ТЖМТ с помощью фильтра, $E=1-\frac{C_{\rm B}}{C}=1-\frac{1}{K}$, K – коэффициент очистки: $K=\frac{C}{C_{\rm B}}$, где $C_{\rm B}$ – концентрация взвеси на выходе из фильтра. Таким образом, видно, что для более эффективного удаления взвесей с помощью фильтра по сравнению с контуром необходимо, чтобы $En>R_{\rm K}$.

Очистка защитного газа от аэрозолей теплоносителя

Эксплуатация реакторных установок с ТЖМТ сопряжена с режимами, сопровождающимися выходом аэрозольных продуктов в газовый контур реакторной установки. В результате происходит образование, перенос и осаждение аэрозольных частиц ТЖМТ на оборудование, трубопроводы и контрольно-измерительную аппаратуру газовой системы.

Проблема загрязнения газовых систем экспериментальных стендов и реакторных установок с ТЖМТ не нова. Еще в начальный период освоения теплоносителя свинец-висмут на экспериментальных стендах, а в дальнейшем и на промышленных установках фиксировались загрязнения трубопроводов и оборудования газовых систем. В частности, хорошо известен факт влияния радиоактивных частиц пыли на представительность показаний датчиков системы контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов. Степень влияния различалась от установки к установке, однако, оставалась заметной на протяжении практически всего периода их эксплуатации [3]. Пылевидные отложения в трубопроводах газовой системы обнаруживались также при проведении ревизии этих элементов в ходе заводских ремонтов.

Было замечено, что интенсивность запыления защитного газа значительно возрастала при проведении режимов обработки теплоносителя и циркуляционного

контура двухфазными смесями «теплоноситель – газ». Это объясняется тем, что за счёт флотационного выноса частиц примесей на газовых пузырях возрастала скорость их доставки к поверхности раздела теплоносителя с защитным газом и далее непосредственно в газовый объём. Как правило, это наблюдалось при проведении водородных регенераций – основного технологического режима очистки контуров, в котором использовалось введение газовых водородосодержащих смесей в поток теплоносителя. Следствием значительной запыленности газовой системы в ходе проведения данных режимов являлось соответствующее загрязнение устройств конденсации паров воды и самого конденсата.

С учётом имеющихся знаний по аэрозолеобразованию применительно к условиям реакторных установок с ТЖМТ при её нормальной эксплуатации в качестве оценки можно принять загрязнённость защитного газа на входе в тракты газовой системы на уровне $C \approx 0,1-1,0~\text{мг/м}^3$ [14], соответствующем экспериментальным данным для температуры теплоносителя $450^{\circ}C$ при минимальном расстоянии от поверхности. При проведении режимов обработки первого контура газовыми смесями, а также при течах парогенераторов следует ожидать увеличения концентрации пылевидных частиц до $10-40~\text{мг/м}^3$.

Степень влияния процессов загрязнения защитного газа пылевидными примесями на работоспособность оборудования, расположенного в газовой системе, в значительной мере зависит от принципа работы этого оборудования и его конструктивных особенностей.

Имеющиеся знания по концентрации и дисперсному составу в системе вентиляции реакторных установок с ТЖМТ позволяют принять необходимым наличие фильтрующих устройств с раздельными секциями очистки. Первая «высокотемпературная» секция предварительной очистки $E \approx 80\%$ предназначена для очистки газовой линии от крупных аэрозольных частиц размером более 5,0 мкм. Установку данной секции предполагается размещать непосредственно на выходе из реакторной установки, где температура газа достигает значений 450—600 °C. Для достижения этих параметров в качестве фильтрующего материала целесообразно использовать иглопробивное металлополотно из термостойкой стали (рис. 3). Вторая «низкотемпературная» секция тонкой очистки предназначена для финишной очистки (E = 99,9%) газа и устанавливается на холодной стороне контура (20 - 40 °C). В качестве фильтрующего материала целесообразно использовать высокоэффективную стеклобумагу (рис. 4, 5).

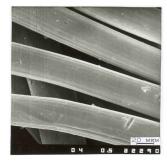


Рис. 3. Микрофотография волокон металловойлока

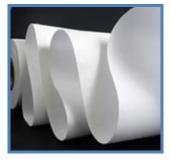


Рис. 4. Высокоэффективная стеклобумага

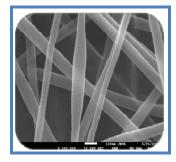


Рис. 5. Микроструктура стеклобумаги

Заключение

Решение вопросов технологии тяжёлых жидкометаллических теплоносителей реализуется на всём жизненном цикле циркуляционных контуров с ТЖМТ (реакторных установок, экспериментальных стендов и др.). Мероприятия по технологии теплоносителей включают научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по обоснованию, проектированию и созданию методов и средств технологии теплоносителя, а также непосредственное проведение процессов технологии при подготовке теплоносителя, при пуске циркуляционных контуров с ТЖМТ, при их ресурсной эксплуатации и при выводе из эксплуатации.

Выбор необходимых методов и средств технологии теплоносителей для проектов циркуляционных контуров с ТЖМТ обоснован как с учётом имеющегося 60-летнего опыта освоения теплоносителей, так и на основании результатов проводимых проектных научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, учитывающих особенности конструкции нового поколения циркуляционных контуров с ТЖМТ.

Разрабатываемые методы и средства технологии теплоносителя включают систему водородной очистки теплоносителя и контура от шлакообразующих примесей, систему регулирования растворённого кислорода в теплоносителе для обеспечения противокоррозионной защиты сталей от коррозии, систему фильтрации теплоносителя и защитного газа, системы контроля теплоносителя как в реакторных, так и в нереакторных условиях, а также другие системы.

Разрабатываемые процессы технологии тяжёлых жидкометаллических теплоносителей предусматривают тщательную подготовку теплоносителей до загрузки и при загрузке в циркуляционный контур с ТЖМТ, проведение комплекса мероприятий в пусковых режимах и минимальное отвлечение обслуживающего персонала на проведение процессов технологии теплоносителя при ресурсной эксплуатации.

Одним из актуальных вопросов, определяющих надёжную работу будущих циркуляционных контуров с теплоносителями Pb, Pb-Bi, является подготовка в настоящее время кадров со специализацией по вопросам технологии тяжёлых жидкометаллических теплоносителей.

Создаваемое с учётом современных реалий оборудование сможет обеспечить проведение всех необходимых технологических мероприятий и будет являться важной составляющей, обеспечивающей безопасную эксплуатацию циркуляционных контуров с ТЖМТ на всех этапах их жизненного цикла, что соответствует требованиям к эффективности современных ядерных энерготехнологий.

Список литературы

- 1. Громов Б.Ф., Тошинский Г.И., Орлов Ю.И. и др. Создание РУ со свинцововисмутовым теплоносителем для АПЛ. Краткая история. Обобщённые итоги эксплуатации / Сб. докладов Международной конференции «Тяжёлые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». Обнинск, 1999. Т. 1. С. 14–17.
- 2. Мартынов П.Н., Орлов Ю.И. Процессы шлакообразования в свинецвисмутовом контуре. Предупреждение и ликвидация критических ситуаций /Сб. докладов Международной конференции «Тяжёлые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». Обнинск, 1999, Т.2. С.608–619.
- 3. *Мартынов П.Н., Орлов Ю.И*. Современные подходы к технологии тяжёлых теплоносителей //Новые промышленные технологии. 2011. №1. С.3–6.

- 4. Рачков В.И., Арнольдов М.Н., Ефанов А.Д. и др. Использование жидких металлов в ядерной, термоядерной энергетике и других инновационных технологиях //Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 20–30.
- 5. *Говердовский А.А., Калякин С.Г., Рачков В.И.* Альтернативные стратегии развития ядерной энергетики в XXI в. //Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 3–10.
- 6. Рачков В.И., Калякин С.Г. Инновационная ядерная энерготехнология основа крупномасштабной ядерной энергетики //Известия вузов. Ядерная энергетика. 2014. № 1. С. 5–15.
- 7. *Рачков В.И.* Научно-технические проблемы формирования крупномасштабной ядерной энергетики //Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 5. С. 2–8.
- 8. *Рачков В.И., Калякин С.Г., Кухарчук О.Ф. и др.* От первой АЭС до ЯЭУ IV по-коления (к 60-летию Первой АЭС) //Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 11–19.
- 9. Рачков В.И. Разработка технологий закрытого ядерного топливного цикла с быстрыми реакторами для крупномасштабной ядерной энергетики //Известия вузов. Ядерная энергетика. 2013. N = 3. C. 5 = 14.
- 10. Паповянц А.К., Мартынов П.Н., Орлов Ю.И., Болтоев Ю.Д. Очистка теплоносителя свинец-висмут от твёрдых примесей фильтрованием /Сб. докладов Международной конференции «Тяжёлые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». Обнинск, 1999, Т.2. С.720–728.
- 11. *Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Симаков А.А. и др.* Твердофазная технология регулирования кислорода в тяжёлых жидкометаллических теплоносителях //Новые промышленные технологии, ЦНИЛОТ. 2004, N2. C. 30–34.
- 12. Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю., Мартынов П.Н., Симаков А.А. Новые возможности применения тяжёлых жидкометаллических теплоносителей Рb-Вi и Рb при использовании автоматизированной системы управления кислородным режимом (потенциалом) //Новые промышленные технологии. ЦНИЛОТ. 2011. №1. С. 6–10.
- 13. Мартынов П.Н., Ягодкин И.В., Мельников В.П. и др. Очистка тяжёлых жидкометаллических теплоносителей от примесей высокотемпературными фильтрами /Тезисы докладов Международной конференции «Тяжёлые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». Обнинск, 2008, С.71–73.
- 14. Посаженников А.М., Мартынов П.Н., Ягодкин И.В., Мельников В.П. Защита оборудования газовых контуров реакторных и исследовательских установок с тяжёлым теплоносителем от аэрозолей /Тезисы докладов Международной конференции «Тяжёлые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». Обнинск, 2008, С.73—74.

Информация об авторах

Асхадуллин Радомир Шамильевич, канд. техн. наук, заместитель директора Отделения физико-химических технологий АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: raskhadullin@ippe.ru

Гулевский Валерий Алексеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения физико-химических технологий АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: vulyanov@ippe.ru

Иванов Константин Дмитриевич, д-р. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения физико-химических технологий АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sniyazov@ippe.ru

- **Легких Александр Юрьевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Отделения физико-химических технологий АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: alegkikh@ippe.ru
- **Мельников Валерий Петрович**, канд. техн. наук, заместитель генерального директора директор Отделения физико-химических технологий АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: vmelnikov@ippe.ru
- Орлов Юрий Иванович, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: orlov@ippe.ru
- Посаженников Александр Михайлович, старший научный сотрудник Отделения физико-химических технологий АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: aposazhennikov@ippe.ru
- Ульянов Владимир Владимирович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения физико-химических технологий АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: vulyanov@ippe.ru
- **Ягодкин Иван Васильевич**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения физико-химических технологий АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: yagodkin@ippe.ru

УДК 521.039

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРАТИФИКАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНТУРА ЦИРКУЛЯЦИИ ЯЭУ РАЗЛИЧНОГО ТИПА*

А. П. Сорокин¹, А. Н. Опанасенко¹, Ю. А. Кузина¹, Н. А. Денисова¹, Н. Г. Разуванов², Е. В. Свиридов², И. А. Беляев³

¹ АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Обнинск, Россия ² НИУ «МЭИ», Москва, Россия ³ ОИВТ РАН, Москва, Россия

Представлены результаты исследований течения и температурного режима теплоносителя в различных режимах работы на прозрачных моделях трубопроводов первого контура и опускного канала реакторов типа ВВЭР, секторной модели верхней камеры быстрого реактора, а также на интегральной водяной трехконтурной модели быстрого реактора при принудительной циркуляции и аварийном расхолаживании естественной конвекцией. Рассмотрены вопросы моделирования теплогидравлики реакторов на водяных моделях. Экспериментальные исследования показывают, что теплоноситель в ЯЭУ всегда неизотермичен из-за неравномерностей энерговыделения, теплосъема, перепада температуры между элементами контура циркуляции, переходных и аварийных режимов работы. Термогравитационные силы приводят к температурному расслоению в трубопроводах и элементах контура, перестройке характера течения и температурного режима с возникновением встречных движений, застойных и рециркуляционных образований. Температурное расслоение теплоносителя влияет на ядерно-физические характеристики реактора, физикохимическое взаимодействие между теплоносителем и конструкционными материалами, процессы осаждения окислов в холодных застойных зонах, требует обоснования по месту установки штатных датчиков управления и контроля, размещения оборудования в корпусе. На стратифицированных границах раздела возникают внутренние волны, которые вызывают пульсации температуры на стенках реакторного оборудования. Это приводит к термической усталости конструкционных материалов, снижению сроков эксплуатации оборудования. Особенностью температурного расслоения теплоносителя является предельная стратификация, когда весь перепад температуры локализуется на тонкой границе (поверхности) раздела с полным подавлением конвективного переноса между изотермическими областями потока. Для различных режимов работы реактора выявлены зоны с устойчивой температурной стратификацией с большими градиентами и пульсациями температуры. Полученные результаты позволяют судить об амплитуде и частотных характеристиках пульсаций температуры в этих потенциально опасных областях.

Результаты экспериментальных исследований структуры движения, полей температуры и скорости неизотермического теплоносителя в ЯЭУ различного типа на водяных моделях в различных режимах работы показывают, что погрешности моделирования теплогидравлики в ЯЭУ на фрагментарных секторных моделях с изотермическим потоком связаны с не учетом пространственных 3-мерных эффектов и температурной неоднородности потока. Теплоноситель в ЯЭУ неизотермичен всегда из-за неравномерностей энерговыделения, теплосъема, переходных и аварийных режимов работы, перепада температуры между элементами контура циркуляции.

 $^{^*}$ Опубликовано в сборнике докладов на V Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии атомной энергетики (МНТК НИКИЭТ – 2018)», АО «НИКИЭТ», г. Москва, 2–5 октября 2018 г.– М.: Издво АО «НИКИЭТ», 2018. С. 890–901. – 1 CD–8.

Термогравитационные силы приводят к температурному расслоению в трубопроводах и элементах контура с возникновением встречных движений, застойных и рециркуляционных образований, перестройке характера течения и температурного режима. Температурное расслоение теплоносителя также влияет на ядернофизические характеристики реактора, физико-химическое взаимодействие между теплоносителем и конструкционными материалами, процессы осаждения окислов в холодных застойных зонах, требует обоснования по установке штатных датчиков управления и контроля, размещения оборудования в корпусе.

Особенностью температурного расслоения теплоносителя в некоторых режимах работы ЯЭУ является предельная стратификация, когда весь перепад температуры локализуется на тонкой границе (поверхности) раздела с полным подавлением конвективного переноса между изотермическими областями потока. Например, в трубопроводах и опускном канале реактора типа ВВЭР с разбалансом температур по петлям, в верхней камере быстрого реактора при срабатывании быстрой аварийной защиты.

Экспериментальные исследования показывают [1–3], что на стратифицированных границах раздела возникают внутренние волны, которые вызывают пульсации температуры на стенках реакторного оборудования. Это приводит к воздействию на конструкционные материалы, термической усталости и снижению сроков эксплуатации реакторного оборудования, что подтверждается результатами работы [4].

Вопросы моделирования теплогидравлики реакторов различного типа на водяных моделях подробно рассмотрены в работах [5, 6].

В работе на прозрачных моделях трубопроводов первого контура и опускного канала реактора типа ВВЭР, секторной модели верхней камеры быстрого реактора проведены исследования температурного режима и структуры движения теплоносителя в различных режимах работы.

На интегральной водяной трехконтурной модели быстрого реактора впервые проведены измерения локальных скоростей по высоте и радиусу верхней камеры в плоскости по направлению от центра активной зоны (АЗ) к промежуточному теплообменнику (ПТО) при принудительной циркуляции и аварийном расхолаживании естественной конвекцией.

Основные задачи исследований:

- исследования стратификационных явлений с большими градиентами и пульсациями температуры на границах раздела, которые влияют на безопасность и ресурс реакторного оборудования, не учитываются в проектной документации и не прогнозируется расчетными кодами;
- измерения пространственных распределений температуры и скорости в элементах контура при установившихся режимах принудительной циркуляции и аварийном расхолаживании естественной конвекцией, обеспечивающих верификацию расчетных кодов;
- исследование градиентов и пульсаций температуры на стратифицированных границах раздела между основным потоком и рециркуляционными, застойными образованиями, необходимых для разработки методов расчета термических напряжений, усталости материала оборудования и корпуса;
- разработка рекомендаций по интенсификации смешения неизотермического теплоносителя, оптимизации размещения штатных датчиков контроля и управления (исключения их размещение в застойных, рециркуляционных зонах, особенно в переходных режимах работы).

Экспериментальное оборудование, вопросы моделирования

Создана интегральная водяная модель быстрого реактора в масштабе $\sim 1:10$, принципиальная схема которой представлена на рис. 1, приближенно моделирующая первый контур реактора на быстрых нейтронах большой мощности.

Первый контур модели реактора состоит из двух параллельных петель, каждая из которых содержит два модельных ПТО, имитатор главного циркуляционного насоса (ГЦН-1) и один автономный теплообменник (АТО). Параметры второго и промежуточного контуров модели (расход и температура) принимались из расчетного обоснования процессов принудительной циркуляции и аварийного расхолаживания. В третьем контуре использовалась техническая вода с регулируемым расходом. Максимальное энерговыделение имитатора активной зоны модели ~100 кВт. Подробное описание экспериментальной модели представлено в работе [2].

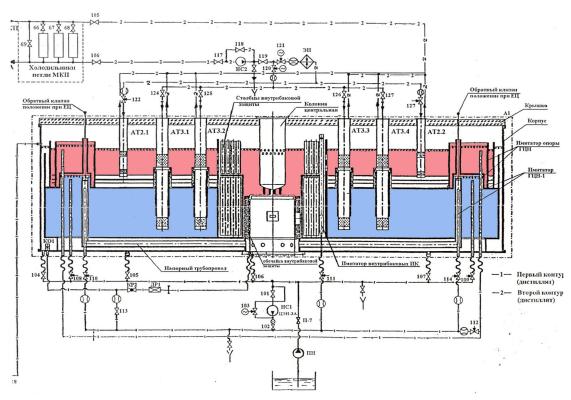


Рис. 1. Принципиальная схема интегральной водяной модели быстрого реактора

Влияние температурного расслоения на теплогидравлику также исследовалось на прозрачных моделях верхней камеры реакторов БН-800 и типа ВВЭР. На рис. 2 показана схема секторной модели верхней камеры реактора БН-800 с углом раскрытия 68° от оси, на рис. 3 — структура движения теплоносителя в камере в зависимости от числа Фруда.

Характерные расслоение и пульсации температуры на моделях трубопровода и опускного участка при разбалансе температур по петлям реактора ВВЭР показаны соответственно на рис. 4, 5. Подкрашенная стратифицированная поверхность раздела (рис. 4б) колеблется, является устойчивой и полностью подавляет конвективный перенос по высоте.

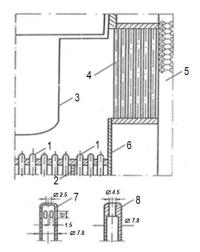


Рис. 2. Схема секторной модели:

1 — головки имитаторов ТВС; 2 — перегородка, разделяющая активную зону и боковые экраны; 3 — центральная поворотная колона; 4 — трубная защита; 5 — ПТО; 6 — обечайка; 7 — боковой (штатный) выход из головок ТВС; 8 — осевой выход из головок ТВС

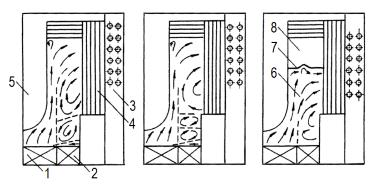


Рис. 3. Структура движения теплоносителя:

1 — активная зона; 2 — боковые экраны; 3 — ПТО; 4 — стержни биологической защиты; 5 — ЦПК; 6 — холодный теплоноситель; 7 — стратифицированная поверхность раздела; 8 — застойная зона горячего теплоносителя

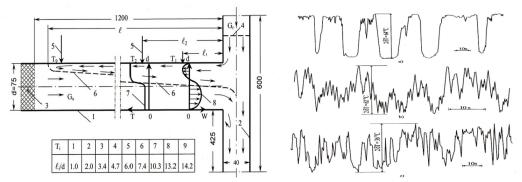


Рис. 4. Схема модели трубопровода и характерные пульсации температуры: колебания температуры связанные с неустойчивостью длины клина горячей жидкости в холодном потоке (a); пульсации температуры на стратифицированной границе раздела горячего и холодного потоков (δ); пульсации температуры стенки трубопровода на границе раздела (ϵ)

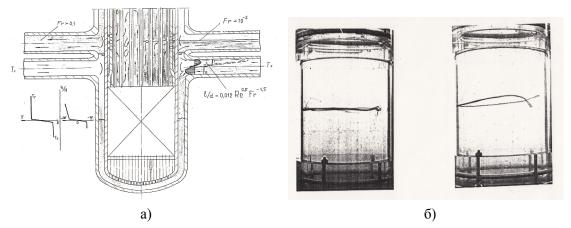


Рис. 5. Схема прозрачной модели реактора типа ВВЭР (а) и расслоение температуры по высоте опускного канала (б)

Характерная картина движения в замкнутом стратифицированном объеме жидкости при установке охлаждающих теплообменников на стенке емкости или по центру показаны на рис. 6.

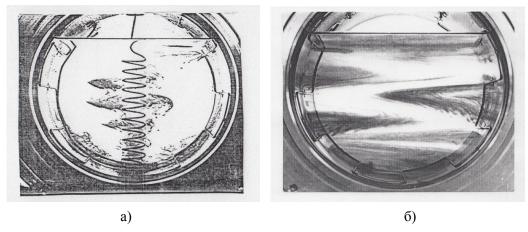


Рис. 6. Характерная структура движения стратифицированной жидкости в замкнутой емкости при расположении охлаждающего теплообменника на стенке (a) или по центру емкости (δ)

Вопросы моделирования теплогидравлики быстрых реакторов на интегральных водяных моделях в различных режимах работы подробно рассмотрены в работах [6–8]. Чтобы избежать трудностей строгого критериального моделирования, процессы теплоотдачи в активной зоне и теплообменниках заменены равномерными объемными тепловыделениями (теплопоглощением) с сохранением коэффициентов гидравлического сопротивления для модели и реактора. Такой подход использован в работах [6, 7] и позволяет исключить критерии подобия, связанные с влиянием теплоотдачи, теплоемкости системы в переходном режиме. Указанные отступления можно оценить соответствующими расчетными кодами.

В режимах принудительной циркуляции точное моделирование осуществлялось по числам Фруда ${\rm Fr}=\frac{W^2}{g\beta\Delta tL}$ и Рекле ${\rm Pe}=\frac{WL}{a}$, где ρ , c, a, β , g — плотность сре-

ды, удельная теплоёмкость, коэффициент температуропроводности, коэффициент объёмного расширения, ускорение в поле тяжести; $L,\ l$ – характерный размер; w – скорость.

Температурное расслоение теплоносителя (особенно в элементах контура с большими объемами, при переходных и аварийных режимах работы) характеризуется возникновением застойных, рециркуляционных образований с большими градиентами температуры на стратифицированных границах раздела.

Критериями, определяющими подобие течений в устойчиво стратифицированных зонах теплоносителя, являются числа Фруда, Пекле и локальное градиентное число Ричардсона $\mathrm{Ri} = g\beta(\partial t/\partial z)/(\partial w/\partial z)^2$. Характеристиками устойчиво стратифицированного течения теплоносителя являются: частота Вайсяля–Брента $N^2 = (g/\rho)(\partial \rho/\partial z)$ и масштаб плавучести $l_{\Pi} = \rho(\partial \rho/\partial z)^{-1}$. В устойчиво стратифицированном турбулентном потоке максимальный размер вихрей не может превышать масштаб плавучести. Поэтому крупномасштабные вихри большие, чем масштаб плавучести, подавляются и растекаются вдоль стратифицированной границы раздела в виде внутренних волн. Внутренние волны создают пульсации температуры в материале стенок оборудования с частотой $f \leq N$. В предельном случае, когда $l_{\Pi} \leq l_{K}$ происходит полное подавление конвективного переноса через поверхность раздела между холодной и горячей областями потока, где $l_{K} = (\upsilon^3/\epsilon)^{0.25}$ — масштаб Колмогорова, ϵ — скорость диссипации кинетической энергии турбулентности.

В вязкой жидкости моделирование по числам Фруда и Ричардсона невозможно с сохранением числа Рейнольдса. Исследования при числах $Re > 10^4$ показали, что размеры застойных и рециркуляционных образований (при $Fr_M = Fr_p$) не изменяются, поэтому точного моделирования по числам Re не требуется.

Приближенное моделирование режимов естественной циркуляции при аварийном расхолаживании реактора большой мощности на интегральной водяной модели обеспечивалось консервативным моделированием по числу Эйлера $\mathrm{Eu} = \Delta P/\rho~W^2$ (гидравлическое сопротивление контура циркуляции на модели при ЕЦ больше чем в реакторе).

Автоматизированная система сбора, обработки и управления теплогидравлическими параметрами модели содержит более 400 датчиков. С учётом специфики проводимых на ней экспериментов разделена на подсистемы: медленных измерений (опрос всех датчиков за 1 с); быстрых измерений (содержит 120 каналов с частотой опроса $10 \, \Gamma$ ц); корреляционных измерений локальных скоростей; контроля расходов, температуры, мощности нагревателей. Погрешность измерений температуры не превышала $\pm 0.5 \, ^{\circ}$ С, давления $\pm 0.1 \, \mathrm{k}\Pi$ а, напряжения $\pm 1 \, \mathrm{B}$, силы тока $\pm 1 \, \mathrm{A}$.

Картограмма имитаторов сборок АЗ интегральной водяной модели быстрого реактора показана на рис. ба, цифрами обозначены имитаторы ТВС на которых были установлены термопары. Для исследования пространственных распределений температуры и скорости [6] в верхней камере дополнительно одновременно использовались три аналогичных подвижных температурных термозонда (рис. бб, бв), и корреляционный зонд для скорости (рис. бг). На рис. 2г показана одна из проекций четырехтермопарного (медь-константанового) датчика скорости. Диаметр спая термопар составлял 0,3 мм.

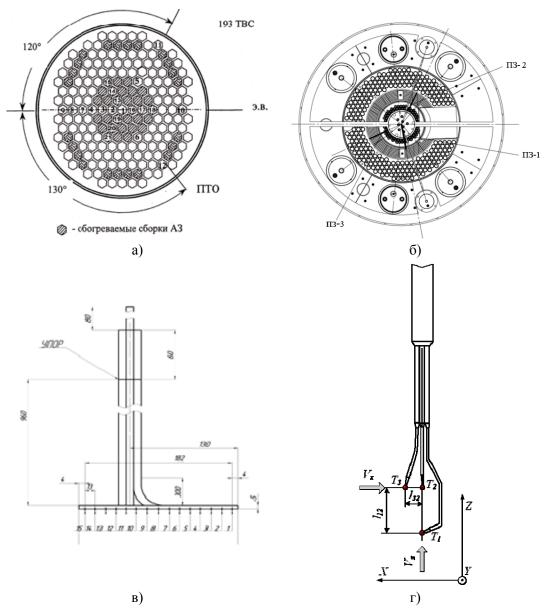


Рис. 6. Картограмма имитаторов сборок АЗ (a); схема расположения подвижных термозондов (ПЗ) (δ); расположение термопар на ПЗ (ϵ) и схема корреляционного зонда (ϵ) при $l_{12} = 5,13$ мм; $l_{32} = 3,16$ мм; $l_{42} = 3,34$ мм

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 7 представлены соответственно осредненные поля температуры (а) и интенсивности пульсаций (б) в верхней камере, полученные при перемещении термозондов ПЗ-1 и ПЗ-2 в стационарном номинальном режиме. Поля осредненные компонент скорости в вертикальном (а), горизонтальном (б) и азимутальном (в) направлениях в данном режиме показаны на рис. 8. Необходимо отметить, что конструкции подвижных зондов позволяли проводить измерения температуры и скорости на расстояниях больше ~ 3 от центральной поворотной колонны.

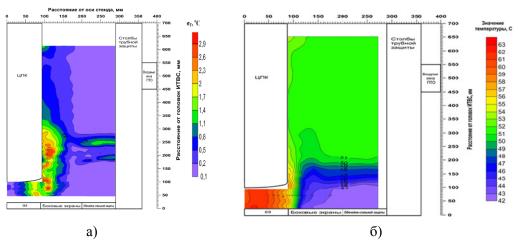


Рис. 7. Поля осредненной температуры (a) и интенсивности пульсаций (δ) по высоте верхней камеры, полученное при перемещении подвижных зондов в номинальном режиме

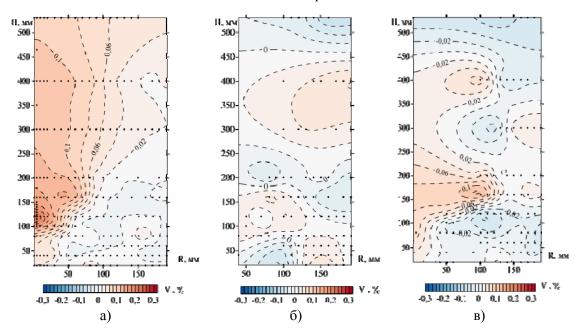


Рис. 8. Поля осредненных компонент скорости в верхней камере в номинальном режиме: вертикальная компонента (a); радиальная компонента (δ); азимутальная компонента (ϵ)

Характерные показания термопар подвижного термозонда ПЗ-1, установленных по радиусу АЗ через 13 мм, на высоте 15 мм от головок имитаторов ТВС в стационарном номинальном режиме принудительной циркуляции показаны на рис. 9.

Из представленных данных (рис. 7–9) следует, что структура движения неизотермического теплоносителя в верхней камере реактора определяется действием подъемных сил: горячий теплоноситель из активной зоны поднимается вверх вдоль центральной колонны к поверхности раздела и образует обширную вихревую почти изотермическую горячую зону в верхней области, из которой поступает в промежуточные теплообменники. На периферии нижней области верхней камеры над боко-

выми экранами формируется изотермическая устойчивая зона холодного теплоносителя, размеры которой с ростом расхода (мощности установки) увеличиваются. Зоны горячего и холодного теплоносителя в горизонтальном направлении занимают все сечение бака реактора.

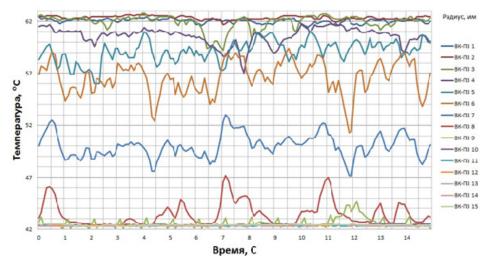


Рис. 9. Показания термопар термозонда ПЗ-1, установленных по радиусу АЗ через 13 мм, на высоте 15 мм от головок имитаторов ТВС в номинальном режиме

Разделительный слой между изотермическими зонами теплоносителя устойчиво стратифицирован с масштабом плавучести $l_{\rm п}$. Турбулентные вихри из верхней горячей и нижней холодной зон с масштабами $l > l_{\rm n}$ подавляются в разделительном слое и создают внутренние волны, вызывающие пульсации температуры в материале стенок оборудования. Поле вертикальной компоненты скорости в верхней камере в режиме ПЦ хорошо согласуется с картиной полей осредненной температуры. Распределения полей температуры и скорости по высоте верхней камеры (рис. 7–8) не является изотропным в азимутальном направлении. Вторичные слоистые течения в этих зонах связаны с горизонтальным градиентом температуры, обусловленным горячим потоком вдоль ЦПК и относительно холодной поверхностью ПТО.

Для номинального режима работы на рис. 10 показаны осредненные поля температуры по высоте некоторых элементов внутриреакторного оборудования. Неоднородность температуры теплоносителя по высоте выходных окон ПТО (рис. 10а) приводит к устойчивому температурному расслоению по высоте холодной камеры (рис. 10б). Циркуляционные насосы первого контура отбирают теплоноситель из верхней области холодной камеры, в нижней области расположена относительно устойчивая застойная зона холодного теплоносителя, в которой возможно осаждение окислов. Температурное расслоение теплоносителя по высоте элеваторной выгородки (рис. 10в) характеризуется двумя практически равными изотермическими рециркуляционными образованиями: горячей зоны вверху, холодной внизу и узким стратифицированным разделительным слоем с перепадом температуры почти равным подогреву в активной зоне.

Штатный выход теплоносителя из головок ТВС (через боковые отверстия) выравнивает поля скорости на выходе из АЗ, БЭ и не обеспечивает смешения неизотермического потока в верхней камере. Исследования на секторной фрагментарной прозрачной модели верхней камеры быстрого реактора [7] показали, что наиболее

эффективным способом интенсификации смешения неизотермического потока является вывод теплоносителя из головок ТВС в виде вертикальных струй. Холодный теплоноситель от боковых экранов (БЭ) замедляется под действием термогравитационных сил и интенсивно всасывается между более быстро поднимающимися струями горячего теплоносителя из активной зоны. Процесс смешения осуществляется в потоке теплоносителя непосредственно на входе в нижней области верхней камеры и не вызывает пульсаций температуры в материале оборудования.

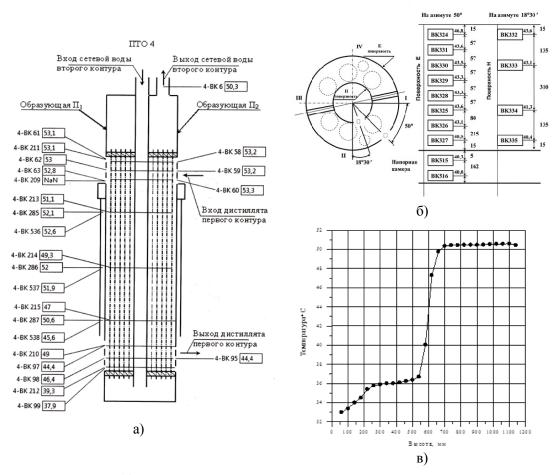


Рис. 10. Распределения осредненных температур по высотам: промежуточного теплообменника (*a*); холодной и напорной камер (δ); элеваторной выгородки (ϵ)

Режимные параметры экспериментальной модели при переходе к естественной конвекции определялись пересчетом соответствующих расчетных проектных реакторных значений (изменения мощности АЗ, выбег ГЦН-1, время открытия шиберов воздушных теплообменников, расчетные параметры промежуточного контура). Коэффициенты перерасчета определялись из равенства определяющих критериев подобия для реактора и модели. Таким образом, практическое моделирование аварийного расхолаживания является комплексной задачей и неотделимо от расчетов по кодам.

Характерные изменения температуры в некоторых точках на высоте 15 мм от головок ТВС по радиусу АЗ представлены на рис. 11.

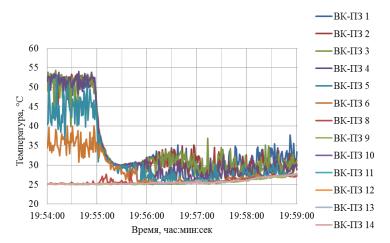


Рис. 11. Показания термопар термозонда ПЗ1, установленного на высоте 15 мм от головок ТВС в переходном режиме

Из полученных результатов следует, что основные перестройки полей температуры на выходе из активной зоны (рис. 11) происходят в первые 3 минуты и в дальнейшем процесс перехода к расхолаживанию можно рассматривать как квазистационарный.

При переходе к аварийному расхолаживанию с остаточным энерговыделением температура теплоносителя на выходе из имитаторов ТВС понижается, и фронт холодной жидкости с горизонтальной стратифицированной границей раздела поднимается вверх. После достижения поверхностью раздела уровня нижних отверстий входа в АТО контур циркуляции замыкается, дальнейшее продвижение более холодного теплоносителя вверх существенно замедляется. В верхней области камеры продолжительное время сохраняется устойчивая горячая зона с температурой, которая не существенно изменилась по сравнению со стационарным режимом ПЦ. На стратифицированной поверхности раздела существуют внутренние волны, которые вызывают пульсации температуры, зафиксированные стационарными термопарами на входе в АТО. Стабилизация температур в экспериментальной модели происходила примерно через 24 часа после начала аварийного расхолаживания.

Поля осредненной температуры и вертикальной компоненты скорости по высоте верхней камеры, полученные при перемещении подвижных термозондов ПЗ-1, ПЗ-2 и корреляционного зонда в установившемся режиме расхолаживания естественной конвекцией представлены на рис. 12.

Установившийся режим естественной циркуляции характеризуется значительно меньшими градиентами температуры в вертикальном направлении над боковыми экранами. Нижняя холодная зона существенно уменьшается по сравнению с принудительной циркуляцией. Над холодной зоной основной объем верней камеры занимает обширный почти изотермический макровихрь.

Поле вертикальной компоненты скорости при расхолаживании естественной конвекцией показывает на подъемное движение теплоносителя из активной зоны вдоль центральной поворотной колонны и обратное крупномасштабное вихревое течение над боковыми экранами. Картина распределения радиальной и азимутальной компонент скорости указывает на наличие вторичных противоположено направленных слоистых вихревых структур, обусловленных неоднородностью температур в горизонтальном и азимутальном направлениях.

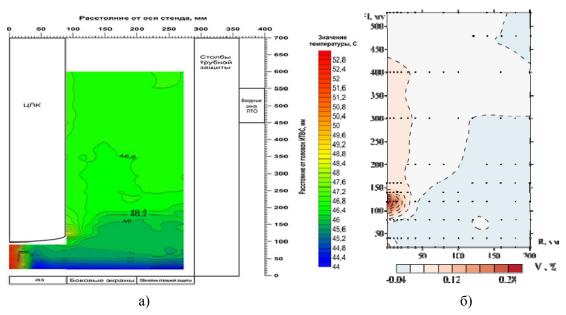


Рис. 12. Поле осредненной температуры (a) и вертикальной компоненты скорости (δ) по высоте верхней камеры в установившемся режиме расхолаживания естественной конвекцией

На рис. 13 показаны распределения осредненных температур по радиусу АЗ на расстоянии 15 мм от головок имитаторов ТВС в установившихся режимах принудительной циркуляции при номинальной мощности; штатном расхолаживании с отводом теплоносителя из АТО в напорную камеру, расхолаживании с отводом теплоносителя в верхнюю камеру двумя АТО. В переходных и стационарных режимах аварийного расхолаживания температура теплоносителя на выходе из головок ТВС активной зоны понижается по сравнению с номинальным режимом ПЦ.

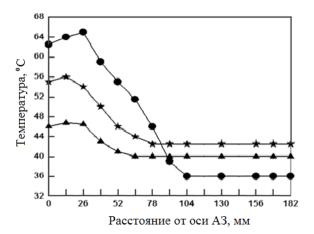


Рис. 13. Распределения осредненных температур по радиусу A3 на расстоянии 15 мм от головок имитаторов ТВС в установившихся режимах:

 • – принудительной циркуляции на номинальной мощности;

 • – штатном расхолаживании естественной конвекцией с отводом теплоносителя

 ▲ – штатном расхолаживании естественной конвекцией с отводом теплоносителя в напорную камеру; * – расхолаживание естественной конвекцией через два АТО с отводом теплоносителя в верхнюю камеру Таким образом, САОТ быстрых реакторов с натриевым теплоносителем с встроенными в бак реактора автономными теплообменниками обладает высокой эффективностью и обеспечивает отвод тепла остаточного энерговыделения АЗ без превышения температуры по сравнению с номинальным режимом эксплуатации.

Для различных режимов работы реактора, выявлены зоны с устойчивой температурной стратификацией с большими градиентами и пульсациями температуры. Полученные результаты позволяют судить об амплитуде и частотных характеристиках пульсаций температуры в этих потенциально опасных областях.

Заключение

Результаты исследований неизотермических течений теплоносителя в ЯЭУ различного типа показали, что стратификация коренным образом изменяет поля температуры и скорости в некоторых элементах контура циркуляции, приводит к возникновению обширных застойных и рециркуляционных образований с большими градиентами и пульсациями температуры на границах раздела. Стратификационные явления влияют на ресурс и безопасность ЯЭУ, они не учитываются в проектной документации и не прогнозируются расчетными кодами.

В результате выполненных измерений для большого числа режимов и условий экспериментов получены данные для верификации теплогидравлических кодов, используемых, в частности, для обоснования проектных характеристик и безопасности реактора БН-1200. В частности, это проектные коды DINROS и GRIF и коды нового поколения ЛОГОС, HYDRA, СОКРАТ-БН. Данные получены с помощью специально разработанной и внедренной на стенде системы измерений, обеспечивающей высокую точность измерений и высокую скорость их регистрации. Важно также, что верификация кодов в данном случае будет производиться в геометрических условия, приближенных к условиям на реакторе. Коды верифицированные с использованием данных, полученных на стенде В-200, предназначены для уточненного анализа и обоснования теплогидравлических характеристик быстрых реакторов с натриевым теплоносителем в стационарных и переходных режимах работы.

Список литературы

- 1. Опанасенко А.Н., Сорокин А.П., Зарюгин Д.Г., Рачков В.И. Стратификация теплоносителя в ядерных энергетических установках // Атомная энергия. 2011. Т. 111. Вып. 3. С. 131–136.
- 2. Опанасенко А.Н., Сорокин А.П., Зарюгин Д.Г., Федоров А.В. Экспериментальные исследования полей температуры и структуры движения теплоносителя на модели быстрого реактора в элементах первого контура при переходе к расхолаживанию естественной циркуляцией // Сборник «Итоги научно-технической деятельности института ядерных реакторов и теплофизики за 2014 год». Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. С. 102–111.
- 3. Опанасенко А.Н., Сорокин А.П., Труфанов А.А., Денисова Н.А., Свиридов В.Г., Беляев И.А., Разуванов Н.Г. Экспериментальные исследования полей температуры и скорости на интегральной водяной модели быстрого реактора в различных режимах работы // Научно-технический сборник «Итоги научно-технической деятельности отделения безопасности ЯЭУ за 2015 год» под общей редакцией А.А. Труфанова, А.П. Сорокина. Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ ФЭИ, 2016. С. 86–97.
- 4. Shulz H. Experience with thermal fatigue in LWR piping caused by mixing and stratification. In: Specialists Meeting Proceedings, Paris. 1998. P. 13–18.

- 5. Specialists Meeting of IAEA of «Evaluation of Decay Heat Removel by Natural Convection». February 22–23, 1993. Oarai Engineering Center. PNC, Japan. IAEA, IWGFR/88, 1993.
- 6. Ушаков П.А., Сорокин А.П. Проблемы моделирования на воде аварийного оста тепловыделения естественной конвекцией в камерах быстрых реакторов: Препринт ФЭИ-2585. Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ ФЭИ. 1997.
- 7. *Беляев И.А.*, *Разуванов Н.Г.*, *Загорский В.С*. Температурный датчик для измерения полей температуры и компонент скорости в магнитно-гидродинамическом потоке жидкого металла // Тепловые процессы в технике. 2015. № 12. С. 556–572.
- 8. Опанасенко А.Н. Теплогидравлика верхней области бака быстрого реактора в различных режимах работы: Препринт ФЭИ-2623. Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ ФЭИ. 1997.

Информация об авторах

- Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru
- Опанасенко Алексей Никифорович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: oan@ippe.ru
- Кузина Юлия Альбертовна, канд. техн. наук, заместитель генерального директора директор Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: ukuzina@ippe.ru
- **Денисова Наталья Александровна**, ведущий инженер Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: ndenisova@ippe.ru
- **Разуванов Н.Г.**, д-р. техн. наук, ведущий научный сотрудник НИУ «МЭИ», 111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, дом 14, e-mail: info@cati.ru
- Свиридов Евгений Валентинович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник НИУ «МЭИ», 111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, дом 14, e-mail: info@cati.ru
- **Беляев Иван Александрович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ОИВТ РАН 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

УДК 621.039.534.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИПЕНИЯ НАТРИЯ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ В МОДЕЛИ ТВС РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ*

А. П. Сорокин, Ю. А. Кузина, Е. Ф. Иванов, В. В. Привезенцев, Ю. М. Ашурко, А. В. Волков, Л. Л. Беренский, Н. А. Денисова

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

Численное моделирование развития аварийной ситуации типа ULOF в реакторе на быстрых нейтронах указывает на возможность возникновения кипения натрия в ТВС активной зоны. Процесс кипения сопровождается колебаниями технологических параметров реакторной установки. Значительное влияние на результаты оказывает используемая в расчётах модель двухфазного потока теплоносителя. Для исключения развития аварийной ситуации, приводящей к разрушению элементов активной зоны, предложено конструктивное решение в виде «натриевой полости» над активной зоной реактора. На стенде AP-1 в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» впервые получены экспериментальные данные по теплообмену при кипении натрия в модельной ТВС реактора на быстрых нейтронах в режимах естественной и вынужденной конвекции с «натриевой полостью». Показана возможность длительного охлаждения при возникновении кипения натрия в ТВС в диапазонах теплового потока на поверхности имитаторов твэлов до 140 и 170 кВт/м² в режимах естественной и вынужденной конвекции, соответственно. Полученные данные использованы для усовершенствования расчётной модели процесса кипения натрия в ТВС и верификации расчётного кода СОREMELT.

Одна из наиболее опасных аварий в реакторах на быстрых нейтронах связана с нарушением нормальной эксплуатации при одновременным прекращении энергоснабжения всех главных циркуляционных насосов совместно с отказом органов аварийного останова реактора — авария типа ULOF (Unprotected Loss of Flow) [1].

Расчетные исследования с применением кода COREMELT развития аварии типа ULOF в реакторах на быстрых нейтронах указывают на возникновение кипения натрия в активной зоне [2]. Процесс кипения сопровождается колебаниями технологических параметров установки, которые могут продолжаться в течение нескольких десятков секунд. При этом возможна реализация устойчивого режима отвода тепла остаточного энерговыделения. Существенное влияние на результаты расчётов оказывает используемая в коде COREMELT модель двухфазного потока теплоносителя [3]. Последняя версия этого кода требует экспериментального подтверждения.

Принимаемые конструктивные и технологические решения, касающиеся перспективных реакторных установок, должны исключать развитие аварийных ситуаций, приводящих к разрушению элементов активной зоны. Так, в случае вскипания натриевого теплоносителя конструктивное устройство реактора должно предотвращать возможное наступление кризиса теплообмена с последующим разрушением оболочек твэлов.

Численное моделирование развития аварии ULOF по коду COREMELT, показали эффективность организации в ТВС так называемой «натриевой полости», расположенной перед верхним торцевым экраном, с целью обеспечения самозащищенности

 $^{^*}$ Опубликовано в сборнике докладов на XI Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК – 2018), Москва, АО «Концерн Росэнергоатом», 23–24 мая 2018 г., 10 с.

реактора. Наличие «натриевой полости» позволяет компенсировать положительный натриевый пустотный эффект реактивности (НПЭР) вследствие того, что при попадании паровой фазы из верхней части активной зоны в эту полость увеличивается вклад утечки нейтронов в общий баланс реактивности и мощность реактора начинает снижаться, что в свою очередь приводит к снижению интенсивности парообразования.

Таким образом, одним из ключевых вопросов в обеспечении безопасности реакторов на быстрых нейтронах является решение вопроса о возможности и границах устойчивого охлаждения активной зоны при возникновении и развитии кипения натрия в процессе протекания аварийных процессов в активной зоне реактора, изучение особенностей физики процесса кипения натрия в модели ТВС с «натриевой полостью» с учетом влияния различных факторов в аварийных режимах, получение данных для проведения валидации модели процесса кипения натрия в ТВС и верификации расчетных теплогидравлических кодов.

В 1970–80 годах в Японии [4–6], Германии [7–10], США [11] и Франции [12, 13] были выполнены исследования кипения жидкометаллических теплоносителей в модельных ТВС, в 2015 году опубликованы результаты исследований кипения натрия в кольцевом зазоре китайскими специалистами [14]. Применительно к обоснованию самозащищенности быстрых реакторов с натриевым теплоносителем особый интерес представляют данные по кипению натрия в условиях естественной конвекции с малыми скоростями теплоносителя, характерными для ULOF. В период 1995–2005 гг. в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» проведена серия экспериментов по кипению натрий-калиевого сплава в моделях одиночных и системе параллельных ТВС в контурах с естественной циркуляцией [15–21]. Показано согласие проведенных японскими и российскими специалистами тестовых расчетов с экспериментами [22–25]. Расчетные исследования кипения натрия для этих режимов проводятся французскими специалистами [26–27]. Следует отметить, что экспериментальные исследования по кипению натрия в ТВС при наличии «натриевой полости» перед верхним торцевым экраном не проводились.



Рис. 1. Общий вид установки по исследованию кипения натрия в течение проведения эксперимента

В течение 2010–2015 годов на стенде AP-1 в AO «ГНЦ РФ – ФЭИ» была создана высокотемпературная экспериментальная установка и экспериментальная модель, описание которой представлено в работе авторов [28], и впервые проведены исследования влияния «натриевой полости» на характеристики теплообмена при кипении натрия в ТВС (рис. 1).

В докладе представлены результаты проведенных на указанной выше модели экспериментальных исследований теплообмена при кипении натрия в ТВС в режимах естественной и вынужденной конвекции. Впервые было показано, что при наличии «натриевой полости» в ТВС существует возможность обеспечения продолжительного охлаждения натрием имитаторов твэлов в ТВС (свыше десяти минут) при плотности теплового потока имитаторов твэлов до

140 кВт/м² в режиме естественной конвекции и 170 кВт/м² при вынужденной конвекции [29–30]. Обсуждаются задачи дальнейших исследований.

1. Оборудование, системы измерений и управления экспериментом

Экспериментальная установка состоит из двух циркуляционных контуров основного контура с натриевым теплоносителем и вспомогательного с натрий-калиевым теплоносителем [3]. Основной контур представлен подъемным участком с моделями ТВС, верхнего торцевого экрана, расширительным баком, опускной линией, электромагнитным насосом индукционного типа и подогревателем прямого накала, установленным в начале подъемной ветви. Кроме того, контур снабжен параллельной укороченной веткой с малым гидравлическим сопротивлением, которая минует подогреватель прямого накала. Для нее предусмотрен электромагнитный насос кондуктивного типа на основе постоянного магнита. Функция вспомогательного контура — охлаждение теплоносителя в натриевой петле. Теплота от натриевой петли отводится через рубашку-холодильник, которая установлена на внешней поверхности расширительного бака. В расширительный бак натрий попадает из экспериментальной модели, после чего охлажденный до 550°С поступает в опускной участок. Тепловая энергия из натрий-калиевой петли отводится воздушным теплообменником.

Сборка имитаторов твэлов состоит из семи элементов с электрическим обогревом, упакованных в треугольную решетку с относительным шагом 1,11 и дистанционированием проволочной навивкой с шагом 180 мм. Сборка помещена в шестигранный чехол из жаропрочной стали, который выполняет функцию корпуса. Его внешняя поверхность снабжена потенциометрическими датчиками, термопарами, охранным подогревателем и заключена в слой теплоизоляции.

Имитатор твэла состоит из цилиндрической оболочки с внешним диаметром около 9 мм, длиной 1200 мм, внутри которой расположена спираль из тугоплавкого металла. Пространство между спиралью и оболочкой заполнено высокотемпературной электроизоляционной засыпкой и заполнено гелием. Оболочка состоит из двух коаксиальных труб, изготовленных из жаропрочной стали. В трубе меньшего диаметра выполнены продольные пазы для установки термопар. Обогреваемая длина имитатора твэла составляет 600 мм. Каждый имитатор твэла снабжен четырьмя термопарами, заделанными в оболочку, с головками, распределенными по длине зоны энерговыделения.

После предварительного нагрева в петлевом подогревателе прямого накала натрий сначала попадает во входную камеру экспериментального участка (рис. 2), затем в область модели актив-

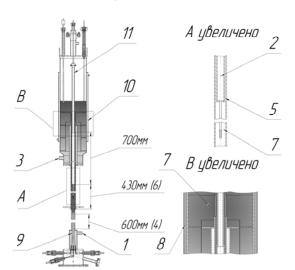


Рис. 2. Экспериментальный участок: вход натрия (1); вытеснитель (2); выход натрия (3); зона обогрева (4); кольцевой зазор (5); натриевая полость (6); натрий (7); натрий-калиевая эвтектика (8); семи элементная модель имитаторов твэлов (9); теплообменник (10); штанга вытеснителя (11)

ной зоны, где осуществляется его подогрев имитаторами твэлов. Над моделью активной зоны расположена натриевая полость длиной 430 мм. Далее натрий проходит через область, затесненную имитатором верхнего торцевого экрана, который вместе с корпусом участка образует узкий кольцевой зазор.

Зона «натриевой полости» и модели верхнего торцевого экрана выполнена из жаростойкой трубы диаметром 48 мм с толщиной стенки 4 мм, которая является продолжением корпуса экспериментального участка. Моделью имитатора верхнего торцевого экрана длиной 700 мм и корпусом участка образован кольцевой канал с шириной зазора 4 мм. На внешней поверхности модели верхнего торцевого экрана вдоль его длины также расположены термопары.

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

При создании основы программно-измерительного комплекса использовано оборудование Compact RIO компании National Instruments. Программируемый контроллер Compact RIO представляет собой многофункциональную и универсальную систему сбора данных, контроля и управления технологическими процессами, обеспечивающую высокую производительность, точность и надежность работы измерительных систем.

В течение экспериментов измеряются мощности имитаторов твэлов, температура технологических элементов, температура в потоке теплоносителя, температура стенок имитаторов твэлов, давление в газовой полости, перепад давления на модели ТВС, пульсации давления на выходе из модельной ТВС, расход теплоносителя в контуре, пульсации расхода на выходе из модели, уровень натрия в дыхательном баке, сигналы акустической эмиссии.

2. Экспериментальные исследования

Выход на режим кипения натрия в модели ТВС осуществлялся путем повышения мощности энерговыделения имитаторов твэлов. Подогретый в модели ТВС натрий поднимался в расширительный бак, в котором охлаждался и далее поступал в опускной участок. Мощность имитаторов твэлов повышалась дискретно небольшими ступенями вплоть до закипания натрия. Эксперименты проводились при давлении в газовой полости, незначительно превышающем атмосферное, газовый объем был заполнен аргоном.

Рассмотрим результаты исследований кипения натрия в модели ТВС в режиме естественной конвекции. Тепловой поток изменялся в диапазоне $110-140 \text{ kBt/m}^2$. При этом подогрев теплоносителя в модельной ТВС составлял $260-265 \,^{\circ}$ С, температура на входе $-636 \,^{\circ}$ С, температура насыщения на выходе из зоны обогрева $-890-900 \,^{\circ}$ С (рис. 3).

Вскипание теплоносителя было зафиксировано на 9799-й секунде по показаниям расходомера – индикатора кипения, расходомера в однофазной области, сигналам акустической системы и пульсациям давления. В это время расход теплоносителя

снизился до нуля. Через 0,5 с было зафиксировано кратковременное скачкообразное изменение температуры стенки центрального имитатора, которое, по-видимому, было связано с прекращением расхода теплоносителя. Температура натрия в начальной области «натриевой полости» возросла на 6 °C, расход увеличился до 0,3 м³/ч, произошло снижение температуры стенки имитатора до 911 °C в течение трех секунд. Этот процесс повторялся неоднократно и представляет собой интенсивное вскипание и затухание кипения натрия вследствие увеличения расхода.

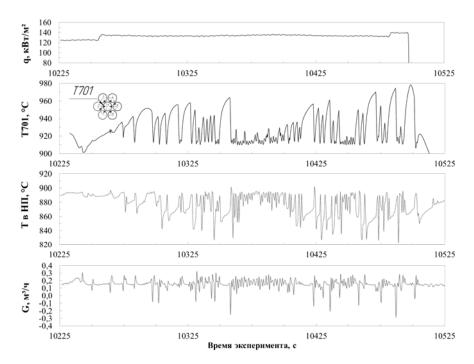


Рис. 3. Плотность теплового потока на имитаторах твэлов, температура стенки центрального имитатора (T701), температура теплоносителя в натриевой полости (Т в НП), массовый расход теплоносителя в модели ТВС

В остальное время превалирует пузырьковый режим с переменной интенсивностью – то полностью затухающий, то значительно интенсифицирующийся и сопровождающийся увеличением расхода теплоносителя в течение десяти секунд. Возможно, характер этого процесса определяется гидравлическими характеристиками модели ТВС в области «натриевой полости» и имитатора верхнего торцевого экрана. Он обусловливает повышенное гидравлическое сопротивление, препятствующее свободному продвижению паровой фазы и ее накоплению в «натриевой полости». Такой режим течения двухфазного потока натрия сохранялся длительное время без признаков кризиса теплообмена на уровне теплового потока до 120 кВт/м². При увеличении теплового потока имитаторов твэлов до 135 кВт/м² наступил пульсационный режим течения двухфазного потока с периодом пульсаций 3–14 с и амплитудой пульсаций температуры стенок имитаторов до 55 °С (рис. 3).

Процесс интенсивного парообразования в сборке сопровождается последующей конденсацией паров натрия в «натриевой полости» с заливом ее объема холодной жидкостью из верхней части модели. Об этом можно судить по резкому падению температуры жидкости в «натриевой полости» (до 820 °C). Одновременно с

конденсацией паров натрия в «натриевой полости» увеличивается расход теплоносителя, обеспечивается приток более холодной жидкости в модель активной зоны и прекращение кипения. Процесс повторялся неоднократно. При увеличении теплового потока до $140~{\rm kBT/m^2}$ пульсации температуры стенок имитаторов начали непрерывно возрастать и по достижении $980–985~{\rm C}$ питание сборки имитаторов твэлов было автоматически отключено аварийной системой защиты.

3. Режимы течения двухфазного потока натрия

Полученные экспериментальные данные для двухфазного потока натрия в модели ТВС с «натриевой полостью» в координатах массовая скорость — массовое паросодержание нанесены на картограмму режимов течения двухфазного потока жидкометаллических теплоносителей в сборках твэлов, представленную в работах авторов [20–21] (рис. 4).

Для пузырькового режима данные расположены в области массового паросодержания 0,1-2,5%, для снарядного режима -2,5-9% в диапазоне массовой скорости натрия 100-200 кг/(м²·с). Полученные данные для модели ТВС с «натриевой полостью» согласуются с данными серии экспериментов на модели ТВС без «натриевой полости» (без торцевого экрана) в контурах с естественной циркуляцией натрий-калиевого сплава [15–21].

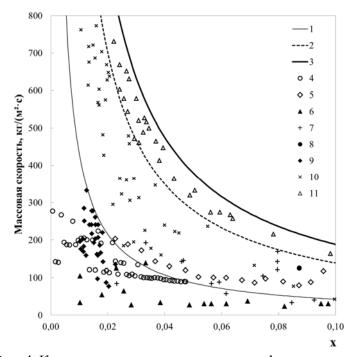


Рис. 4. Картограмма режимов течения двухфазного потока жидкометаллических теплоносителей:

граница пузырькового и снарядного режимов кипения (1); граница снарядного и дисперсно-кольцевого режима кипения (2); граница перехода к закризисному теплообмену (3); пузырьковый и снарядный режимы (4, 5) соответственно, данные по кипению натрия АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»; первый стабильный режим, пульсационный и второй стабильный режим (6, 7, 8) соответственно, по данным Ямагучи [6]; данные АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» [15–21] по кипению натрий-калиевого сплава: пузырьковый, снарядный и дисперсно-кольцевой режимы (9, 10, 11) соответственно

4. Теплоотдача при кипении щелочных жидкометаллических теплоносителей

На теплоотдачу при кипении жидкометаллических теплоносителей оказывают влияние давление, плотность теплового потока, состояние поверхности теплообмена (шероховатость), смачивание поверхности теплообмена теплоносителем, режимы течения двухфазного потока и др.

Данные по теплоотдаче жидкометаллических теплоносителей в каналах и пучках твэлов разрозненны и не систематизированы, отсутствует обобщающая зависимость, учитывающая влияние этих факторов. При вынужденном течении парожидкостной смеси металлов в трубе (при давлении около 0,1 МПа) уже при массовом паросодержании 1–5 % наступает дисперсно-кольцевой режим, характеризуемый тем, что 95–99 % жидкости находится в виде капель в центральной области потока. Коэффициент теплообмена при таких условиях имеет примерно такое же значение, что и при кипении в большом объеме.

В дисперсно-кольцевом режиме фазовый переход связан с испарением с поверхности пристенной пленки жидкого металла, имеющей малую толщину и высокую теплопроводность. Влияние массовой скорости и паросодержания на теплообмен в этих условиях, по-видимому, несущественно. Эксперименты, проведенные Ю.А. Зейгарником и др. [31], подтвердили это предположение – коэффициент теплоотдачи при кипении натрия в широком диапазоне значения плотности теплового потока $0.2-1.1~{\rm MBT/m^2}$ оставался по существу неизменным и равным $(2.5-4)\cdot 10^5~{\rm Bt/(m^2\cdot K)}$.

Однако в опытах [32] при кипении калия данные описывались хорошо известной зависимостью для теплоотдачи при кипении $\alpha \sim q^{0,7}$ для неметаллических жидкостей. Эта зависимость оказалась близкой зависимости для теплоотдачи при кипении в большом объеме. Совпадение зависимости $\alpha(q)$ в опытах с кипением жидкого металла в большом объеме и в трубах не случайно. Аналогичное совпадение наблюдается при кипении воды, а именно, соотношения для теплообмена при кипении в каналах при умеренной скорости смеси соответствует соотношениям для теплообмена при кипении воды в большом объеме. При малой скорости пароводяной смеси $\alpha \sim q^{0,7}$, при большой – $\alpha \sim w^{0,8}$, как это наблюдается при конвективном теплообмене.

Сопоставление данных по теплоотдаче показывает (рис. 5), что теплоотдача при кипении натрий-калиевого сплава в сборках твэлов [15–21] и калия в трубах [32] в диапазоне плотности теплового потока свыше 100 кВт/м^2 выше в среднем в 1,5 раза, чем при кипении щелочных жидких металлов в большом объеме [31].

Поскольку согласно представлению о термодинамическом подобии щелочных металлов теплофизические свойства (λ , r, σ , ρ , Ts) можно выразить через p/p_{kp} , формула для теплоотдачи при кипении жидких металлов может быть представлена виде:

$$\alpha = Aq^{2/3} \left(p/p_{\rm kp} \right)^n, \tag{1}$$

где q – плотность теплового потока, BT/M^2 ; p – давление, $M\Pi a$.

Аналогичные эмпирические соотношения для расчета теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении различных жидкометаллических теплоносителей были предложены в работе [32] в виде следующей формулы:

$$\alpha = Aq^m p^n \,. \tag{2}$$

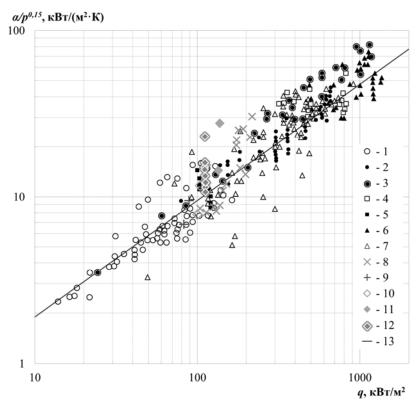


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных различных авторов по теплоотдаче при кипении жидких металлов в трубах с данными АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» для сборок твэлов: данные по кипению калия [32]:

кипение в большом объёме (1); труба Ø10 мм (электрообогрев) (2); труба Ø10 мм (теплообменник) (3); труба Ø8,3 мм (4); труба Ø22 мм (5); труба Ø4 мм (электрообогрев) (6); труба Ø6 мм (7); данные по кипению натрий-калиевого сплава в ТВС (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»): одиночные ТВС (7 элементов, длина зоны энерговыделения 420 мм) (8); параллельные ТВС (7 элементов, длина зоны энерговыделения 840 мм) (9); параллельные ТВС (одинаковая мощность) (10) [15-19]; параллельные ТВС (4 включенных имитатора в левой сборке и 7 в правой) (11) [20, 21]; данные по кипению натрия (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»): одиночная ТВС (7 элементов, длина зоны энерговыделения 600 мм) (12) [29, 30]; расчёт по формуле В.М. Боришанского (13) [32]

Коэффициенты A, m и n, описывающие различные данные, принимают значения в следующем диапазоне — $m=0,7;\ n=0,1-0,15;\ A=4,5-7,5$ как для калия, так и для натрий-калиевого сплава.

Соотношения, задаваемые формулой (1), совпадают с формулами для пузырькового кипения воды и других жидкостей при p=0,1 МПа. Причиной сходства является близкая величина скорости испарения ($w_{ev}=q/(r \cdot p)$), так как теплота испарения на единицу объема разных жидкостей примерно одинакова. Таким образом, с погрешностью ± 50 % теплоотдача при кипении не только термодинамически подобных металлических, но и других жидкостей описывается одинаковыми соотношениями. В первом приближении для расчета коэффициентов теплоотдачи при кипении натрия в сборах твэлов можно использовать зависимость (2).

Заключение

Расчетные исследования аварии с потерей теплоносителя и отказом активной защиты в реакторе на быстрых нейтронах показали, что режим течения двухфазного потока натрия в активной зоне, в особенности в «натриевой полости», находящейся над активной зоной, оказывает значительное влияние на величину натриевого пустотного эффекта реактивности и, соответственно, на протекание аварийного процесса и его последствия. В этой связи, требуется экспериментальное обоснование влияния «натриевой полости» на характер режима течения двухфазного потока теплоносителя как в активной зоне, так и в самой «натриевой полости». Для проведения исследований на стенде AP-1 в AO «ГНЦ РФ – ФЭИ» были созданы высокотемпературный натриевый контур и экспериментальная модель ТВС с «натриевой полостью».

Исследования кипения натрия показали, что возможно длительное охлаждение модельной ТВС с «натриевой полостью» при плотности теплового потока на поверхности имитаторов твэлов до $140~{\rm kBT/m^2}$ в режиме естественной конвекции и до $170~{\rm kBt/m^2}$ в режиме вынужденной конвекции в диапазоне массовой скорости $100–200~{\rm kr/(m^2 \cdot c)}$.

Результаты работы [3] показали, что кипение натрия в условиях аварии ULOF начинается на мощности реактора в 50 % от номинального значения при значении расхода теплоносителя около 15 % от номинального. При этом стабильный отвод тепла продолжается и после выбега насосов первого контура в условиях естественной циркуляции при мощности в диапазоне 15–30 % от номинального значения и уровне расхода натрия менее 10 % от номинального (рисунки 5а и 7а в работе [3]). Сравнение результатов расчетов и экспериментов, представленных в настоящей работе, показывает возможность отвода тепла кипящим теплоносителем в модельной ТВС с «натриевой полостью» при тепловых нагрузках 10–15 % и расходе натрия около 5 % от номинальных значений, приведенных в работе [3]. Таким образом, существует необходимость и целесообразность продолжения экспериментальных работ по обоснованию возможности отвода тепла от твэлов кипящим натрием при более высоких тепловых нагрузках.

Список литературы

- 1. *Багдасаров Ю.Е., Кузнецов И.А.* Расчётные исследования нестационарных и аварийных режимов работы и их роль в обеспечении безопасности // Атомная энергия. 1982. Т. 52. Вып. 1. С. 3–10.
- 2. Волков А.В., Кузнецов И.А. Усовершенствованная модель кипения натрия для анализа аварий в быстром реакторе // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2006. № 2. C. 101–111.
- 3. Ашурко Ю.М., Андреева К.А., Бурьевский И.В., Волков А.В., Елисеев В.А., Егоров А.В., Кузнецов И.А., Коробейникова Л.В., Матвеев В.И., Соломонова Н.В., Хомяков Ю.С., Царапкина А.Н. Исследование влияния натриевого пустотного эффекта реактивности на безопасность быстрого натриевого реактора большой мощности // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2014. № 3. С. 5–13.
- 4. *Kikuchi Y., Haga K.* Sodium boiling experiments in a 19 pin bundle under loss-of-flow conditions // Nuclear Engineering and Design. 1981. V. 66. P. 357–366.
- 5. *Haga K*. Loss of flow experiment in a 37 pin bundle LMRBR fuel assembly // Nuclear Engineering and Design. 1984. V. 82. P. 305–318.

- 6. *Yamaguchi K*. Flow pattern and dryout under sodium boiling conditions at decay power levels // Nuclear Engineering and Design. 1987. V. 99. N 3. P. 247–263.
- 7. Kaiser A., Peppler W. Flow rundown experiments in a seven pin bundle // Nuclear Engineering and Design. 1977. V. 43. P. 273–283.
- 8. *Huber F., Peppler W.* Boiling and dryout behind local blockages in sodium cooled rod bundles // Nuclear engineering and design. 1984. V. 82. P. 341–363.
- 9. *Kaiser A., Huber F.* Sodium boiling experiments at low power under natural convection conditions // Nuclear Engineering and Design. 1987. V. 100. P. 367–376
- 10. *Huber F., Kaiser A., Mattes K. and Peppler W.* Steady state and transient sodium boiling experiments in a 37 pin bundle // Nuclear Engineering and Design. 1987. V. 100. P. 377–386.
- 11. *Gnadt P.A., Carbajo J.J., Dearing J.F.* Sodium boiling experiments in the THORS facility // Nuclear Engineering and Design. 1984. V. 82. P. 241–280.
- 12. Seiler J.M. Studies on sodium boiling phenomena in out-of-pile rod bundles for various accidental situation in LMFBR: experiments and interpretations // Nuclear Engineering and Design. 1986. V. 82. P. 227–239.
- 13. Seiler J.M., Juhel D., Dufour Ph. Sodium boiling stabilization in a fast breeder sub-assembly during an unprotected loss of flow accident // Nuclear Engineering and Design. 2010. V. 240. P. 3329–3335.
- 14. Qiu Z.C., Ma S.Y., Qiu S.Z., Su G.H., Zhang D.I., Wu Y.W., Tian W.X. Experimental research on the thermal hydraulic characteristics on sodium boiling in an annulus // Experimental Thermal and Fluid Science. 2015. V. 60. P. 263–274.
- 15. Сорокин А.П., Ефанов А.Д, Иванов Е.Ф., Марцинюк Д.Е., Богословская Г.П., Рымкевич К.С., Мальков В.Л. Расчетно-экспериментальные исследования условий устойчивого теплообмена при возникновении кипения жидкого металла в режиме аварийного расхолаживания быстрого реактора // Ядерная энергетика. 1999. № 2. С. 59–70.
- 16. Сорокин А.П., Ефанов А.Д., Иванов Е.Ф., Марцинюк Д.Е., Богословская Г.П., Рымкевич К.С., Мальков В.Л. Теплообмен при кипении жидкого металла в режиме аварийного расхолаживания быстрого реактора // Атомная энергия. 1999. Т. 87. Вып. 5. С. 337–342.
- 17. Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Богословская Г.П., Колесник В.П., Мариинюк С.С., Мальков В.Л., Сорокин Г.А., Рымкевич К.С. Исследования теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции // Теплоэнергетика. 2003. № 3. С. 20–26.
- 18. Efanov A.D., Sorokin A.P., Ivanov Eu.F., Bogoslovskaya G.P., Kolesnik V.P., Martsinyuk S.S.. Sorokin G.A., Rymkevich K.S. An investigation of the heat transfer and stability of liquid-metal coolant boiling in a natural circulation circuit // Thermal Engineering. 2003. V. 50. N 3. P. 194–201.
- 19. Efanov A.D., Sorokin A.P., Ivanov Eu.F., Bogoslovskaya G.P., Ivanov V.V., Volkov A.D. Liquid-metal boiling heat transfer in a system of channels under natural circulation conditions // Eleventh International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11), Octouber 2–6, 2005, Avignon, France.
- 20. Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Богословская Г.П., Иванов В.В., Волков А.Д., Сорокин Г.А., Зуева И.Р. Теплообмен при кипении жидкого металла в системе каналов в режиме естественной циркуляции // Теплоэнергетика. 2007. № 3. С. 43–51.
- 21. Efanov A.D., Sorokin A.P., Ivanov E.F., Sorokin G.A., Bogoslovskaia G.P., Ivanov V.V., Volkov A.D., Sorokin G.A., Zueva I.R., Fedosova M.A. Heat transfer under natural convection of liquid metal during its boiling in a system of channels // Thermal Engineering. 2007. V. 54. N 3. P. 214–222.

- 22. Kasahara F., Ninokata H., Sorokin A.P., Bogoslovskaya G.P. Analysis of liquid-metal boiling under the natural circulation condition // NTHAS2: Second Japan-Korea symposium on nuclear thermal hydraulics and safety, Fukuoka, Japan, October 15–18, 2000.
- 23. Сорокин Г.А., Ниноката Х., Эндо Х., Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Богословская Г.П., Волков А.Д., Зуева И.Р. Экспериментальное и расчётное моделирование теплообмена при кипении жидкого металла в системе параллельных тепловыделяющих сборок в режиме естественной конвекции // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2005. № 4. С. 92–106.
- 24. Sorokin G.A., Sorokin A.P. Experimental and numerical investigations of liquid metal boiling in fuel subassemblies under natural circulation conditions // The Progress in Nuclear Energy Journal / Special Issue: Innovative Nuclear Energy System for Sustainable Development of the World. Proceeding of the First COE-INES International Symposium, INES-1 / October 31–November 4, 2004 Tokyo, Japan. 2005. V. 47. N 1–4. P. 656–663.
- 25. Sorokin G.A., Ninokata H., Sorokin A.P., Endo H., Ivanov Eu.F. Numerical study of liquid metal boiling in the system of parallel bundles under natural circulation // Journal of Nuclear Science and Technology. 2006. V. 43. N 6. P. 623–634.
- 26. Aply N., Marsault Ph., Sciora P., Lavastre R., Perez J., Anderhuber M., Gerschenfeld A., Kadri D., Bazin P. Phenomenological investigation of sodium boiling in a SFR core during a postulated ULOF transient with CATHARE 2 system code: a stabilized boiling case // The 10th International Topic Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10). NUTHOS10–1084. Okinava, Japan, December 14–18, 2014.
- 27. Perez J., Aply N., Juhel D., Beston D. CATHARE 2 simulation of steady state air/water tests performed in 1:1 scale SFR sub-assembly mock-up // Annals of Nuclear Energy. 2015. V. 83. P. 283–297.
- 28. Хафизов Р.Р., Ашурко Ю.М., Волков А.В., Иванов Е.Ф., Привезенцев В.В., Сорокин А.П., Кумской В.В. Подготовка экспериментального стенда АР-1 и экспериментальной модели к проведению исследований кипения натрия в модели ТВС в обоснование безопасности быстрого реактора нового поколения // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2014. № 1. С. 77–87.
- 29. Хафизов Р.Р., Поплавский В.М., Рачков В.И., Сорокин А.П., Труфанов А.А., Ашурко Ю.М., Волков А.В., Иванов Е.Ф., Привезенцев В.В. Экспериментальные исследования теплообмена при кипении натрия в модели ТВС в обоснование безопасности перспективного реактора на быстрых нейтронах // Теплоэнергетика. 2017. № 1. С. 10–19.
- 30. Khafizov R.R., Poplavsky V.M., Rachkov V.I., Sorokin A.P., Trufanov A.A., Ashurko Yu.M., Volkov A.V., Ivanov E.F. and Privezentsev V.V. Experimental studies of heat exchange for sodium boiling in the fuel assembly model: safety substantiation of a promising fast reactor // Thermal Engineering. 2017. V. 64. N 1. P. 6–14.
- 31. 3ейгарник O.A., Литвинов B.Д. Кипение щелочных металлов в каналах. M.: Наука. 1983.
- 32. *Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С.* Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1976.

Информация об авторах

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

Кузина Юлия Альбертовна, канд. техн. наук, заместитель генерального директора – директор Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: ukuzina@ippe.ru

- **Иванов Евгений Федорович**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru
- Ашурко Юрий Михайлович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения ядерных реакторов и топливного цикла АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: ashurko@ippe.ru
- Волков Андрей Викентьевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения ядерных реакторов и топливного цикла АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: volkov@ippe.ru
- **Беренский Леонид Леонтьевич**, научный сотрудник Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: berensky@ippe.ru
- Денисова Наталья Александровна, ведущий инженер Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: ndenisova@ippe.ru

УДК 621.039.524

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТВС АКТИВНОЙ ЗОНЫ В ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ*

Г. П. Богословская, П. Л. Кириллов, В. М. Лощинин, Р. С. Пометько, Ю. Ф. Селиванов, А. М. Смирнов, А. П. Сорокин, А. А. Труфанов

АО «ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»

В проведенных в ГНЦ РФ - ФЭИ многочисленных экспериментальных исследованиях при равномерном распределении по поперечному сечению сборки определялось влияние интенсификации теплообмена на критическую мощность сборки. Обнаружена большая зависимость величины прироста критической мощной сборки, оснащенной только дистанционирующими решетками, от количества и вида расположенных в сборке дополнительных перемешивающих решеток. Однако результаты исследований показывают, что не любое размещение перемешивающих решеток приводит к увеличению критической мощности сборки. Эффективность перемешивания потока теплоносителя во всех использованных моделях ТВС определена и в опытах при неравномерном распределении тепловыделения по поперечному сечению сборок. Слабое перемешивание потока теплоносителя наблюдалось в сборках с использованием трёх решёток при всех вариантах их расположения по длине сборки. В сборках с четырьмя и пятью решётками интенсивность перемешивания потока уже значительно возросла и находилась примерно на одном и том же уровне. Для предварительной оценки эффективности оснащения ТВС ВВЭР решетками-интенсификаторами предложена методика расчета величины критического теплового потока, учитывающая особенности конструкции решеток-интенсификаторов и их взаимное расположение в ТВС. Возможности расчетной методики демонстрируются на конкретных примерах путем сопоставления расчетных значений критического теплового потока с экспериментальными данными, полученными на моделях ТВС различных конструкций. Представлены результаты анализа теоретических и экспериментальных исследований теплообмена в пучках твэлов при течении воды сверхкритических параметров. Показано, что наличие проволочной навивки на твэлах способствует интенсификации теплообмена. Полученные данные использованы при теплогидравлическом расчете ТВС активной зоны экспериментального реактора мощностью 30 МВт тепловых (ВВЭР-СКД-30).

Повышения критической мощности сборки (мощность сборки при возникновении кризиса теплообмена) можно добиться за счёт интенсификации теплообмена между твэлами и теплоносителем и выравнивания параметров теплоносителя по поперечному сечению как одной сборки, так и всей активной зоны реактора. Основные надежды связываются с разработкой различных устройств, которые интенсифицировали бы теплообмен и перемешивали теплоноситель. Этими двумя качествами обладают, так называемые, перемешивающие решётки (решётки-интенсификаторы) без свойств дистанционирования, но интенсификации теплообмена и поперечного перемешивания теплоносителя. Как правило, эти решётки размещаются в промежутках между дистанционирующими решётками. При этом следует учитывать существование ограничения на количество дополнительно устанавливаемых устройств, связанное с необходимостью соответствия друг другу гидравлического сопротивления существующих топливных сборок и сборок нового поколения для возможности их совместного использования в ядерном реакторе.

^{*} Опубликовано в научно-техническом сборнике «Итоги научно-технической деятельности отделения безопасности ядерно-энергетических установок за 2015 год» под общей редакцией А.А. Труфанова, А.П. Сорокина. Технический редактор Г.Ф. Комышная. – Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ – ФЭИ, – 2015. – С. 252–263.

Данные по оптимальному количеству перемешивающих решёток и месту их размещения в сборках могут быть получены в результате экспериментальных исследований на моделях. В настоящей работе использовались решётки специфического вида, получившими название «вихрь». Эксперименты проведены с применением в качестве теплоносителя фреона, использование которого позволяет достичь условий появления кризиса теплообмена при пониженных в сравнении с использованием воды параметрах (давление, температура, расход теплоносителя и уровень энергонагружения сборки). Использовалось неравномерное («косинусоидальное») распределение тепловыделения по длине, что приближало условия появления кризиса теплообмена в модели ТВС к условиям штатной сборки.

Важным вопросом является разработка методики расчета величины критического теплового потока, учитывающей особенности конструкции решётокинтенсификаторов и их взаимное расположение в ТВС. Для предварительной оценки эффективности оснащения ТВС ВВЭР решётками-интенсификаторами предложена расчетная методика, возможности которой демонстрируются на конкретных примерах путем сопоставления расчетных значений критического теплового потока с экспериментальными данными, полученными на моделях ТВС различных конструкций.

1 Влияние перемешивающих решеток типа «вихрь» на критическую мощность ТВС ВВЭР

Исследование способности решёток различного вида интенсифицировать теплообмен в ТВС и, тем самым, влиять на величину критической мощности сборок проводилось при равномерном распределении тепловыделения по поперечному сечению сборок.

Поскольку одним из предъявляемых требований к решёткам является способность перемешивать поток теплоносителя с целью выравнивания его параметров по поперечному сечению сборки и, в результате, повышать критическую мощность сборки, необходимо определение смесительных возможностей решёток. Смесительное качество решёток определялось на основе анализа влияния неравномерности тепловыделения по поперечному сечению сборок на величину критической мощности сборок. Основу эксперимента составляла предпосылка о том, что полное отсутствие поперечного перемешивания теплоносителя не должно оказать влияния на критиче-

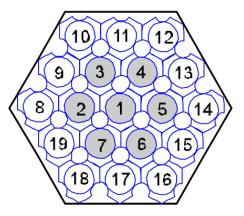


Рис. 1. Поперечное сечение сборки с центральносимметричным распределением поперечной неравномерности тепловыделении

скую мощность имитаторов центральной зоны сборки, а при существовании перемешивания заброс «относительно холодного» теплоносителя в центр сборки должен приводить к росту критической мощности имитаторов центральной зоны. Тогда по влиянию на критическую мощность единичных имитаторов твэлов центральной зоны сборки перехода с равномерного распределения тепловыделения по поперечному сечению сборки на неравномерное распределение можно будет судить об интенсивности перемешивания потока теплоносителя.

С этой целью, тепловыделение двенадцати периферийных имитаторов твэлов искусственно занижалось (рис. 1). Полученная в экспериментах величина критической мощности единичного имитатора центральной зоны сборки при смене характера распределения тепловыделения в сборке с испытываемыми решётками сопоставлялась с критической мощностью имитатора центральной зоны сборки при равномерном распределении тепловыделения по поперечному сечению сборки. Величина относительного прироста мощности служила мерой эффективности перемешивания потока в сборке.

Во всех экспериментах отношение электрической мощности единичного имитатора периферийной зоны сборки к единичному имитатору центральной зоны (перекос) поддерживалось на уровне 0,79. Вследствие этого суммарная мощность сборки снижалась примерно на тринадцать процентов.

Данные об относительном изменении критической мощности единичного имитатора центральной зоны различных сборок при переходе от равномерного по поперечному сечению сборки тепловыделения к неравномерному приведены в таблице 1.

Таблица 1. Относительный прирост критической мощности единичного имитатора центральной («горячей») зоны сборок с различным типом и количеством дистанционирующих и перемешивающих решёток при переходе от равномерного распределения тепловыделения по поперечному сечению сборки имитаторов твэлов к неравномерному с перекосом 0,79

с перекосом 0,79						
Давление, бар	20),3	26,6			
Расход, <i>G</i> , т/ч; рw, кг/(м²·с)	G = 15,6 $\rho w = 2580$	G = 21,6 $\rho w = 3580$	G = 10,6 $\rho w = 1760$	G = 15,6 $\rho w = 2580$	G = 21,6 $\rho w = 3580$	
Только дистанционирующие решётки	1,0 %	_	2,3 %	0 %	0 %	
«Вихрь» 3 решётки (сборка А)	1,8 %	_	0 %	0 %	0 %	
«Вихрь» 3 решётки (сборка В)	1,9 %	1,3 %	4,9 %	2,2 %	3,1 %	
«Вихрь» 3 решётки (сборка С)	1,0 %	1,9 %	0,9 %	3,9 %	0,9 %	
«Вихрь» 4 решётки (сборка Е)	1,0 %	_	6,5 %	5,3 %	6,0 %	
«Вихрь» 4 решётки (сборка F)	15,1 %	6,6 %	3,6 %	2,4 %	7,4 %	
«Вихрь» 5 решёток (сборка G)	1,0 %	_	6,1 %	3,2 %	4,0 %	
«Прогонка» 4 решётки	3,0 %	6,2 %	2,2 %	2,2 %	0 %	
«Вихрь» 2 решётки «Прогонка» рядом (сборка I)	6,6 %	6,3 %	2,2 %	3,5 %	2,9 %	
«Вихрь» 2 решётки и «Прогонка» 2 решетки растянуто (сборка J)	3,5 %	8,7 %	7,7 %	3,5 %	2,3 %	
«Вихрь» 2 решётки и «Прогонка» 1 решетка (сборка К)	4,4 %	7,4 %	12,0 %	5,9 %	3,2 %	

На основании этих данных можно отметить, что три решётки типа «вихрь» при всех вариантах их расположения по длине сборки оказывают слабое влияние на поперечное перемешивание потока теплоносителя. В сборках с четырьмя решётками типа «вихрь» интенсивность перемешивания в значительной мере зависит от геометрии расположения решёток по длине сборки. Влияние перемешивания потока на критическую мощность сборки при размещении у выхода теплоносителя из сборки пяти решёток «вихрь» находится на уровне влияния на критическую мощность четырёх решёток, располагаемых по длине сборки согласно схеме E [1].

При совместном использовании в сборках решёток типа «вихрь» и «прогонка» интенсивность перемешивания потока уже несколько возросла и в значительной мере зависела от места расположения решёток типа «прогонка».

2 Методика расчетной оценки запаса до кризиса теплоотдачи в ТВС ВВЭР новых конструкций

Одним из действенных способов повышения критических тепловых нагрузок является оснащение ТВС специальными решетками с интенсификаторами теплои массообмена, оптимизация их конструкции и взаимного расположения. В частности, для РУ ВВЭР-1200 конструкторскими организациями в настоящее время предлагаются различные варианты оснащения ТВС ВВЭР решётками-интенсификаторами. Для предварительной оценки эффективности предлагаемых решений необходимо располагать методикой расчета величины критического теплового потока, учитывающей особенности конструкции решеток и их взаимного расположения в ТВС.

Такая методика разрабатывается в ГНЦ РФ – ФЭИ и является развитием и усовершенствованием методики, подробно описанной в работе [2]. Суть методики состоит в допущении, что каждая дистанционирующая решётка и решётка-интенсификатор вносит соответствующие возмущение в поток теплоносителя которое экспоненциально затухает по длине ТВС. Эти возмущения потока теплоносителя оказывают влияние на теплоотдачу и условия возникновения КТП и могут быть представлены в виде произведения функций влияния.

Обобщенная функция влияния дистанционирующей решётки на критический тепловой поток, таким образом, может быть представлена в виде:

$$\mu_{\mathrm{Ap}} = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3,\tag{1}$$

где: μ_1 – коэффициент влияния расстояния по потоку от ближайшей решетки до расчетного сечения ТВС;

µ2 – коэффициент влияния конструкции дистанционирующей решётки;

 μ_3 – коэффициент влияния предыдущей решётки на критический тепловой поток, параметр *sp* трактуется как расстояние по потоку от предыдущей решетки до расчетного сечения TBC.

Соответственно, величина локального критического теплового потока для ТВС равна:

$$q_{\mathrm{KP}}^{0} = q_{\mathrm{KP}}^{0} \cdot \mu_{\mathrm{JD}}, \qquad (2)$$

где $q_{\rm kp}^0$ – величина критического теплового потока в ТВС без решеток.

В результате система поправочных коэффициентов методики стала следующей:

$$\mu_1 = 1 + A_{sp} \cdot \exp\left(-B_{sp} \frac{L_{usp}}{D_h}\right);$$

 $\mu_2 = 1 + k$ (тип решетки);

$$\mu_3 = 1 + A_{sp} \cdot \exp\left(-B_{sp} \frac{SP}{D_h}\right). \tag{3}$$

Для адаптации методики к расчету критического теплового потока в треугольных упаковках стержней были использованы экспериментальные данные ГНЦ РФ – ФЭИ по критическому тепловому потоку, полученные при различном размещении дистанционирующей решётки в моделях TBC-2.

После проведения предварительных расчетных исследований с вариацией коэффициента A_{SP} и анализа полученных результатов в указанный коэффициент была введена поправка на влияние скорости:

$$A_{sp} = 1,05 \cdot K\Gamma C \left(\frac{G}{1000}\right)^{0,2} A_{Re},$$
 (4)

где $A_{\text{Re}} = 3,916 - 0,523 \, \text{lg(Re)}$;

 $B_{sp} = 0.1$;

 D_h – гидравлический диаметр ячейки;

 L_{usp} — расстояние по потоку от ближайшей решетки до расчетного сечения ТВС; $K\Gamma C$ — коэффициент гидравлического сопротивления дистанционирующей решётки.

В методике ГНЦ РФ – ФЭИ в качестве $q_{\rm kp}^0$ использовалась корреляция EPRI [3], разработанная в Колумбийском университете специально для ячейковых кодов.

Область применимости корреляции EPRI охватывает практически весь диапазон рабочих параметров ВВЭР. Вместо корреляции EPRI может быть использована любая другая или набор корреляций покрывающие необходимый диапазон параметров и обладающие нужной погрешностью описания экспериментальных данных.

Для верификации методики были проведены расчеты с ячейкового кода ВЯЗ-2М для 15 моделей сборок УТВС и ТВС-2 с сотовыми дистанционирующими решётками и равномерным обогревом по длине. Число экспериментальных точек — 1091.

Результаты сопоставления экспериментальных значений критического теплового потока с расчётными представлены в таблице 2.

В колонках ВЯЗ-ЕРRI, ВЯЗ-ЕРRI-1, ВЯЗ-ЕРRI-2 представлены величины среднее отклонение экспериментальных данных от расчетных значений Δ и суммарная среднеквадратичная погрешность σ без учета влияния дистанционирующей решётки, с учетом влияния дистанционирующей решётки и с учетом влияния стягивающих имитаторы ТВЭЛ электромагнитных сил, соответственно.

Как следует из таблицы 1 методика ГНЦ РФ – ФЭИ позволила впервые обобщить экспериментальные данные по локальным значениям критического теплового потока для моделей сборок УТВС и ТВС-2 с сотовыми дистанционирующими решётками с равномерным обогревом по длине с погрешностью близкой к экспериментальной. Как показал анализ, величина суммарной экспериментальной погрешности составляет ± 10 %.

Таблица 2. Сравнение экспериментальных значений критического теплового потока с расчётными

F			1						
Код	ВЯЗ-EPRI		ВЯЗ-Е	EPRI-1	ВЯЗ-ЕРКІ-2				
Модель ТВС	Δ , %	σ, %	Δ , %	σ, %	Δ , %	σ, %			
Эксперименты АО «ОКБМ АФРИКАНТОВ»									
TBCA-13	9,5	3,2	-3,28	3,5	-3,28	3,5			
TBCA-6	4,1	2,6	-2,2	2,9	-2,2	2,9			
TBCA-19	-0,0	3,0	-6,5	3,0	-6,5	3,0			
Эксперименты ГНЦ РФ – ФЭИ									
MK19-1	-4,3	4,6	-6,67	4,7	-2,67	4,7			
MK37-1	37-1 -1,4		-4,29	6,0	-0,29	6,0			
MK37-2	-2,6	5,5	-5,56	5,8	-1,56	5,8			
TBC2M	-1,7	5,6	-3,7	5,9	0,7	5,9			
TBC2-12	0,45	6,8	-5,	6,9	0,0	6,9			
TBC2-15	7,8	4,3	2,4	4,3	2,4	4,3			
ПО19-3В	8,2	5,0	3,4	5,1	3,4	5,1			
	Экспер	оименты РНІ	Ц «Курчатов	ский инстит	ут»				
19RU/3.5	6,0	3,2	0,12	3,2	0,12	3,2			
Эксперименты АО «ОКБ Гидропресс»									
Пучок 1	15,4	6,3	6,3	6,8	6,3	6,8			
Пучок 2	7,0	2,8	1,3	2,8	1,3	2,8			
Пучок 4	7,9	6,6	-1,3	6,6	-1,3	6,6			
Пучок 7	11,8	2,9	-0,48	2,9	-0,48	2,9			

3 Совершенствование эмпирической методики ГНЦ РФ – ФЭИ для расчета критического теплового потока в ТВС ВВЭР новых конструкций

Для анализа влияния различных типов решёток-интенсификаторов на прирост критического теплового потока были выбраны экспериментальные данные ГНЦ РФ – ФЭИ, АО «ОКБ Гидропресс», АО «ОКБМ АФРИКАНТОВ» и РНЦ «Курчатовский институт» для моделей ТВС с равномерным аксиальным энерговыделением, оснащенных различными типами решеток.

Из анализа проведенных предварительных расчетов и экспериментальных данных можно сделать следующие основные предположения.

Для разных режимов кипения влияние дистанционирующих решёток и решёток-интенсификаторов на условия возникновения критического теплового потока отличается.

При кипении с недогревом (x < 0) интенсифицирующее воздействие дистанционирующих решёток и решёток-интенсификаторов должно проникать в область пристенного кипения. Эта область характеризуется большими тепловыми потоками и интенсивностью переносных процессов. Дистанционирующие решётки и решётки-интенсификаторы в большей степени воздействуют на поток теплоносителя в объеме ячейки и поэтому следует ожидать, что их влияние в этом режиме кипения будет мало.

При дисперсно-кольцевом режиме течения возможны следующие механизмы интенсификации:

- дополнительная турбулизация потока;
- закрутка потока в ячейке;
- дополнительное орошение за счет поперечного потока;
- изменение спектра капель (дробление и срыв с поверхности дистанционирующей решётки);
- образование пленки жидкости на поверхности дистанционирующей решётки и стекание на ТВЭЛ.

Часть из этих предположений была реализована в методике.

Изменение величины влияния дистанционирующих решёток и решётокинтенсификаторов на критический тепловой поток зависит от режимных параметров и примерно пропорционально уклонению критического паросодержания от граничного. Аналогичное воздействие различных типов препятствий на критический тепловой поток отмечено в работе [4].

В методике это учтено в виде дополнительного множителя $\mu_4 = 1 + B \cdot (X_{\rm E} - X_{\rm PP})$. Значение B = 1,8 определялось из предварительных расчетов и в дальнейшем не менялось, $X_{\rm PP}$ – по зависимости [5].

Для того чтобы учесть в методике особенности дистанционирующих решёток и решёток-интенсификаторов, а именно, наличие дефлекторов или элементов, вызывающих закрутку потока теплоносителя предлагается из коэффициента гидравлического сопротивления дистанционирующих решёток или решёток-интенсификаторов выделить соответствующие составляющие и определить их вклад в критический тепловой поток.

Для решеток с вращением потока в ячейке $K\Gamma C_{др} = K\Gamma C_{турб} + K\Gamma C_{вихрь}$.

Для решеток с дефлекторами $K\Gamma C_{др} = K\Gamma C_{турб} + K\Gamma C_{деф} \cdot B_1$.

Для решеток с дефлекторами и с вращением потока в ячейке $K\Gamma C_{др} = K\Gamma C_{тур6} + K\Gamma C_{деф} \cdot B_1 + K\Gamma C_{вихрь}.$

Каждая составляющая $K\Gamma C_{\text{ДР}}$ используется в соответствующих коэффициентах влияния. Составляющие $K\Gamma C_{\text{ДР}}$ определяли следующим образом, например, из экспериментов известны значения $K\Gamma C$ дистанционирующей решётки с дефлекторами и без них, путем вычитания можно получить $K\Gamma C_{\text{деф}}$.

Влияние вихревых структур, образующихся в потоке за решёткой-интенсификатором с закруткой потока в ячейке, учитывается в методике множителем:

$$\mu_2 = \left(1 + A \cdot \exp\left(-A_1 \cdot L_{ups}/D_h\right)\right). \tag{5}$$

Здесь $A_1 = 0.05$ – коэффициент, учитывающий длину воздействия закрутки на величину критического теплового потока, который получен на основании обработки экспериментальных данных, по влиянию интенсификаторов типа закрученная лента на критический тепловой поток.

А – коэффициент, отражающий специфику интенсификатора.

В качестве первого приближения для вида коэффициента A был взят вид аналогичный из вышеприведенной методики:

$$\left(\frac{G}{1000}\right)^{A3}$$
, K_{sp2} , $A = 1.05$, A_{sp} , A_{Re} . (6)

В результате проведенных пробных расчетов были определены оптимальные значения коэффициентов $A_3 = 1,4$:

- для перемешивающих решеток типа скрученной ленты $K_{sp2} = 0.2$;
- для перемешивающих решеток типа прогонки $K_{sp2} = 0.015$;
- для перемешивающих решеток типа «вихрь» $K_{sp2} = 0.02$.

Перечисленные изменения в методике учета влияния различных типов особенности дистанционирующих решёток и решёток-интенсификаторов были внесены в код ВЯЗ-3М и проведены расчеты для отобранных экспериментальных данных.

Для верификации расчетной методики на моделях ТВС с различными типами интенсифицирующих решеток были использованы следующие экспериментальные данные по критическим тепловым потокам:

- с интенсифицирующими решетками «Вихрь»: экспериментальные данные АО «ОКБ Гидропресс», полученные на 7-стержневой сборке (обогреваемая длина 1780 мм) с одной и тремя добавленными решётками-интенсификаторами «вихрь»;
- экспериментальные данные, полученные в ГНЦ РФ ФЭИ на 19-стержневых моделях ТВС с различной расстановкой дистанционирующих решёток и решёток-интенсификаторов сборке с обогреваемой длиной 3730 мм;
- экспериментальные данные, полученные в РНЦ «Курчатовский институт» на 37-стержневой сборке с обогреваемой длиной 2,5 м серия 37СТ-1,3/Вихрь;
- исследования критического теплового потока в моделях ТВС с пластинчатой перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка»;
- экспериментальные данные, полученные в АО «ОКБМ АФРИКАНТОВ» на 19-стержневых моделях ТВС для сборок ТВСА-72, ТВСА-82. Обогреваемая длина сборок составляла 3000 мм;
- исследования критического теплового потока в моделях ТВС с квадратной упаковкой с пластинчатой перемешивающей решеткой с дефлекторами закручивающие поток в ячейке сборки;
- экспериментальные данные полученные, в ГНЦ РФ ФЭИ на моделях ТВС с квадратной упаковкой. Обогреваемая длина сборок составляла 3660 мм. В отличие от модели ТВС-КВ2ПР1 в модели ТВС-КВ5ПР1 было добавлено две «облегченных», без элементов дистанционирования, пластинчатых решетки с дефлекторами, закручивающими поток в ячейке сборки.

В таблице 3 приведены краткие характеристики рассмотренных сборок, количество экспериментальных точек и диапазоны режимных параметров, при которых были проведены исследования. Общее число экспериментальных точек — 804.

На рис. 2 представлено сопоставление результатов расчетов, проведенных по коду «ВЯЗ-3М», с экспериментальными данными в виде относительных отклонениях в процентах в зависимости от паросодержания и массовой скорости в месте кризиса. Из рис. 2 следует, что основной массив точек укладывается в пределах ± 10 %.

В таблице 4 приведены статистические результаты сопоставления расчетных и экспериментальных значений критического теплового потока. Как следует из таблицы 3, все экспериментальные данные полученные на различных сборках с использованием различных дистанционирующих решёток и решёток-интенсификаторов описываются с погрешность близкой к экспериментальной.

Таблица 3. Список рассмотренных моделей сборок и их кратки характеристики

Модель ТВС	Р, МПа	ρ <i>w</i> , τ/м ² ·c	$X_{ m \kappa p}$	<i>L</i> _{об} ,	Кол-во стержней	Тип профилирующей решётки	Кол-во точек			
Эксперименты АО «ОКБМ АФРИКАНТОВ»										
TBCA-72	10–16	1–3	0,2-0,5	3	19	Порядная прогонка	81			
TBCA-82	10–16	1–3	0,2-0,5	3	19	Порядная прогонка	58			
	Эксперименты ГНЦ РФ – ФЭИ									
ТВС-1РИ	9–17	1–5	-0,1-0,3	3,73	19	Вихрь ГП	104			
ТВС-4РИ	10–18	1–5	-0,2-0,3	2	19	Вихрь ГП	41			
TBC-2B2	9–18	1–5	-0,2-0,3	3,68	19	Вихрь ГП	41			
ТВС-КВ2ПР1	10–15,5	1–5	-0,08-0,5	3,66	25	Split	105			
ТВС-КВ5ПР1	10–15,5	1–5	-0,08-0,5	3,66	25	Split	97			
	Экс	сперимен	ты РНЦ «ŀ	Сурчат	овский инст	титут»				
37СТ-1,3/ Вихрь	16	0,8–3,5	0-0,4	2,5	37	Вихрь ГП	88			
Эксперименты АО «ОКБ Гидропресс»										
ГП-1ПР	14–16	2–4	0,1-0,3	1,76	7	Вихрь ГП	93			
ГП-ЗПР	14–16	2–4	0,1-0,3	1,78	7	Вихрь ГП	96			

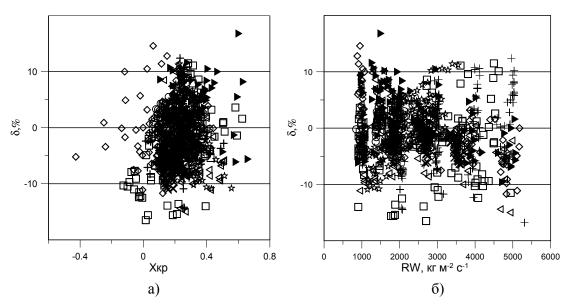


Рис. 2. Относительное отклонение в процентах экспериментальных значений критического теплового потока от расчетных в зависимости от критического паросодержания (а) и массовой скорости (б)

Таблица 4. Статистические результаты сопоставления расчетных и экспериментальных значений критического теплового потока

Код	ВЯЗ-3М-ЕРКІ							
Модель ТВС	Δ, %	σ, %						
Эксперименты АО «ОКБМ АФРИКАНТОВ»								
TBCA-72	-2,85	3,0						
TBCA-82	1,63	5,7						
	Эксперименты ГНЦ РФ – Ф	ИЄФ						
ТВС-1РИ	-2,68	4,12						
ТВС-4РИ	0,23	5,25						
TBC-2B2	-5,3	5,7						
ТВС-КВ2ПР1	2,0	5,5						
ТВС-КВ5ПР1	-0,9	5,29						
Э	ксперименты РНЦ «Курчатовски	й институт»						
37СТ-1,3/Вихрь	1,35	2,03						
Эксперименты АО «ОКБ Гидропресс»								
ГП-1ПР	-2,66	2,29						
ГП-3ПР	-1,39	1,31						

 $[\]Delta$ – среднее отклонение экспериментальных данных от расчетных значений;

4 Исследование возможности интенсификации теплообмена в пучках стержней применительно к реактору ВВЭР-СКД

Режимы «ухудшенного» теплообмена установлены в конце 40-х – в начале 50-х годов в период освоения воды СКД тепловой энергетикой. Последствия – повреждения труб из-за локального перегрева (в том числе из-за отложений). Исследования перечисленных явлений были развернуты с начала 60-х годов после сообщений об авариях парогенераторов на первых ТЭС СКД. Вследствие данного эффекта и недостаточных для эксплуатации прочностных свойств материалов пришлось снизить параметры: давление с 30 до 24 МПа и температуру пара котлотурбинных установок с 580–600 °С до 540 °С. По словам академика Л.А. Мелентьева «...только в 70-е годы достигнут ожидаемый пониженный удельный расхода топлива и, таким образом, достигнута экономическая эффективность внедряемых установок». Гидродинамическая природа данного явления отмечена в работах Курганова В.А., Зейгарника Ю.А. и др. (МЭИ), ранее в работах Шицмана М.Е. (1959–1967 гг.) [6].

Итак, при подъемном течении в обогреваемых вертикальных трубах большого диаметра (десятки мм) и при низких расходах жидкости (числах Рейнольдса) наблюдаются ухудшения, проявляющиеся при постоянном тепловом потоке в виде «входных» пиков температуры стенки. Критическим моментом, с которого начинает остро проявляться специфика СКД, является достижение температурой стенки уровня псевдокритической температуры t_m и переход через него.

Повышение температуры поверхности, которое может возникнуть при ухудшении теплообмена (при q = const), является нежелательным. Поэтому одним из способов избежать ухудшения теплообмена является разрушение «запирающего

σ – суммарная среднеквадратичная погрешность.

слоя» используя закрутку потока, например, с помощью витых ребер на внутренней поверхности трубы.

Действительно, эксперименты с ребристыми трубами, выполненные на электрообогреваемых трубах и на трубах с жидкометаллическим обогревом, наглядно показали существенное уменьшение, а в ряде случаев и полное отсутствие областей ухудшенного теплообмена, как при докритических, так и при сверхкритических параметрах [7].

Для предотвращения прогибов твэлов активных зон и экранов реакторов с жидкометаллическим охлаждением дистанционирование твэлов путем навивки спиральных ребер на оболочки. Распространенными типами оребрения твэлов являются: трехзаходные спиральные ребра, выполненные за одно целое с оболочкой при высоте ребра, равной половине минимального зазора между твэлами, навивка из проволоки, диаметр которой равен минимальному зазору между твэлами [8].

Особенности теплообмена оребренных твэлов с жидкометаллическим охлаждением определяются тем, что, с одной стороны, оребрение может способствовать перемешиванию теплоносителя по сечению кассеты, что улучшает условия теплообмена, с другой стороны, ребра вызывают локальное увеличение температуры оболочек твэлов. Последнее обстоятельство в особенности относится к твэлам с малой эквивалентной теплопроводностью (делящийся материал — двуокись урана, оболочка выполнена из нержавеющей стали, теплоноситель — натрий), определяемой параметром є. Для твэлов активных зон и экранов быстрых реакторов значения параметра є составляют около 0,05—0,3.

Оребрение вызывает местное искажение температурного профиля периферийных элементов кассет реакторов. Местные перегревы накладываются на общую неравномерность температуры. Чем больше число Ре, тем более ярко выраженную форму приобретают искажения. Если температуры под ребрами приходятся на зону максимума температурного профиля, то общая неравномерность увеличивается.

Вследствие «закручивания» потока ребрами происходит смещение максимума температурного профиля. Этот эффект наиболее сильно проявляется для твэлов с проволочной навивкой, когда диаметр проволоки равен зазору между твэлами. В этом случае происходит направленное движение теплоносителя по периметру твэла. Если проволока имеет меньший диаметр, поля температуры симметричны.

Оребрение твэлов вносит определенные особенности в процесс стабилизации полей температуры по длине твэлов: с увеличением числа Пекле длина участка тепловой стабилизации оребренных твэлов уменьшается.

Как известно, поле температур в твэле определяется не только свойствами теплоносителя и распределением скоростей около твэла, но и параметрами твэла (размерами сердечника, оболочки и их теплопроводностью, контактным термическим сопротивлением между ними). Комплекс последних описывается коэффициентом ε_k — параметром приближенного теплового подобия, учет которого важен в тесных пучках стержней [9].

Следует отметить, что использование стержней с различными видами оребрения для быстрых реакторов ограничено пределом допустимых напряжений. Так для труб с соотношением высота ребра/стенка оболочки, достигающем 1,2–1,5, коэффициент концентрации напряжений равен 1,4–1,5 [10].

Оценки параметра ε_k , проведенные для твэлов реактора БН-600 (натрий, $t_{\rm BX} = 380$ °C, $t_{\rm BMX} = 550$ °C) и ВВЭР-СКД (вода, давление P = 25 МПа и температура $t_{\rm BX} = 290$ °C, $t_{\rm BMX} = 540$ °C) при одних размерах, одинаковых материалах топлива и

оболочки показали, что значения различаются в пределах 10 %. Столь малое отличие значений параметра ε_k дает основание для дальнейших разработок по переносу данных по межканальному обмену в пучках стержней, обтекаемых жидким металлом, на течение воды сверхкритических параметров. Необходимо продолжение расчетно-экспериментальных исследований для модельных условий.

Заключение

Обнаружена большая зависимость величины прироста критической мощной сборки, оснащенной только дистанционирующими решетками, от количества и вида расположенных в сборке дополнительных перемешивающих решеток. Однако результаты исследований показывают, что не любое размещение перемешивающих решеток приводит к увеличению критической мощности сборки.

Эффективность перемешивания потока теплоносителя в моделях ТВС определена и при неравномерном распределении тепловыделения по поперечному сечению сборок. Слабое перемешивание потока теплоносителя наблюдалось в сборках с использованием трёх решёток при всех вариантах их расположения по длине сборки. В сборках с четырьмя и пятью решётками интенсивность перемешивания потока уже значительно возросла и находилась примерно на одном и том же уровне.

На основании выполненного анализа экспериментальных данных по влиянию РИ на критический тепловой поток была усовершенствована эмпирическая методика ГНЦ РФ – ФЭИ расчета критического теплового потока. Выявлена и учтена в методике различная степень влияния решёток-интенсификаторов на критический тепловой поток в зависимости от механизма возникновения кризиса теплоотдачи. Рассмотрен раздельный учёт влияния решёток-интенсификаторов на критический тепловой поток за счет турбулизации потока и механизмами, вызванными закруткой потока в ячейке либо воздействием дефлекторов. Это позволит, в дальнейшем, получив эмпирические либо полуэмпирические зависимости для каждой составляющей влияния решёток-интенсификаторов на критический тепловой поток, прогнозировать теплофизические характеристики новых типов ТВС. Усовершенствованная методика позволит в рамках единого подхода обобщить экспериментальные данные, полученные для сборок с различными типами дистанционирующих решёток и решёток-интенсификаторов с погрешностью близкой к экспериментальной.

Наличие проволочной навивки на твэлах способствует интенсификации теплообмена.

Список литературы

- 1. Селиванов Ю.Ф., Пометько Р.С., Волков С.Е. Влияние перемешивающих решеток типа «Вихрь» на критическую мощность ТВС ВВЭР // Научно-технический сборник. «Итоги научно-технической деятельности Института ядерных реакторов и теплофизики за 2013 год». Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2014. С. 302–314.
- 2. *Stosic Z*. On the Role of Spacer Grid on Conditions of Dryout/Rewetting and Local Thermal Hydraulics in Boiling Water Channels // 9th Int. Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics (NURETH-9). San Francisco, California. October 3–8, 1999. Paper No. 329.
- 3. Reddy D.G., Fighetti C.F. Parametric study of CHF data // NP-2609, V. 2: A generalized subchannel CHF correlation for PWR and BWR fuel assemblies. January 1983. 124 p.

- 4. *Pioro I.L., Groeneveld D.C. at al.* Effects of flow obstacles on the critical heat flux in a vertical tube cjjled with upward flow of R-134a // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002. V. 45. P. 4417–4433.
- 5. *Сергеев В.В.* Обобщение данных по кризису кипения при подъемном движении воды в каналах // Теплоэнергетика, 2000. №3. С. 67–69.
- 6. Богословская Г.П., Кириллов П.Л. Интенсификация теплообмена в пучках стержней применительно к реактору ВВЭР-СКД // Конференция «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2014)», 14–17 октября 2014, Обнинск. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2014. С. 474–488.
- 7. Грабежная В.А., Кириллов П.Л. О расчетах теплообмена в трубах и пучках стержней при течении воды сверхкритического давления // Обзор ФЭИ-0297. ЦНИИатоминформ. 2003.
- 8. Жуков А.В., Матюхин Н.М., Сорокин А.П. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: расчетные программы и практическое приложение. М.: Энергоатомиздат. 1991.
- 9. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.* Справочник по теплогидравлическим расчетам. 2-е издание, исправленное и дополненное. М.: Энергоатомиздат. 1990.
- 10. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. // Ф.Г. Решетников, Ю.К. Бибилашвили, И.С. Головнин и др. М.: Энергоатомиздат. 1995.

Информация об авторах

Богословская Галина Павловна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Кириллов Павел Леонидович, д-р техн. наук, проф., советник директора Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: kirillov@ippe.ru

Лощинин Валерий Михайлович, начальник лаборатории

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: lovm@ippe.ru

Пометько Рышард Сидорович, ведущий научный сотрудник

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»

Селиванов Юрий Федорович, ведущий научный сотрудник

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sel@ippe.ru

Смирнов Александр Михайлович, старший научный сотрудник

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, заместитель директора

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

Труфанов Александр Анатольевич, заместитель директора

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, AO «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: tral@ippe.ru

УДК 536.24.08

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ В ГНЦ РФ – ФЭИ*

В. А. Грабежная, Н. С. Грачев, А. С. Михеев

АО «ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»

В работе представлены основные результаты испытаний различных моделей парогенераторов, направленные на обоснование парогенераторов реакторных установок, использующих различные жидкометаллические теплоносители: натрий и эвтектический сплав свинца с висмутом. Работы велись в ГНЦ РФ – ФЭИ на протяжении последних 45 лет на стенде СПРУТ.

В результате проведенных испытаний различных моделей парогенераторов были даны: предложения по условиям эксплуатации (необходимый перегрев пара в испарителе БН-600 для предотвращения выноса влаги; рекомендации по рабочему давлению в испарителе БН-350 с целью исключения неустойчивых режимов); получены уникальные научные данные о термодинамической неравновесности и о теплообмене в закризисной зоне парогенерирующей трубы, обогреваемой натрием; определены границы устойчивых режимов эксплуатации канала Фильда; показано отсутствие опрокидывания циркуляции для одного из возможных вариантов парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300.

Более 60 лет в России (СССР) ведутся исследования, направленные на мирное использование атомной энергии. За это время, несмотря на сложные процессы, про-исходившие в обществе, было пущено более 30 энергоблоков АЭС. В большинстве из них в качестве теплоносителя первого контура используется вода, а реактор работает на тепловых нейтронах. Однако Россия (СССР) является пионером в создании реакторов на быстрых нейтронах, где теплоносителем является жидкий натрий. Это атомные станции БН-350 и БН-600. АЭС с реактором БН-350 в г. Шевченко на полуострове Мангышлак предназначалась для выработки электрической и тепловой энергии, и опреснения морской воды. Реактор пущен в эксплуатацию в 1973 году, выведен из эксплуатации в 1999 году.

Энергетический пуск энергоблока БН-600 был осуществлен 8 апреля 1980 года. 2 октября 1980 года блок был выведен на 90 % уровень мощности. Этот энергоблок работает и сейчас.

Известно, что парогенератор является одним из основных элементов атомной станции. Поэтому для его надежной работы в течение нескольких десятков лет необходимо было выполнить достаточно большой объем работ, как экспериментальных, так и расчетных, направленных на моделирование различных регламентных режимов работы.

Наибольший вклад в части проведения экспериментального обоснования теплогидравлики парогенераторов реакторных установок (РУ) БН-350, БН-600, а также разрабатываемых в настоящее время БРЕСТ-ОД-300, БН-1200 и СВБР-100 внес ГНЦ РФ — ФЭИ, а именно, его теплофизическое отделение, руководителями которо-

^{*} Опубликовано в сборнике докладов на Научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика – 2014)» под общей редакцией А.П. Сорокина, А.А. Труфанова. Технический редактор Г.Ф. Комышная. – г. Обнинск, ГНЦ РФ – ФЭИ, 14–17 октября 2018 г. – Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2014. – С. 63–81.

го в разные годы были В.И. Субботин, П.Л. Кириллов, А.Д. Ефанов, С.Г. Калякин. (Что касается последних двух проектов, основные экспериментальные работы только предстоит выполнить).

Обоснование работоспособности любого парогенератора требует создания объединенного программного комплекса, предназначенного для выполнения расчетов различных возможных режимов работы установки во взаимосвязи с технологическими процессами. Для верификации расчетных кодов необходимо экспериментальное подтверждение используемых в этих кодах различных корреляций. Поэтому проводятся испытания моделей парогенераторов в различных эксплуатационных режимах.

Все экспериментальные работы по изучению температурных режимов различных моделей парогенераторов проводились на стенде СПРУТ (Стенд Проведения Работ Уникальной Тематики), рис. 1, который был создан еще в 1968 году. Поскольку это единственный в мире стенд, на котором можно проводить испытания моделей парогенераторов, обогреваемых различными жидкометаллическими теплоносителями – натрием, сплавом свинца с висмутом, висмутом, – остановимся несколько подробнее на его описании.

Стенд в настоящее время содержит четыре автономных петли, каждая из которых имеет свой теплоноситель, таблица 1. Габариты помещений (высота – 25 м) позволяют устанавливать полномасштабные по высоте модели парогенераторов реакторных установок. Наибольший объем работ был выполнен на моделях парогенераторов, обогреваемых натрием.



Рис. 1. Фото стенда СПРУТ [1]

Прокачка натрия по контуру осуществляется спиральным электромагнитным насосом производительностью до $10~{\rm m}^3/{\rm q}$, рабочая температура натрия на входе в насос $-400~{\rm ^{\circ}C}$. На случай разрыва теплопередающей трубки парогенератора и соединения натрия с водой на контуре имеется система аварийного сброса продуктов реакции. Эта система включает в себя разрывные устройства с мембранами, баксепаратор объемом $200~{\rm nutpob}$, предназначенный для сбора щелочи и других продуктов взаимодействия натрия с водой.

Tuotingu 11 Tupuktephetinku nenbitumbin 07	tire ip y embin		ap or emep are	Prob
Номер модели ПГ	1	2	3	4*
Длина, м	5	8,35	9	5
Внутренний диаметр теплообменной				
трубы, мм	12	11	12	10,75
Толщина стенки трубки, мм	2	2,5	2	1,175
Наружный диаметр корпуса ПГ, мм	38	40	40	40
Толщина стенки корпуса ПГ, мм	3,5	4,5	5	5
Материал теплопередающей трубки	1X2M	1X2M	1X2M	X18H10T
Материал корпуса	X18H10T	X18H10T	X18H10T	X18H10T
Диаметр королька термопар в стенке, мм	0,8	0,8	0,8	1,0
Количество термопар на трубке, шт.	45	35	20	48

Таблица 1. Характеристика испытанных однотрубных моделей парогенераторов

Количество термопар на корпусе, шт.

48

По всей длине моделей располагались термопары, позволяющие отслеживать как распределение температуры натрия по длине, так и температуру теплопередающей стенки (термопары, заделанные в теплопередающую стенку). Температура воды на входе в модели парогенераторов и натрия на входе и выходе из моделей парогенераторов (рис. 2) измерялись термопарами, установленными в чехлах, которые введены внутрь потока.

В процессе испытаний различных моделей парогенераторов были подтверждены проектные параметры пара на выходе из парогенератора, а также получены новые научные данные.

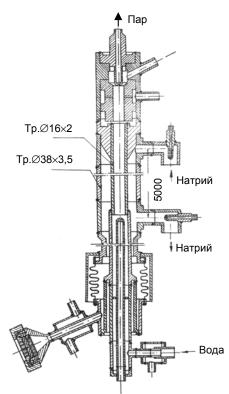


Рис. 2. Конструкция модели парогенератора [3]

^{*} теплопередающая трубка с внутренними винтовыми ребрами. Количество ребер -3; ширина ребра -1 мм; высота ребра -0.9 мм; шаг закрутки -200 мм.

1 Проблемы теплообмена парогенераторов с жидкометаллическими теплоносителями

Кризис теплообмена. Известно, что большая часть опытных данных о кризисе теплообмена в парогенерирующих каналах получена на электрически обогреваемых трубах. Возникает вопрос о правомерности использования таких данных для расчета кризиса теплообмена в трубах, обогреваемых жидким металлом, поскольку:

- в парогенераторах «натрий-вода» реализуется неравномерный закон распределения плотности теплового потока по длине канала;
- при тех же режимах кризис теплоотдачи в парогенераторах может достигаться при температуре стенки более низкой, чем в электрообогреваемых трубах.

Поэтому был проведен анализ экспериментальных данных о кризисе теплообмена, полученных на электрообогреваемых трубах [4, 5] и в трубах, обогреваемых натрием [6]. Несмотря на разброс опытных значений $q_{\kappa p}$, была показана сходимость данных, полученных при разных способах обогрева.

Одним из неприятных факторов, сопровождающих кризис теплообмена, являются пульсации температуры теплопередающей стенки, от которых зависит долговечность парогенерирующей трубы. Переносить данные о пульсациях температуры стенки, полученные на электрообогреваемых трубах, на парогенерирующие трубы с натриевым обогревом неправомерно в силу ряда причин. При электрообогреве температура стенки в случае кризиса спонтанно растет, в то время как при обогреве жидким металлом она ограничена температурой металла. На моделях с электрообогревом трубы невозможно достоверно определить протяженность зоны пульсаций. Из-за возможного пережога трубы кризис стараются получить на выходе модели.

Работы по изучению пульсаций температуры стенки при кризисе теплообмена были проведены совместно с венгерскими специалистами, которые на тот период имели отличную аппаратуру [7]. Эксперименты охватывали широкий диапазон по давлению и массовой скорости: $P = 7.8-13.7~\mathrm{M\Pi a}$, $\rho w = 340-1000~\mathrm{kr/m^2c}$. Для изучения пульсаций температуры на теплопередающей стенке модели парогенератора в двух областях на расстоянии ~1 м от входа и выхода воды (пара) в пазах сечением 1×1 мм были установлены 15 хромель-алюмелевых микротермопар с шагом 10 мм. Спаи термопар располагались в теплопередающей стенке на расстоянии 0,5 мм от обогреваемой стороны.

Спектральный анализ записей пульсаций температуры теплопередающей стенки в зоне кризиса позволил утверждать, что полоса зарегистрированных частот практически ограничена значением 2 Γ ц, рис. 3. В ней не обнаруживается какойлибо преобладающей частоты, т. е. спектр частот пульсаций температуры стенки в зоне кризиса теплообмена носит случайный характер. Кривая спектральной плотности имеет максимум при $f \le 0,1$ Γ ц, что, вероятно, связано с влиянием общеконтурных нестабильностей – возможных колебаний температуры натрия и воды.

Средние квадратичные значения пульсаций температуры стенки практически линейно уменьшаются с ростом массовой скорости. Значения эквивалентных частот для давления P=9,8 и 13,7 МПа составляли 0,3–0,55 Гц, для P=7,9 МПа – 0,95 Гц. Полученные результаты согласуются с данными работы [8], в которой показано, что температурные пульсации, обусловленные кризисом теплообмена, при P=12,9 МПа имеют частоты в диапазоне 0,3–1,0 Гц.

Протяженность зоны с пульсациями температуры стенки сильно зависит от массовой скорости: чем выше массовая скорость, тем меньше область пульсаций.

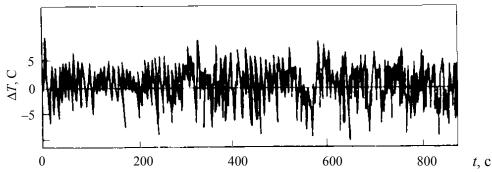


Рис. 3. Статистические характеристики пульсаций температуры при $P = 9.9 \text{ M}\Pi \text{a}$, $\rho w = 500 \text{ кг/м}^2 \text{c}$, $\sigma = 9.3 \text{ K}$ [7]

Теплообмен в закризисной зоне. Теплообмен в закризисной зоне парогенератора установки БН-600 рассчитывался по формуле З.Л. Миропольского [9]. Как оказалось впоследствии, расчет теплообмена по формуле З.Л. Миропольского привел к заметному уменьшению расчетной длины зоны ухудшенного теплообмена по сравнению с величинами, полученными в опытах. На рис. 4 показано сравнение экспериментальных данных по теплообмену в закризисной области, полученных на модели, обогреваемой натрием при давлении в водяном контуре 14 МПа и массовой скорости 700 кг/м²с, с данными, полученными на электрообогреваемых моделях и с расчетом по формуле З.Л. Миропольского, сплошная линия.

Видно существенное отличие экспериментальных данных от расчетной корреляции [9]. Основная причина такого несоответствия заключается в том, что в экспериментах [9] на вход в трубу подавалась пароводяная смесь, образованная дросселированием потока, а наших экспериментах, как и в экспериментах с электрообогревом пароводяная смесь формировалась в самой трубе. Поэтому поток в закризисной зоне был сильно термодинамически неравновесным, особенно в случае электрообогрева.

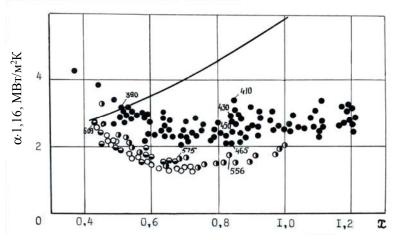


Рис. 4. С равнение коэффициентов теплообмена в закризисной зоне в трубах: $P = 13.7 \text{ M}\Pi \text{a}, \, \rho w = 700 \text{ кг/м}^2 \text{c} \, [10]$

• – обогрев натрием; электрообогрев: $\circ - q\cos(\pi z/l)$, $\bullet - q = \text{const}$, $\Rightarrow - q = \text{var}$

Для изучения термодинамической неравновесности на выходе модели прямоточного парогенератора была установлена необогреваемая труба диаметром 16×2 мм и длиной 1,1 м [10]. На выходе необогреваемой трубки размещалась тонкостенная

гильза для осаждения на ней капель жидкости из потока. На длине 100 мм гильза обогревалась пропусканием электрического тока. К ее внутренней поверхности приваривались четыре термопары. Пройдя описанное устройство, пароводяной поток поступал в смеситель.

Эксперименты были проведены при давлении 13,7 МПа, массовой скорости пароводяного потока 350–700 кг/м²с и относительной энтальпии потока на выходе из парогенератора x=0,8-1,3. При балансных паросодержаниях x<1 температура адиабатной стенки на входе в участок была на 40–70 °C выше температуры насыщения. При балансных паросодержаниях x>1 температура адиабатной стенки была также выше равновесной среднесмешанной температуры, измеренной на выходе из смесителя. Малоинерционные термопары, помещенные в центре потока на расстоянии 150–900 мм от выхода модели парогенератора, показывали температуру насыщения при относительных энтальпиях потока до 0,9–0,95. При более высоких паросодержаниях эти термопары показывали пульсации температуры, амплитуда которых увеличивалась с ростом относительной энтальпии потока и с уменьшением расстояния от выхода модели парогенератора. Максимальная удвоенная амплитуда пульсаций достигала 70–75 °C, а частота – 10–12 Гц. В исследованном диапазоне параметров в потоке перегретого пара находилось от 3 до 14 % влаги. Максимальная относительная погрешность определения истинного паросодержания оценивалась в 25 % [11].

Интенсификация теплообмена. Как показали проведенные исследования, в прямотрубном гладком парогенерирующем канале испарителя наблюдается кризис теплообмена, где могут иметь место значительные колебания температуры теплопередающей стенки, вызывающие усталостные напряжения в металле. Поэтому, интенсифицируя теплообмен, можно либо совсем избавиться от кризиса, разрешив тем самым и проблему усталостных напряжений, либо перевести его в область больших паросодержаний, существенно сократив зону ухудшенного теплообмена.

Одним из способов интенсификации теплообмена является закрутка потока внутренними ребрами. Экспериментальные исследования теплообмена в парогенерирующей трубе с внутренними ребрами были проведены на однотрубной модели, обогреваемой натрием [12]. Основные характеристики модели приведены в таблице 1.

На рис. 5 приведено распределение температур по длине парогенерирующей трубы с оребрением в режиме с кризисом теплообмена.

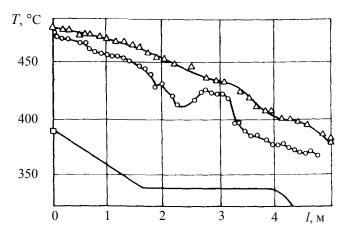


Рис. 5. Распределение температур по длине парогенератора [12]: $\rho w = 500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{c}, \ G_{\text{H}} = 0.65 \text{ кг/c}, \ P = 14.0 \text{ Мпа;}$ температура: Δ – натрия, \circ – стенки, \square – воды

Отличительной особенностью кризиса теплообмена в ребристых трубах в отличие от гладких труб при $q_{\kappa p} > 1,15 \, \mathrm{MBt/m^2}$ является периодическое появление участков улучшенного теплообмена после наступления кризиса, рис. 6. В начале закризисной зоны теплообмена температура внутренней стенки повышается так же, как и в гладкой трубе, затем температура стенки начинает уменьшаться, что связано с улучшением теплообмена. Далее изменение температуры стенки по длине теплопередающей трубки носит волнообразный характер вплоть до x = 1 [12]. На рис. 6 дано сравнение опытных данных по $q_{\kappa p}$ в оребренной трубе, обогреваемой натрием, с данными, полученными на гладкой электрообогреваемой трубе [4]. Видно, что в оребренной трубе $q_{\kappa p}$ при одном и том же паросодержании выше, чем в гладких трубах. Кроме того, кризис второго рода не наблюдался вплоть до x = 0.8.

Эффективность оребрения отчетливо прослеживается при сравнении критических и выходных паросодержаний оребренной и гладкой труб одинаковой длины (l=5 м), таблица 3, [12]. В таблице $x_{\text{кp}}^{\text{ор.}}$ и $x_{\text{кp}}^{\text{глад.}}$ критическое паросодержание в оребренной и гладкой трубе, соответственно.

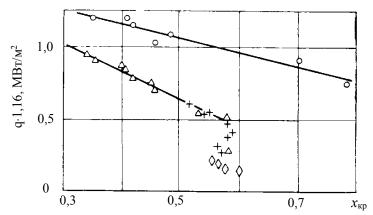


Рис. 6. Сравнение опытных данных по кризису в оребренной и гладкой трубе: $\rho w = 500 \text{ кг/м}^2\text{c}, P = 14,0 \text{ МПа [12]}$ \circ – оребренная трубка, обогрев натрием $l = 5 \text{ м}, d_{\text{вн}} = 12 \text{ мм};$ $\Delta, +, \Diamond$ – электрообогрев, $d_{\text{вн}} = 10,4 \text{ мм}, l = 2, 3 и 6 м, соответственно$

Таблица 3. Влияние оребрения на x_{kp} и $x_{вых}$ [12]

					•						
Номер п/п	ρ <i>w</i> , кг/м ² с	$t_{\rm B}^{\rm BX}$, °C	$G_{ m Na},$ кг/ ${ m c}$	$t_{\mathrm{Na}}^{\mathrm{BX}}$, °C	$t_{ m Na}^{ m \scriptscriptstyle BbIX}$, ${}^{\circ}{ m C}$	$t_{\mathrm{Na}}^{\mathrm{cr}}$, $^{\circ}\mathrm{C}$	$\mathcal{X}_{ ext{kp}}$	$\mathcal{X}_{ ext{BbiX}}$	$\frac{x_{\rm kp}^{\rm ope 6}}{x_{\rm kp}^{\rm r \pi}}$	$\frac{x_{\text{вых}}^{\text{ореб}}}{x_{\text{вых}}^{\text{гл}}}$	<i>P</i> , МПа
1a	506	298 299	0,706	422	345	405	0,69	0,9	1,407	1,265	9,8
16	505	299	0,667	421	338	408	0,97	1,138	_		9,8
2a	701	301	0,714	400	324	397	0,505	0,545	_	1,34	9,8
2б	690	299	0,667	400	324	_	_	0,732	_	_	9,8
3a	352	323	0,717	397	353	387	0,675	0,89	1,37	1,28	13,7
3б	330	320	0,661	400	350	391	0,924	1,137	_	_	13,7
4a	501	319	0,656	426	365	407	0,518	0,804	1,51	1,34	13,7
4б	502	321	0,661	421	363	404	0,784	1,075	_	_	13,7
5a	688	321	0,708	441	367	417	0,443	0,7	_	1,43	13,7
5б	702	321	0,661	440	352	-	_	1,00	_	_	13,7

Были проведены опыты с целью оценки неравновесности пароводяного потока в оребренной трубе, [12]. С помощью термопары, расположенной на расстоянии 170 мм от выхода на модели парогенератора с оребренной трубой при x > 1 влага в перегретом паре не обнаруживалась, тогда, как в случае с гладкой парогенерирующей трубой равновесная температура устанавливалась лишь на расстоянии 1-1,5 м после выхода из модели парогенератора.

Исследования теплообмена на однотрубной модели парогенератора с внутренними ребрами, обогреваемого натрием, показали [12]:

- С увеличением давления и массовой скорости эффективность оребрения возрастает. При давлении 13,7 МПа и массовой скорости 700 кг/м2с (номинальный режим работы парогенерирующей трубки парогенератора БН-600) кризис теплоотдачи вырождается (он не наблюдался до $x_{вых} = 1$).
- Термодинамическая неравновесность пароводяного потока на выходе из трубы с ребрами ниже, чем в случае гладкого парогенерирующего канала.
- Трубы с внутренними винтовыми ребрами позволяют существенно, в ряде случаев почти в два раза, сократить поверхность испарительной части парогенератора. Можно подбором режимных параметров полностью исключить кризис теплообмена в трубе с ребрами.
- В [13] расчетным путем показано, что при номинальных параметрах парогенератора БН-600 использование таких же труб, но с шестизаходными спиральными канавками привело бы к сокращению испарительной части парогенератора на 24,8 %, а пароперегревательной на 31,6 %.

Помимо проведения испытаний моделей парогенератора на стенде СПРУТ сотрудниками лаборатории были проведены работы на самом испарителе.

Распределение температур по корпусу модуля испарителя. Один из модулей испарителя парогенератора был оснащен системой термометрирования. В период освоения мощности энергоблока БН-600 были измерены распределения температуры по высоте корпуса модуля испарителя [14].

Вынос неравновесной влаги из испарителя. Так как пароперегреватели изготовлены из нержавеющей стали аустенитного класса, то недопустимо попадание в них влаги из-за подверженности нержавеющей стали хлоридному растрескиванию под напряжением в пароводяной среде.

Для исследования выноса влаги и доупаривания влаги в перегретом паре на выходе из испарителя и трубопроводах слабо перегретого пара проведены исследования в рабочих режимах работы парогенератора при массовых скоростях пароводяного потока $180-600 \, \text{кг/m}^2 \text{c}$, $P = 9-14 \, \text{МПа}$, перегревах $20-60 \, ^{\circ} \text{C}$ [14]. Измерения температуры и пульсаций показали, что на выходе из трубного пучка испарителя существует неравномерность температур, как по радиусу, так и по окружности трубного пучка: разница в показаниях термопар по сечению трубного пучка достигала $\pm 20 \, ^{\circ} \text{C}$ от среднего значения.

Одной из вероятных причин такого явления может быть неравномерность течения натрия в межтрубном пространстве. Второй причиной является разброс коэффициентов гидравлического сопротивления дросселей, установленных на входе в трубки испарителя. Фактическая разверка расходов по трубкам испарителя не превышает \pm 5% от среднего значения. Амплитуды пульсаций температуры пара на выходе из периферийных трубок больше, чем из центральных трубок [14]. Измерения показали зависимость амплитуды пульсаций температуры пара за испарителем от перегрева пара: увеличение перегрева пара приводит к доупариванию влаги в

парогенерирующей трубе, размеры капель значительно уменьшаются, снижается частота попаданий их на термопару и уменьшаются амплитуды пульсаций. Увеличение массовой скорости приводит к снижению величины пульсаций температуры: при массовой скорости пароводяного потока 520–540 кг/м²с и перегревах 60–70 °С термозонды, установленные в трубопроводе выхода слабо перегретого пара из испарителя, не фиксировали пульсаций температуры пара.

2 Однотрубные модели в обоснование парогенератора энергоблока БН-350

Каналы Фильда. Во всем мире каналы Фильда в парогенераторах АЭС использовались в качестве теплопередающей поверхности только в испарителе АЭС БН-350. На всех других АЭС в испарителях были либо прямые, либо витые трубы.

Конструкция парогенераторов с трубками Фильда обладает рядом достоинств, к числу которых можно отнести отсутствие проблемы компенсации температурных расширений и обеспечение устойчивой естественной циркуляции в широких диапазонах мощности и давления. Несмотря на то, что физпуск реактора БН-350 состоялся в 1972 году, основные экспериментальные работы на модели парогенератора с каналом начались в 1973 году. В ФЭИ, ОКБ Гидропресс велись испытания однотрубных моделей с натриевым обогревом.

Основной задачей проводимых испытаний являлось подтверждение расчетных характеристик испарителя БН-350, а также доказательство отсутствия кризиса теплообмена на теплопередающей поверхности канала Фильда, а именно, в районе донышка и в области сварного соединения донышка с теплопередающей трубкой при всех режимах работы испарителя.

Первая серия испытаний, выполненная в 1973–1974 гг. на однотрубной модели канала Фильда с вынужденной циркуляцией воды, была посвящена исследованию влияния режимных параметров на теплообменные характеристики канала на начальном участке теплосъема [15]. Обогрев канала Фильда производился натрием, который протекал снизу-вверх по кольцевому зазору, образованному корпусной трубой, выполненной из нержавеющей стали марки 1X18Н9Т диаметром 56×4 мм, и наружной трубой канала Фильда, изготовленной из стали марки 1X2М диаметром 32×2 мм. Вода прокачивалась вначале вниз по опускной трубке, выполненной из нержавеющей стали 1X18Н9Т диаметром 16×2 мм, затем поднималась вверх по кольцевому зазору. К теплопередающей трубке приваривалось донышко. Поскольку основная задача проводимых испытаний заключалась в установлении максимальных тепловых потоков в районе донышка и вблизи соединения донышка с теплопередающей трубкой, экспериментальный участок был сделан укороченным длиной 0,63 м. Модель была изготовлена в ФЭИ.

Результаты испытаний модели с вынужденной циркуляцией показали, что при режимных параметрах эксплуатации кризис теплообмена ни на донышке, ни в зоне соединения донышка с теплопередающей трубой не возникал.

Первый период работы реактора в энергетическом режиме БН-350 характеризовался ненадежной работой парогенераторов из-за многочисленных случаев разгерметизации теплопередающей поверхности испарителей, чем обусловлен довольно низкий уровень мощности реактора. С момента пуска по 1975 год произошло восемь течей в испарительных модулях преимущественно в зоне швов приварки донышек каналов к трубкам из стали 1X2M диаметром 32×2 мм. Как показали исследования теплопередающих трубок и анализ аварийных разгерметизаций пароге-

нераторов в различных режимах эксплуатации, причина течей заключалась в низком качестве трубок Фильда, обусловленном недостатками технологии их изготовления. Поэтому было принято решение об испытании новой модели с каналом Фильда, но уже в режиме естественной циркуляции воды, которые были проведены в период 1975–1977 гг.

Данная модель отличалась от первой геометрическими характеристиками канала Фильда. Теплопередающая трубка диаметром 32×2 мм была заменена на трубку диаметром 33×3 мм, опускная трубка диаметром 16×2 мм — на трубку диаметром $16\times1,4$ мм. Расстояние от опускной трубки до донышка было уменьшено на 5 мм и составляло 30 мм. Принципиальная схема модели показана на рис. 7. Конструкция позволяла регулировать зазор между нижней кромкой опускной трубы и донышком в пределах от 5 до 45 мм, а также зазор между стаканом и выточкой в трубной доске от 0 до 15 мм. Первый зазор позволял имитировать неточность изготовления опускных труб штатного испарителя.

На модели имелись акустические датчики, служащие для фиксации неустойчивости естественной циркуляции пароводяного потока. Конструкция модели предусматривала перемещение опускной трубки для определения влияния расстояния от кромки опускной трубки до донышка на теплообменные характеристики.

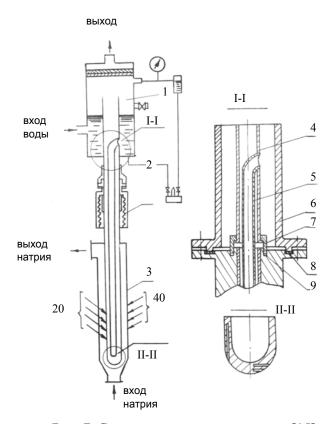


Рис. 7. Схема модели парогенератора [15]:

- 1 сепарационная камера, 2 сильфонный узел, 3 теплообменный участок,
- 4 подъемная трубка, 5 опускная трубка, 6 корпус сепаратора, 7 стакан, 8 прокладка, 9 регулируемый зазор

Испытания проводились при параметрах, соответствующих условиям работы испарительного канала в номинальном и частичных режимах. Часть испытаний была проведена при номинальном расстоянии опускной трубки от донышка (30 мм), часть — при уменьшенном расстоянии (22 мм), уменьшенное расстояние моделировало возможные дефекты сборки испарительного канала.

Типичное распределение температуры адиабатной стенки по длине модели парогенератора приведено на рис. 8.

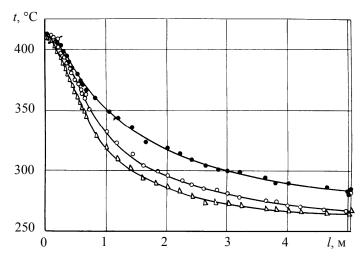


Рис. 8. Распределение температуры адиабатной стенки по длине парогенератора: $P = 6.4 \text{ M}\Pi \text{a}, t_{\text{B}} = 158 \,^{\circ}\text{C} \, [15]; G/G_{\text{Hom}}: \Delta - 1; \circ - 1.33; \bullet - 1.85$

Максимальное значение тепловой нагрузки, которое удалось достичь, составляло 2,3 МВт/м², однако кризиса теплообмена обнаружено не было. Максимальное значение плотности теплового потока на внутренней поверхности теплопередающей стенки в номинальном режиме составило 1,51 МВт/м². Исследование температурного режима нижней части трубки Фильда и донышка показало отсутствие пульсаций температуры на выходе из опускной трубки.

Для номинальных параметров кратность циркуляции составляла величину 2,3–2,7. При кратности циркуляции меньше 1,6 гидродинамические режимы канала всегда были неустойчивыми. Эти режимы характеризовались пульсациями давления пара в сепарационной камере, которые достигали 0,1–0,16 МПа, и пульсациями расхода котловой воды в опускной трубке. Акустические датчики фиксировали характерные шумы, которые отсутствовали в устойчивых режимах работы испарителя. Термопары, находившиеся на теплопередающей стенке со стороны натрия, регистрировали по всей длине модели пульсации температуры, двойная амплитуда которых доходила до 10 °C, в устойчивых режимах эта величина не превышала 3–5 °C. Основными факторами появления пульсационных режимов являлись расход и входная температура натрия.

Испытания с различными конструктивными отклонениями положения опускной трубки в моделях показали следующее:

— Наличие зазора до 15 мм между стаканом и выточкой в трубной доске не приводило к изменению температурного и гидродинамического режимов работы канала Фильда; влияние зазора на границу неустойчивости циркуляции не обнаружено.

- В экспериментах со снижением уровня котловой воды ниже входа в опускную трубку было обнаружено сильное влияние зазора между стаканом и выточкой в трубной доске на температурный режим нижней части канала Фильда. Отмечались пульсации температуры в сварном шве (65–70 °C) и в донышке (90–95 °C), которые отсутствовали при установке стакана без зазора. Возникновение этих пульсаций обусловлено периодическим попаданием в испарительный канал котловой воды, которая находилась в паровой камере между уровнем входа в опускную трубу и трубной доской.
- Влияние зазора между нижней кромкой опускной трубки и внутренней поверхностью донышка на теплогидравлические характеристики, а также на устойчивость работы канала Фильда обнаружено не было.

В зависимости от расхода и температуры натрия на входе в модель были установлены границы пульсационных режимов, рис. 9. Различными значками на рисунке отмечены режимы с разными зазорами между стаканом и выточкой в трубной доске и различной температурой котловой воды. Обнаружено сильное влияние давления на границу появления неустойчивых режимов.

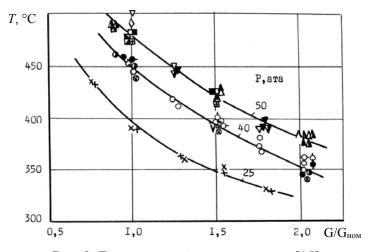


Рис. 9. Границы устойчивых режимов [15]

Проведенные исследования позволили сделать вывод о высокой надежности испарителя с каналами Фильда при его проектном изготовлении и при условии эксплуатации в расчетных режимах.

Исследования каналов Фильда, проведенные в ФЭИ, позволили утверждать следующее:

- 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.

Однотрубная модель испарителя «Надежность». Парогенератор «Надежность» спроектированный и изготовленный в Чехословакии, был предназначен для замены вышедшего из строя парогенератора БН-350 с трубками Фильда. Для экспериментальной проверки работоспособности парогенератора такой конструкции в ФЭИ была установлена однотрубная полномасштабная модель испарителя «Надежность» и контур циркуляции, рис. 10, [16]. Модель выполнена в виде U-образной трубы с обогреваемой длиной 7,03 м.

Исследовалось влияние расхода натрия и его температуры на кратность циркуляции. В зоне гиба труб отмечалась разверка температур на теплопередающей трубке и на корпусе модели, достигавшая 20°C. Разверка температур имела место также и на образующих верхнего плеча модели, где она составляла 5–7°C и уменьшалась к выходу по пару.

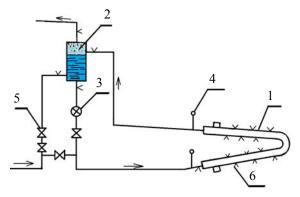


Рис. 10. Схема естественной циркуляции [16]: 1 – модель испарителя; 2 – сепаратор; 3 – расходомер; 4 – датчики давления; 5 – вентили; 6 – термопары

При номинальном значении мощности (133 кВт на одну трубку) кратность циркуляции составляла 4,6. При мощности до 150 % от номинальной режимы работы модели испарителя были устойчивыми. При параметрах: давление – 1,96 МПа, расход натрия -0.77 кг/с, температура натрия на входе в модель -420 °C, расход питательной воды – 0,081 кг/с – был зафиксирован неустойчивый режим, характеризовавшийся пульсациями давления воды (пара) на входе и выходе модели испарителя, температуры и расхода питательной воды. Амплитуда пульсаций давления достигала 0,2 МПа, пульсации расхода воды составляли 5 %. Разверка температур по периметру теплопередающей трубки в области гиба в этом режиме достигала 50-60°C. Кратность циркуляции в пульсационном режиме была около единицы [16]. Опыт эксплуатации парогенераторов БН-350 [17] показал, что трубный пучок из каналов Фильда обеспечивает устойчивую естественную циркуляцию по пароводяной стороне во всем диапазоне эксплуатационных режимов. Сама конструкция трубного пучка из прямых труб Фильда представляется совершенной с точки зрения компенсации температурных расширений как трубного пучка в целом, так и каждой трубки в отдельности. Вертикальный трубный пучок – наилучший, с точки зрения удаления продуктов взаимодействия натрия с водой.

Период с 1976 по 1980 год характеризовался устойчивой и безаварийной работой парогенераторов на всех режимах.

Парогенераторы типа БН-350 рекомендуется рассматривать как один из возможных вариантов для перспективных АЭС с натриевым охлаждением.

После успешных пусков АЭС с РУ БН-350 и БН-600 в начале 80-х годов прошлого века предполагалось разрабатывать проекты АЭС с реакторами на быстрых нейтронах мощностью 800, 1200 и 1600 МВт. Однако авария в Чернобыле сильно подорвала доверие к атомной энергетике. Последующая перестройка и развал Советского Союза тоже негативно отразились на продвижении работ по созданию новых БНов. Только в конце 90-х годов обратились к концепции реакторов на быстрых нейтронах, но не с натриевым, а со свинцовым теплоносителем в первом контуре. НИКИЭТ начал разработку проекта РУ БРЕСТ-ОД-300.

3 Работы по обоснованию проекта парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300

В конце 90-х годов прошлого века НИКИЭТ предложил проект РУ БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем в первом контуре и водой сверхкритических параметров во втором контуре. В проекте РУ был заложен парогенератор с витыми трубами, обогреваемыми тяжелым жидкометаллическим теплоносителем – свинцом, разработчиком которого являлся ОКБ «Гидропресс».

Парогенератор представлял собой бухту теплообменных труб с углом наклона к горизонту в 8°. В реальной конструкции движение греющего теплоносителя опускное, но в модели организовать подобное течение затруднительно. Поэтому для проведения испытаний в обоснование натурного парогенератора в ОКБ «Гидропресс» была разработана модель ПГ с продольным течением теплоносителей, состоящая из двух идентичных трехтрубных секций (модулей). Модель парогенератора по конструктивным характеристикам (высотные отметки, движение сред: винтовое опускное – по свинцу, винтовое подъемное – по воде) максимально приближена к конструкции парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300. Модель была изготовлена на ЗИО (г. Подольск), установлена на стенде СПРУТ.

В силу ряда обстоятельств в середине 2000-х годов работы по теме БРЕСТ на пятилетие были остановлены. И только с 2009 года после принятия ФЦП НТП ЯЭ начались активные работы по продвижению проекта БРЕСТ-ОД-300. Но это был уже иной вариант РУ, отличный от проекта РУ БРЕСТ-ОД-300 конца 90-х годов прошлого столетия. Поскольку изготовление новой модели заняло бы несколько лет, решено было провести испытания на уже имеющейся модели парогенератора, но при режимных параметрах, соответствующих условиям эксплуатации новой РУ БРЕСТ-ОД-300.

Принципиальная программа исследований на модели парогенератора при работе одного модуля, а также при совместной работе двух модулей была направлена на изучение теплообмена и, в большей степени, теплогидравлической устойчивости парогенерирующих труб при параметрах частичных и пусковых режимов.

Данные, которые были получены в процессе испытаний на этой модели парогенератора, будут являться консервативными для нового парогенератора в части теплообмена в закризисной зоне, термодинамической неравновесности пароводяного потока.

3.1 Описание экспериментальной модели

Испытание трехтрубной секции модели парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 проводилось на свинцовом контуре стенде СПРУТ, схема которого с моделью парогенератора показана на рис. 11.

Модель парогенератора, состояла из двух идентичных трехтрубных секций (модулей). В качестве диаметра навивки трехтрубного пучка выбран средний диаметр

навивки теплопередающих трубок натурного парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300, 1600 мм (вариант 2000 г.). Модель включала в себя электрический обогрев, тепловую изоляцию и металлоконструкции, связывающие два модуля.

Корпус модуля парогенератора из трубы диаметром 76×4,5 мм был рассчитан на давление до 2,5 МПа при температуре до 550 °C. Высотные отметки коллекторов (камер) соответствуют натурному парогенератору, материал теплопередающих трубок соответствует материалу натурных парогенерирующих труб, примененных в проекте РУ БРЕСТ-ОД-300 (2000 г.). Каждый модуль состоял из опускного участка, через который прокачивалось до 5 % от общего расхода свинца, и подъемного витого участка, через который прокачивался основной расход свинца. Более подробное описание модели можно найти в [18].

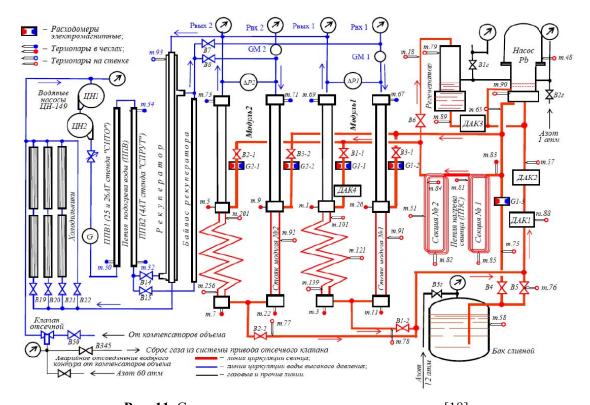


Рис. 11. Схема контура с моделью парогенератора [18]

Экспериментальная модель была хорошо термометрирована. В одном сечении на расстоянии 19 м от входа по свинцу по периметру корпуса модели были размещены четыре термопары для выявления возможных разверок температуры свинца. На расстоянии 13 м от входа воды в витой участок на стенках трех теплопередающих труб было установлено по одной термопаре. На корпусе модуля парогенератора, а также по всему тракту тяжелого теплоносителя были установлены компенсационные нагреватели, которые служили для предотвращения замораживания свинца при различных переходных режимах при испытаниях модуля парогенератора, и тепловая изоляция. При выходе на заданный режим компенсационные нагреватели выключались.

3.2 Испытания одиночного модуля парогенератора

Работа при номинальных параметрах. На первом этапе испытаний была проведена серия опытов с целью подтверждения проектных характеристик парогенератора в различных режимах работы, а также создания банка результатов экспериментов для дальнейшей верификации расчетных кодов, описывающих теплогидравлические процессы, происходящие в парогенерирующей установке. Испытания проводились как в условиях номинального режима работы парогенератора при давлении 18 МПа и при сверхкритических параметрах рабочего тела.

Если сравнивать эпюры температуры корпуса при докритическом давлении с эпюрами, полученными при аналогичных режимных параметрах, но при сверхкритическом давлении можно отметить, что, несмотря на разницу давления, температура пара на выходе из модели слабо зависит от давления и расхода воды и составляет (500-510) °C, рис. 12 и 13, соответственно. Для большинства экспериментов разброс по сходимости теплового баланса не превышал ± 5 %.

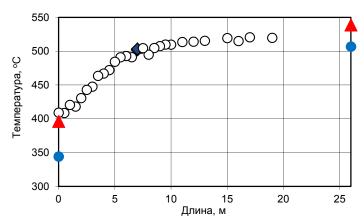


Рис. 12. Распределение температуры адиабатной стенки по длине модели: расход воды $-100 \% G_{\text{ном}}$, $P = 18 \text{ M}\Pi\text{a}$, [18]:

Вход/выход воды/пара;
 Вход/выход свинца;
 По периметру на корпусе;
 На поверхности теплопередающих труб;
 Температура корпуса

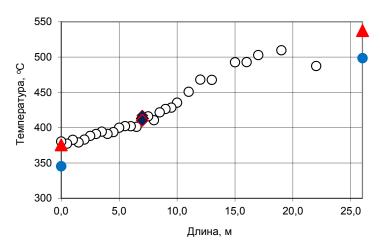


Рис. 13. Распределение температуры адиабатной стенки по длине модели: расход воды $-120 \% G_{\text{ном}}$, $P-25 \text{ M}\Pi \text{a}$, [18]. Обозначения см. на рис. 12

Никаких явлений, связанных с локальным ухудшением теплообмена при сверхкритических параметрах обнаружено не было в силу низкой плотности теплового потока на внутренней поверхности теплопередающей стенки.

Экспериментальные данные, полученные на первом этапе испытаний при изменении расхода воды от 80 до 120 % от номинала, позволили провести отладку и предварительную верификацию расчетного кода НИКИЭТ [19].

Работа на частичных режимах. При работе на частичных режимах мощности температура свинца на входе в змеевик парогенераторного модуля поддерживалась на уровне 540 °C. Поскольку в реальной конструкции профиль скорости свинца в парогенераторе нельзя сделать плоским, испытания проводились и при пониженных мощностях.

С уменьшением расхода воды зона интенсивного теплообмена смещалась влево, т. е. вниз по течению свинца. При этом, начиная с расхода воды 60% от номинала и ниже, отмечалось существенное снижение температуры пара на выходе из модуля. При расходе воды, соответствующем $20\% G_{\text{ном}}$, рис. 14, практически на входе наблюдался кризис теплообмена — температура теплопередающей стенки на входе в змеевик была выше температуры Лейденфроста.

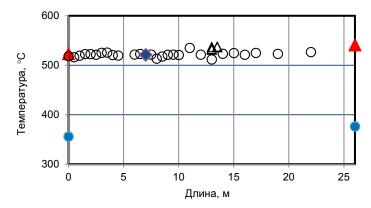


Рис. 14. Распределение температуры адиабатной стенки по длине модели: расход воды $-20 \% G_{\text{ном}}$, [20]. Обозначения см. на рис. 12

Испытаниями установлено, что начиная с расхода воды 40 % от номинала и ниже, корпус змеевика и тем более теплопередающие трубы находились в термонапряженном состоянии — на всей поверхности температура стенки превышала 500 °C, что, разумеется, может сказываться на ресурсе парогенераторных труб.

Пусковые режимы работы парогенератора. При работе на параметрах пусковых режимов температура свинца на входе в змеевик поддерживалась на уровне 420 °C, его расход – около 30 % от номинального. Расход свинца через стояк отсутствовал. Расход питательной воды изменялся от 30 до 4 % от номинального значения.

В режимах с расходом питательной воды 30 % от номинала на большей части змеевика наблюдался конвективный теплообмен и только на последних восьмидевяти метрах – кипение с последующим перегревом пара. Степень перегрева пара невелика, менее 20 °C. Аналогичная картина наблюдалась и при 20 % расходе. С уменьшением расхода воды от 30 до 4 % происходило заметное смещение области с низким теплообменом вниз по ходу воды, рис. 15.

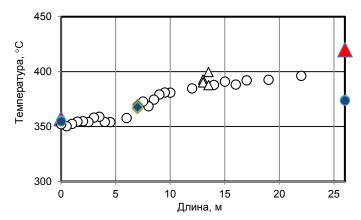


Рис. 15. Распределение температуры адиабатной стенки по длине модели в режиме с расходом воды 4 % от номинала, [20]. Обозначения см. на рис. 12

В процессе испытаний обнаружено сильное влияние давления на характер распределения температуры корпуса. Так, в одном из режимов при увеличении давления в контуре воды всего на 0,7 МПа (температуры насыщения разнятся на три градуса Цельсия) отмечалось существенное, более чем на девять метров, уменьшение протяженности зоны с низкими значениями коэффициентов теплообмена.

Как и при работе на частичных параметрах по расходу воды, в данной серии испытаний не обнаружено колебаний расхода и давления питательной воды, которые говорили бы о нарушении (опрокидывании) циркуляции в водяном контуре, что подтверждается представленной на рис. 16 записью расхода воды на входе в модуль в одном из режимов.

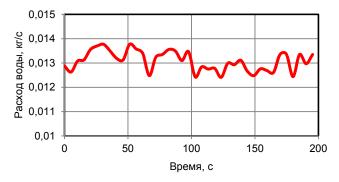


Рис. 16. Запись во времени расхода воды [20]

Итак, проведя испытания одиночного модуля в условиях частичных и переходных режимов, можно отметить, что во всем диапазоне изменения режимных параметров не выявлено пульсационных режимов с опрокидыванием циркуляции во втором контуре. Наблюдаемые колебания расхода питательной воды на входе в модуль парогенератора обусловлены условиями работы модуля и свинцового стенда в целом.

3.3 Испытания при совместной работе двух модулей парогенератора

Цель работы – испытания модели парогенератора при совместной работе двух трехтрубных модулей при параметрах пусковых режимов, направленные на выявление пульсаций во втором контуре, обусловленных параллельной (совместной) работой двух модулей.

Методика проведения испытаний при совместной работе двух модулей практически не отличалась от методики выполнения таких работ на одном модуле, которая подробно изложена в [18].

Совместная работа двух модулей создавала существенные трудности при выполнении данной программы испытаний по сравнению с предыдущими работами, проводимыми на одном модуле. Повышение входной температуры с 340 °C до 350 °C при низких расходах воды (30 % и менее) создавало благоприятные условия для получения на входе пароводяной смеси при незначительных колебаниях режимных параметров — ведь недогрев до температуры насыщения при давлении 18,0 МПа составлял менее 7 °C.

При выполнении намеченной программы работ случаи с появлением кипящей воды на входе то в один модуль, то в другой модуль были нередки. Выход из такого режима требовал больших временных затрат, доходящих иногда до несколько часов. Поэтому в тех случаях, когда не удавалось поддерживать входную температуру воды на уровне 350 °C, испытания проводили при иных температурах, но не ниже 340 °C.

Температурные поля. Первый этап испытаний включал в себя совместную работу двух модулей при номинальном расходе свинца и равных расходах воды через каждый модуль.

Уменьшение расхода воды через модуль приводило, с одной стороны, к росту температуры перегретого пара, а с другой стороны, к уплощению температурной кривой корпуса витого участка. При расходе воды через модуль 15 % и менее отмечалось не увеличение, а снижение температуры пара на выходе из модуля, рис. 17–18. Как видно из рисунков, при расходе воды 15 % профиль температуры корпуса по

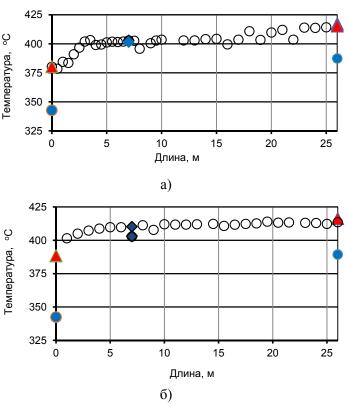


Рис. 17. Распределение температуры по корпусу модуля № 1 (а) и № 2 (б). Расход воды 30 % от номинала, [21]. Обозначения см. на рис. 12

длине витого участка становится почти горизонтальным. Снижение температуры свинца на входе в модуль с 420 до 390 °C приводило к смещению зоны с низким теплообменом ко входу по свинцу и к понижению температуры пара на выходе из парогенераторного модуля.

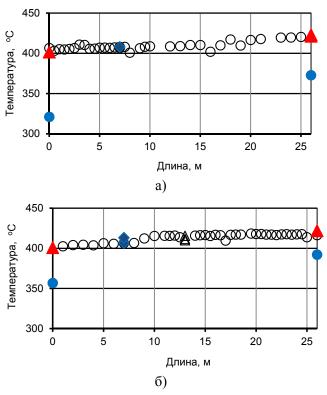


Рис. 18. Распределение температуры по корпусу модуля № 1 (а) и № 2 (б). Расход воды 15 % от номинала [21]. Обозначения см. на рис. 12

Итак, чем ниже температура свинца на входе в змеевик, тем менее термонагружена теплопередающая поверхность. Увеличение расхода воды также снижает температурную нагрузку.

О пульсациях в контуре воды. Как отмечалось выше, при испытаниях одиночного модуля в условиях пусковых режимов не обнаружены пульсационные режимы, влекущие к опрокидыванию циркуляции. Однако перед проведением настоящих опытов в условиях совместной работы двух модулей определенные опасения о возможных пульсационных режимах, способных вызвать при низких параметрах опрокидывание циркуляции, возникали, поскольку рассматривалась работа параллельных каналов при существенно более высоких параметрах свинцового теплоносителя и воды. Если при работе на одиночном модуле температура воды на входе составляла 340 °C, то в рассматриваемых опытах она повысилась до 350 °C. Сильно изменился и расход свинца: с 30 до 100 % от номинала. Однако выполненный цикл работ развеял эти опасения.

Ни в одном из режимов не были замечены какие-либо звуковые явления в контуре, которые могли бы говорить о наличии заметных пульсаций в водяном тракте. Наиболее благоприятными режимами для возникновения пульсаций расхода и давления воды в контуре являются, конечно, режимы, когда температура воды на входе

в модуль соответствует температуре насыщения для заданного давления. На рис. 19 для второго модуля приведена запись во времени расхода воды, давления воды на входе в модуль, а также температуры пара на выходе из модуля в одном из режимов, когда на вход в модуль поступала насыщенная вода.

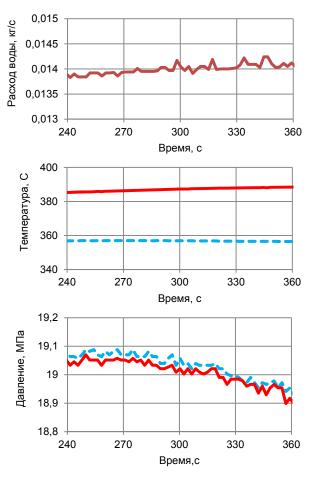


Рис. 19. Запись во времени расхода воды, температуры питательной воды и пара на выходе из модуля, давления на входе/выходе из модуля [21]

Результаты испытаний модели парогенератора показали, что, несмотря на продольное течение теплоносителей, достигается требуемый перегрев пара, заложенный в проект ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300.

Наиболее напряженными по температурным нагрузкам были режимы с частичными расходами воды 40 % и ниже от номинала, когда перепад температуры свинца на витом участке составлял менее 70 °C.

Уменьшение расхода воды через модуль с 30 до 15 % от номинала приводило, к росту температуры перегретого пара и к уплощению температурной кривой корпуса витого участка. При расходе воды через модуль менее 15 % от номинала отмечалось снижение температуры пара на выходе из модуля.

В режимах с высокой входной температурой свинца во всем диапазоне изменения расходов воды на большей поверхности витого участка теплообмен практически отсутствовал. Понижение температуры свинца на входе способствовало со-

кращению зоны с низким теплообменом. Увеличение расхода воды также снижало температурную нагрузку парогенерирующей трубы.

При проведении испытаний в условиях данного свинцового контура стенда СПРУТ неустойчивые режимы работы парогенерирующих труб зафиксированы не были. Полученные в процессе испытаний экспериментальные данные следует использовать для верификации расчетных кодов.

Как уже отмечалось выше, при разработке конструкции модели парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 (вариант 2000 года) поперечное обтекание тяжелым теплоносителем пучка теплообменных труб было заменено продольным омыванием трехтрубного пучка. Поэтому был проведен цикл работ, посвященных исследованию теплообмена при поперечном обтекании тяжелым теплоносителем пучка теплообменных труб, о которых речь пойдет в другом докладе, представленном на этой же конференции.

Заключение

Подводя итоги многолетней работы по исследованию теплообмена на различных моделях парогенераторов, обогреваемых жидким металлом, следует отметить следующее.

ГНЦ РФ – ФЭИ является единственной организацией, располагающей стендом, на котором могут проводиться испытания моделей парогенераторов РУ, использующих различные жидкометаллические теплоносители: натрий, свинец, сплав свинца с висмутом.

В результате проведенных испытаний различных моделей парогенераторов были:

- даны предложения по режимам эксплуатации парогенераторов (необходимый перегрев пара в испарителе БН-600 для предотвращения выноса влаги; рекомендации по рабочему давлению в испарителе БН-350 с целью исключения неустойчивых режимов);
- получены уникальные научные данные о термодинамической неравновесности и о теплообмене в закризисной зоне парогенерирующей трубы, обогреваемой натрием;
 - определены границы устойчивых режимов эксплуатации канала Фильда;
- показано отсутствие опрокидывания циркуляции для одного из возможных вариантов парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300.

Список литературы

- 1. http://ippe.ru/podr/tph/labs/labkaljakin/labkaljakin.htm# Стенды и установки. (Обращение 20.10. 2011).
- 2. Грабежная В.А., Крюков А.Е., Михеев А.С. Работы по теплогидравлике парогенераторов БР. Подготовка стенда «СПРУТ» к проведению исследований // Доклады научно-технической конф. «Теплофизические и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2011)» в 2-х томах. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2013. Т. 1. С. 132–137.
- 3. DNB in sodium-cooled steam generators and heat transfer in post-dryout region / N.S. Grachev, P.L. Kirillov, A.A. Ivashkevich, V.A. Prokhorova, N.M. Turchin // Proceedings of the U.S./USSR Seminar on Development of Sodium-Cooled Fast Breeder Reactor Steam Generator. December, 2-4, 1974, Los Angeles, California, U.S.A. Vol. 1. P. 303–331.

- 4. Зенкевич Б.А., Песков О.Л., Сапанкевич А.П. Кризис теплоотдачи в потоке кипящей воды в трубах // В кн.: Кризис теплообмена при кипении в каналах. Под ред. В.И. Субботина и П.Л. Кириллова. Обнинск: ФЭИ, 1974. С. 72–99.
- 5. Рекомендации по расчету кризиса теплоотдачи при кипении воды в круглых трубах. М.: ИВТАН СССР, 1980. Препринт 1-57.
- 6. *Кириллов П.Л., Грабежная В.А.* О влиянии способа обогрева на критический тепловой поток // Атомная энергия. 1981. Т. 51. Вып. 4(10). С. 225–227.
- 7. Пульсации температуры теплопередающей стенки в модели парогенератора, обогреваемого натрием: Отчет о НИР / И. Хум, И. Моснерова, И. Бица, Н.С. Грачев, П.Л. Кириллов, В.А. Прохорова, Н.М. Турчин / Отчет ГКИАЭ и ЧСКАЭ. № 78-05017. Брно, ЧССР, 1978.
- 8. Characteristics of transition boiling in boiling sodium-heated steam generator tubes / D.M. France, R.D. Carlson, T. Chiang, R. Priemer // Trans. ASME. Ser. C. 1979. Vol. 101. No 2.
- 9. *Миропольский З.Л.* Теплоотдача при пленочном кипении пароводяной смеси в парогенерирующих трубах // Теплоэнергетика. 1963. № 5. С. 49.
- 10. Кириллов П.Л. Проблемы гидродинамики и теплообмена применительно к парогенераторам АЭС с реакторами на быстрых нейтронах // Семинар стран членов СЭВ: «Теплофизика и гидродинамика активной зоны и парогенераторов для быстрых реакторов. 4—7 апреля 1978 г. Марианске Лазне, ЧССР». Марианске Лазне, 1978. Доклад № 22.
- 11. Определение количества влаги в перегретом паре методом измерения истинной температуры пара / Н.С. Грачев, А.А. Ивашкевич, М.Я. Суворов, Р.В. Шумский. Обнинск: ФЭИ, 1975. Препринт ФЭИ-509.
- 12. *Грачев Н.С., Кириллов П.Л., Прохорова В.А.* Экспериментальное исследование теплообмена в парогенерирующей трубе с внутренним оребрением // Теплофизика высоких температур. 1976. Т. XV. № 6. С. 1234—1240.
- 13. *Аладьев И.Т., Рзаев А.И.* Эффективность парогенератора натрий вода из труб со спиральными канавками // Теплоэнергетика. 1987. № 7. С. 44–47.
- 14. Смирнов М.В., Титов В.Ф., Корнеев В.И. и др. Теплофизические исследования прямоточного парогенератора ПГН-200М энергоблока БН-600 // Семинар стран членов СЭВ. «Опыт разработки и эксплуатации парогенераторов быстрых реакторов. Димитровград, 18—21 мая 1982 г.» Сборник докладов. Димитровград: НИИАР, 1982. С. 355—367.
- 15. Исследования локальных и интегральных теплогидравлических характеристик трубки Фильда / Н.С. Грачев, Г.В. Каретников, П.Л. Кириллов, Д.К. Лапкин, В.А. Прохорова, И.Н. Тестов, Н.М. Турчин, В.С. Шабалин // Доклад на семинаре стран СЭВ: «Теплофизика и гидродинамика активной зоны и парогенераторов для быстрых реакторов». 4–7 апреля 1978 г., Марианске Лазне, ЧССР. Марианске Лазне, 1978. Доклад № 38.
- 16. Результаты исследований теплогидравлических характеристик на однотрубной полномасштабной модели испарителя «Надежность» / Н.С. Грачев, Т.В. Егорова, Д.Ю. Кардаш, Н.М. Турчин // Материалы конференции: «Вопросы теплофизики в элементах атомных энергетических установок при двухфазном течении теплоносителя». Ч. 2. Обнинск: Физико-энергетический институт, 1980. С. 50–56.
- 17. Исследование и опыт эксплуатации парогенераторов натрий-вода АЭС с реактором БН-350 / П.Л. Кириллов, В.М. Поплавский, А.А. Самаркин, В.Ф. Титов // Теплоэнергетика. 1982. № 1. С. 7–13.
- 18. *Грабежная В.А., Михеев А.С., Штейн Ю.Ю*. Испытания модели парогенератора БРЕСТ на стенде СПРУТ // Научн.-техн. сб. «Итоги научно-технической деятельно-

- сти Института ядерных реакторов и теплофизики за 2011 год». Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2012. С. 227–235.
- 19. Расчетно-экспериментальное исследование работы модели парогенератора / В.А. Грабежная, А.С. Михеев, Ю.Ю. Штейн, А.А. Семченков // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2013. № 1. С. 101–109.
- 20. Грабежная В.А., Михеев А.С., Крюков А.Е. Испытания модели парогенератора БРЕСТ при работе на частичных и пусковых режимах // Научн.-техн. сб. «Итоги научно-технической деятельности Института ядерных реакторов и теплофизики за 2012 год». Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2013. С. 131–142.
- 21. Некоторые результаты исследования модели витого парогенератора, обогреваемого свинцом / В.А. Грабежная, А.Е. Крюков, А.С. Михеев, Ю.Ю. Штейн // Сб. докладов четвертой конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2013)». 23–27 сентября 2013 г., Обнинск. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2014. Т. 1. С. 139–152.

Информация об авторах

Грабежная Вера Александровна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail:gva@ippe.ru

Грачев Николай Сергеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Михеев Александр Сергеевич, начальник лаборатории

Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: mikheyev@ippe.ru

УДК 536.24.621.039.526

ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛИ ПАРОГЕНЕРАТОРА С ВИТЫМИ ТРУБАМИ, ОБОГРЕВАЕМЫМИ СВИНЦОМ*

В. А. Грабежная, А. С. Михеев, С. Г. Калякин, А. П. Сорокин

Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского (ГНЦ РФ – ФЭИ)

В работе приводятся результаты испытаний модели витого парогенератора, обогреваемой свинцом, с продольным течением теплоносителей, состоящей из двух идентичных трехтрубных модулей. Программа исследований модели парогенератора при работе одного модуля, а также при совместной работе двух модулей была направлена на изучение теплообмена и, в большей степени, теплогидравлической устойчивости парогенерирующих труб, обусловленных параллельной (совместной) работой двух модулей при параметрах частичных и пусковых режимов. При параметрах номинального режима работы температура пара на выходе из модуля соответствовала проектным значениям, несмотря на то, что в данной модели имело место продольное течение теплоносителей. Во всем диапазоне изменения режимных параметров как при работе на частичных параметрах, так и при параметрах пусковых режимов в условиях данного свинцового контура стенда СПРУТ не выявлено пульсационных режимов с опрокидыванием циркуляции во втором контуре. Данные, которые получены в процессе испытаний на этой модели парогенератора, будут являться консервативными в части теплообмена в закризисной зоне, термодинамической неравновесности пароводяного потока для парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300, разрабатываемой в ОАО «НИКИЭТ». Эти данные следует использовать для верификации расчетных кодов.

Концепция развития ядерной энергетики в России предусматривает использование технологии замкнутого ядерного топливного цикла [1], осуществление которого возможно только на базе реакторов на быстрых нейтронах. Одним из вариантов реакторной установки (РУ) на быстрых нейтронах является БРЕСТ-ОД-300, разработка которого ведется в ОАО «НИКИЭТ». В качестве теплоносителя первого контура выбран свинец. В качестве парогенератора (ПГ) принят вариант парогенератора с витыми трубками бухтовой компоновки.

В начале 2000-х годов ОАО «НИКИЭТ» предложил проект РУ БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем в первом контуре и водой сверхкритических параметров во втором контуре. В первоначальном проекте парогенератор представлял собой бухту витых теплообменных труб с углом наклона к горизонту в 8°. В настоящее время данная конструкция ПГ РУ БРЕСТ рассматривается как один из вариантов ПГ, но с большим углом наклона — от 24 до 30° к горизонту и рабочим давлением во втором контуре 18 МПа вместо сверхкритического давления.

Обоснование работоспособности РУ требует создания связанного программного комплекса, предназначенного для выполнения расчетов различных возможных режимов работы установки во взаимосвязи с технологическими процессами. Для верификации расчетных кодов, согласно требованиям к отчетам по верификации программ, эксперименты должны проводиться на установках разного масштаба для доказательства возможности переноса результатов на натурный объект.

Для проведения экспериментальных исследований режимов работы парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 при различных нагрузках в ГНЦ РФ — ФЭИ был создан стенд. Состав стенда обеспечивает структурное подобие моделируемых элементов установки.

^{*} Опубликовано в журнале «Теплоэнергетика». – 2014. – № 11. – С. 9–15.

Модель парогенератора состоит из двух идентичных трехтрубных модулей. В качестве диаметра навивки трехтрубного пучка выбран средний диаметр навивки теплопередающих трубок натурного парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300, 1600 мм (вариант 2000 г.). Модель включает в себя электрический обогрев, тепловую изоляцию и металлоконструкции, связывающие два модуля. Разработчиком модели, ее электрического обогрева, тепловой изоляции и металлоконструкций, связывающих две трехтрубные модели, является ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Корпус модели парогенератора из трубы диаметром 76×4,5 мм рассчитан на давление до 2,5 МПа при температуре до 550 °С. Высотные отметки коллекторов (камер) соответствуют натурному парогенератору. Модель парогенератора по конструктивным характеристикам (высотные отметки, движение среды: опускное – винтовое подъемное) максимально приближена к конструкции парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300. Материал теплопередающих трубок соответствует материалу натурных парогенерирующих труб, примененных в проекте РУ БРЕСТ-ОД-300 (2000 г.). Наружный диаметр теплопередающих труб – 17 мм, толщина стенки теплопередающей трубы – 3,0 мм. Осевой шаг расположения труб – 25 мм. По длине витой трубы было установлено 15 дистанционирующих элементов, расположенных на расстоянии 750 мм друг от друга.

Температура свинца и воды на входе и выходе из модели парогенератора измеряется с помощью термопар, помещенных в поток теплоносителей. В трех сечениях по ходу воды на двух теплопередающих трубках установлены термопары. Одна из этих трубок имеет гидравлическую нетождественность. Для измерения температуры корпуса модель оснащена термопарами, расположенными с переменным шагом: от 2,0 м в нижней части модели до 0,5 м на оставшейся части модели, начиная с 16 м и до конца обогрева. В одном из сечений на расстоянии 19 м от входа по воде по периметру корпуса модели размещены четыре термопары для выявления возможных разверок температуры свинца. Термопары, установленные в потоке, изготовлены из термопарного хромель-алюмелевого кабеля диаметром 0,1 мм и заключены в капилляры диаметром 0,5 мм. Спаи термопар, приваренные к стенке, изготовлены из хромель-алюмелевого кабеля диаметром 0,5 мм.

Оснащение экспериментальной модели термопарами проводилось для испытаний, рассчитанных на сверхкритическое давление воды (проект БРЕСТ-ОД-300 2000 года). Поэтому на корпусе установлено небольшое количество термопар, недостаточное для проведения измерений необходимых для определения средней плотности теплового потока по сечению, что не позволяет определить местоположение начала зоны ухудшенного теплообмена при докритическом давлении.

На корпусе модели парогенератора, а также по всему тракту тяжелого теплоносителя были установлены тепловая изоляция и компенсационные нагреватели, которые служат для предотвращения замораживания свинца при различных переходных режимах во время испытаний модели парогенератора. При выходе на заданный режим компенсационные нагреватели выключались.

Испытания одиночного модуля парогенератора. На первом этапе испытаний была проведена серия опытов с целью подтверждения проектных характеристик парогенератора в различных режимах работы, а также создания банка результатов экспериментов для дальнейшей верификации расчетных кодов, описывающих теплогидравлические процессы, происходящие в парогенерирующей установке. Испытания проводились как в условиях номинального режима работы парогенератора при давлении 18 МПа и при сверхкритических параметрах рабочего тела (первоначальный

вариант РУ БРЕСТ-ОД-300), так и при работе на пониженных расходах воды. Методика проведения опытов подробно изложена в [2].

При неизменных режимных параметрах по свинцовому теплоносителю, соответствующих одному из проектных вариантов номинального режима работы парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300, при постоянном давлении в контуре воды с неизменной ее температурой на входе в модель исследовалось поведение модели при разных расходах воды – от 20 до 120 % от номинального значения (работа на частичных параметрах). Температура воды на входе в модель поддерживалась на уровне 340 °C. Всего проведено 38 опытов, 26 из них на докритическом давлении, остальные – на сверхкритическом давлении.

Экспериментально установлено, что при изменении расхода воды на ± 20 % от номинального значения практически не сказывается на величине перегрева пара. В этих режимах температура пара на выходе всегда была выше 500 °C. В рассматриваемых режимах, исходя из показаний термопар, установленных по периметру корпусной трубы, разверка температуры адиабатной стенки не была обнаружена.

Однако при дальнейшем понижении расхода воды, начиная с 60% от номинала, отмечалось существенное снижение температуры пара на выходе из трехтрубного модуля. На рис. 1-2 представлены распределения температуры адиабатной стенки по длине витой части модуля для двух режимов с разными расходами воды через модуль -80 и 20% от номинального значения.

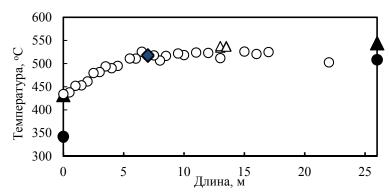


Рис. 1. Распределение температуры адиабатной стенки по длине модели: расход воды $-80~\%~G_{\text{ном}}.$

вход воды/выход пара; ▲ – вход/выход свинца; ◆ – по периметру на корпусе;
 ∆ – на поверхности теплопередающих труб; ○ – температура корпуса

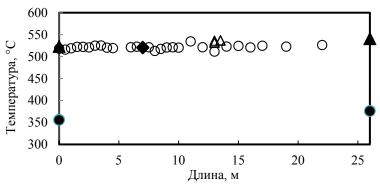


Рис. 2. Распределение температуры адиабатной стенки по длине модели: расход воды $-20\%~G_{\text{ном}}$. Обозначения см. на рис. 1

При расходе воды, соответствующем 20 % $G_{\text{ном}}$, рис. 1, практически на входе наблюдался кризис теплообмена — температура теплопередающей стенки на входе в змеевик была выше температуры Лейденфроста. Профиль температуры свинца по длине модуля стал почти плоским, что говорит о плохом теплосъеме. Несмотря на малый расход воды, температура пара на выходе из змеевика только на ~20 °C превышает температуру насыщения.

Испытаниями установлено, что начиная с расхода воды 40 % от номинала и ниже, корпус змеевика и тем более теплопередающие трубы находятся в термонапряженном состоянии – на всей поверхности температура стенки превышает 500 °C, что, разумеется, может сказаться на ресурсе парогенераторных труб.

Выше речь шла об испытаниях модуля при докритическом давлении в водяном контуре. Переход на сверхкритические параметры приводит к меньшей термической нагрузке парогенерирующих каналов, особенно при повышенных расходах воды. Это четко видно из рис. 3—4, где представлены распределения температуры адиабатной стенки в режимах с расходом воды 120 % номинальной величины и давлением в контуре воды 18 МПа и 25 МПа, соответственно. В дальнейшем, при разработке новых парогенераторов для РУ типа БРЕСТ, по-видимому, стоит рассматривать вариант с водой сверхкритических параметров (СКП) во втором контуре. Дополнительным аргументом в пользу СКП является тот факт, что ухудшение теплообмена при этих давлениях, как известно, носит локальный характер.

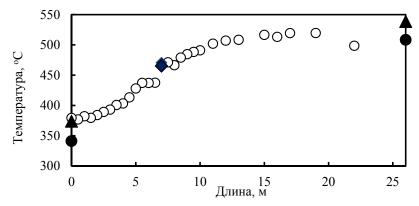


Рис. 3. Распределение температуры адиабатной стенки по длине модели: $P = 18 \text{ M}\Pi \text{a}$, расход воды $-120 \% G_{\text{ном}}$. Обозначения см. на рис. 1

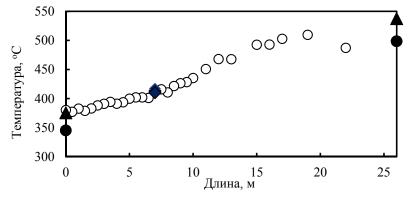


Рис. 4. Распределение температуры адиабатной стенки по длине модели: $P = 25 \text{ M}\Pi \text{a}$, расход воды $-120 \% G_{\text{ном}}$. Обозначения см. на рис. 1

В большинстве режимов проводилась запись показаний всех датчиков в течение продолжительного времени после выхода на заданный режим для установления колебаний режимных параметров и возможного обнаружения пульсаций по водяному тракту, особенно при пониженных расходах воды в контуре. На рис. 5 показана запись расхода воды и температуры пара на выходе из модуля в режиме, соответствующем 20 % номинального расхода воды.

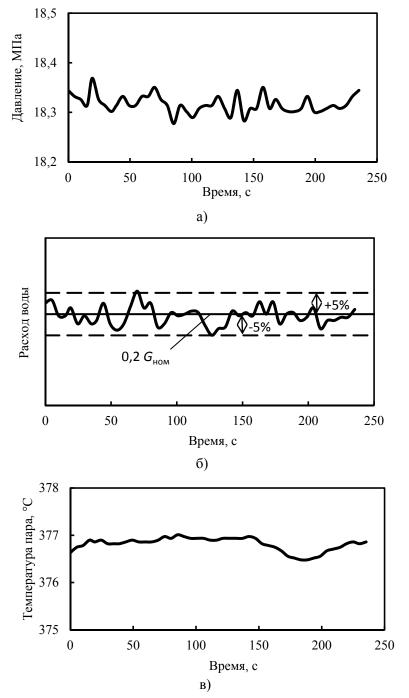


Рис. 5. Запись во времени давления (а) и расхода воды (б) на входе в модель, температуры пара (в) на выходе из модели. Расход воды 20 % от номинала

Величина колебания расхода воды указывает на отсутствие опрокидывания циркуляции в водяном контуре, несмотря на то, что в этих режимах на вход в опускной участок поступала вода повышенной температуры.

Помимо проведения испытаний модуля на частичных параметрах были проведены испытания трехтрубного модуля в пусковых режимах, когда на вход в модуль подавался свинец с начальной температурой 420 °C и пониженным расходом, составляющим 30 % от номинального значения. При этом расход свинца через опускной участок отсутствовал, а расход воды изменялся от 30 до 4 % номинального значения. В процессе испытаний обнаружено сильное влияние давления на характер распределения температуры корпуса. Так, в одном из режимов при увеличении давления в контуре воды всего на 0,7 МПа (температуры насыщения разнятся на три градуса Цельсия) отмечалось существенное, более чем на девять метров, уменьшение протяженности зоны с низкими значениями коэффициентов теплообмена. Установлено также сильное влияние температуры свинца на входе в змеевик на протяженность зоны с низким теплообменом – чем выше температура свинца, тем протяженнее становится эта зона.

Как и при работе на частичных параметрах, в данной серии испытаний не обнаружено колебаний расхода и давления питательной воды, которые говорили бы о нарушении (опрокидывании) циркуляции в водяном контуре.

Испытания при совместной работе двух модулей парогенератора. Цель испытания модели парогенератора при совместной работе двух трехтрубных модулей при параметрах пусковых режимов — выявление пульсаций во втором контуре, которые могут быть вызваны параллельной (совместной) работой двух модулей.

Программа работ состояла из трех этапов. На первом этапе испытаний исследовалась совместная работа двух модулей при номинальном расходе свинца через каждый модуль. На втором этапе испытаний изучались пусковые режимы при разбалансе расхода свинца через модули от 5 до 10 %, но при равных расходах воды. На третьем этапе испытаний моделировались пусковые режимы при разбалансе расхода воды через модули, но при одинаковых расходах свинца.

Совместная работа двух модулей потребовала некоторых технологических изменений в схеме свинцового контура стенда СПРУТ, не относящихся к парогенераторным модулям. Для измерения расходов воды через каждый модуль на их входных линиях были установлены измерительные шайбы в комплекте с вторичным прибором, позволяющие измерять расход в требуемом диапазоне режимных параметров. На втором модуле были установлены датчики давления на входе в модуль, на выходе из модуля, а также размещен датчик перепада давления.

Как уже отмечалось, модель парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 первоначально рассчитывалась на проведение испытаний на воде сверхкритических параметров. Поэтому термопары на подъемном (витом) участке каждого модуля были установлены наиболее часто только в центральной области. При сверхкритических параметрах (СКП) отсутствует понятие закризисного теплообмена. Если при СКП и происходит ухудшение теплообмена, то оно носит локальный характер. При докритических давлениях, как известно, после возникновения кризиса теплообмена следует зона с ухудшенным теплообменом. Для надлежащего измерения температуры по корпусу модулей по всей длине подъемного участка были установлены дополнительные термопары и заменены вышедшие из строя.

Совместная работа двух модулей создавала существенные трудности при выполнении данной программы испытаний по сравнению с предыдущими работами,

проводимыми на одном модуле. Во-первых, в испытаниях были задействованы два модуля. Во-вторых, предстояло провести испытания при иной, более высокой температуре воды на входе в опускной участок. Повышение входной температуры с 340 °C до 350 °C при низких расходах воды (30 % и менее от номинального значения) создавало благоприятные условия для получения на входе пароводяной смеси при незначительных колебаниях режимных параметров, т. к. недогрев до температуры насыщения при давлении 18,0 МПа составлял менее 7 °C.

При выполнении намеченной программы работ случаи с появлением кипящей воды на входе то в один модуль, то в другой модуль были нередки. Выход из такого режима требовал больших временных затрат, доходящих иногда до несколько часов. Поэтому в тех случаях, когда не удавалось поддерживать входную температуру воды на уровне 350 °C, испытания проводили при иных температурах, но не ниже 340 °C.

Первый этап включал в себя проведение испытаний при совместной работе модулей при номинальном расходе свинца и равных расходах воды через каждый модуль, диапазон изменения расхода воды от 30 до 10 % номинальной величины. Температура воды на входе $-350\,^{\circ}$ С. Испытания проводились при двух значениях входной температуры свинца -420 и $390\,^{\circ}$ С.

Уменьшение расхода воды через модуль с 30 до 15 % приводило, с одной стороны, к росту температуры перегретого пара, а с другой стороны, – к уплощению температурной кривой корпуса витого участка. Но при дальнейшем уменьшении расхода воды через модуль отмечалось не увеличение, а снижение температуры пара на выходе из модуля. На рис. 6–7 показаны распределения температуры адиабатной стенки в режимах с расходом воды 30 и 15 % через каждый модуль.

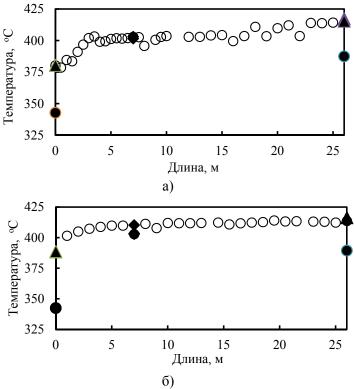


Рис. 6. Распределение температуры по корпусу модуля № 1 (а) и № 2 (б). Расход воды 30 % от номинала. Обозначения см. на рис. 1

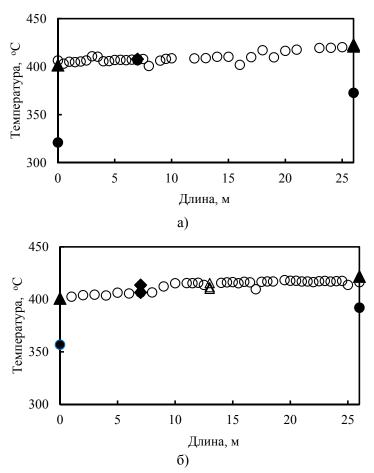


Рис. 7. Распределение температуры по корпусу модуля № 1 (а) и № 2 (б). Расход воды 15 % от номинала. Обозначения см. на рис. 1

Как видно из рисунков, уже при расходе воды 15 % от номинала профиль температуры корпуса по длине витого участка становится почти горизонтальным.

Снижение температуры свинца на входе в модуль с 420 до 390 °C приводило, с одной стороны, к смещению зоны с низким теплообменом ко входу по свинцу, с другой стороны, к понижению температуры пара на выходе из парогенераторного модуля.

Итак, чем ниже температура свинца на входе в змеевик, тем менее термонагружена теплопередающая поверхность. Увеличение расхода воды также снижает температурную нагрузку.

Как отмечалось выше, при испытаниях одиночного модуля в условиях пусковых режимов не обнаружены пульсационные режимы, влекущие к опрокидыванию циркуляции. Однако перед проведением настоящих опытов в условиях совместной работы двух модулей определенные опасения о возможных пульсационных режимах, способных вызвать при низких параметрах опрокидывание циркуляции, возникали, поскольку рассматривалась работа параллельных каналов при существенно более высоких параметрах свинцового теплоносителя и воды. Если при работе на одиночном модуле температура воды на входе составляла 340 °C, то в рассматриваемых опытах она повысилась до 350 °C. Сильно изменился и расход свинца: с 30 до 100 % от номинала. Однако выполненный цикл работ развеял эти опасения.

Ни в одном из режимов не были замечены какие-либо звуковые явления в контуре, которые могли бы говорить о наличии заметных пульсаций в водяном тракте. Наиболее благоприятными режимами для возникновения пульсаций расхода и давления воды в контуре являются, конечно, режимы, когда температура воды на входе в модуль соответствует температуре насыщения для заданного давления. На рис. 8 для второго модуля приведена запись во времени расхода воды, давления воды на входе в модуль, а также температуры пара на выходе из модуля в одном из пусковых режимов, когда на входе в этот модуль поступала насыщенная вода.

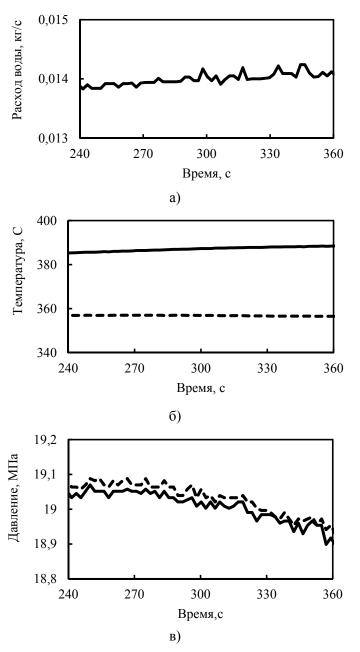


Рис. 8. Запись во времени расхода воды (а), температуры питательной воды на входе в модуль и пара на выходе из модуля (б), давления на входе и выходе из модуля (в)

Выводы

- 1. Впервые проведены испытания модели парогенератора, состоящего из двух трехтрубных модулей с витыми трубами, обогреваемыми свинцом.
- 2. При параметрах номинального режима работы, заложенного в проект парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300, температура пара на выходе из модуля соответствовала проектным значениям, несмотря на то, что в данной модели имело место продольное течение теплоносителей, в отличие от проекта, где заложено поперечное обтекание свинцом бухты витых теплопередающих труб.
- 3. При проведении испытаний в условиях данного свинцового контура стенда СПРУТ неустойчивые режимы работы парогенерирующих труб зафиксированы не были. Во всем диапазоне изменения режимных параметров как при работе на частичных параметрах, так и при параметрах пусковых режимов не выявлено пульсационных режимов с опрокидыванием циркуляции во втором контуре. Наблюдаемые колебания расхода питательной воды на входе в модуль парогенератора обусловлены условиями работы модуля и свинцового стенда в целом.
- 4. Переход на сверхкритические параметры приводит к меньшей термической нагрузке парогенерирующих каналов, особенно при повышенных расходах воды.
- 5. Полученные в процессе испытаний экспериментальные данные следует использовать для верификации расчетных кодов.

Список литературы

- 1. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. / Е.О. Адамов, А.В. Джалавян, А.В. Лопаткин, Н.А. Молоканов, Е.В. Муравьёв, В.В. Орлов, С.Г. Калякин, В.И. Рачков // Атомная энергия. 2012. Вып. 112. № 6. С. 319—330.
- 2. Грабежная В.А., Михеев А.С., Штейн Ю.Ю. Испытания модели парогенератора БРЕСТ на стенде СПРУТ // Научн.-техн. сб. «Итоги научно-технической деятельности Института ядерных реакторов и теплофизики за 2011 год». Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2012. С. 227–235.

Информация об авторах

Грабежная Вера Александровна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: gva@ippe.ru

Калякин Сергей Георгиевич, д-р техн. наук.

Институт ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»

Михеев Александр Сергеевич, начальник лаборатории

Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: mikheyev@ippe.ru

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, заместитель директора

Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

УДК 621.039.54

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННОГО ВОДООХЛАЖДАЕМОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ*

С. Г. Калякин¹, П. Л. Кириллов¹, Ю. Д. Баранаев¹, А. П. Глебов¹, Г. П. Богословская¹, М. П. Никитенко², В. М. Махин², А. Н. Чуркин²

 1 ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, 2 ОКБ «Гидропресс»

На основе краткого обзора состояния атомной энергетики на 01.01.2014 и выполненных разработок водоохлаждаемого реактора на сверхкритическом давлении — ВВЭР СКД обсуждаются перспективы этого проекта. Проект опирается на опыт разработок и эксплуатации ВВЭР, PWR, BWR, PБМК (более 14000 реакторо-лет), многолетний мировой опыт эксплуатации тепловых электростанций, в которых используется пар сверхкритических и супер-сверхкритических параметров. Освещаются преимущества такого реактора и научно-технические проблемы, требующие решения при дальнейшей разработке. Накопленные за последние 10 лет знания позволяют уточнить концепцию и приступить к проектированию экспериментального реактора небольшой мощности.

На 01.02.2014 г. в мире действовало 434 ядерных энергетических реактора, более 70 находились в стадии строительства, многие уже запланированы к сооружению на предстоящие 15 лет, а различные фирмы и организации подготовили долгосрочные предложения о постройке в будущем еще ряд блоков АЭС. Общий опыт эксплуатации ядерных реакторов составляет около 15000 реакторо-лет. Опыт эксплуатации ядерных установок для гражданского и военного флота России (460 реакторов) превышает 6500 реакторо-лет. В ближайшие годы часть функционирующих реакторов выработают свой ресурс и будут остановлены, но, тем не менее, следует ожидать, что через 20 лет количество работающих реакторов может достичь 800–850 [1, 2] (подробные данные проведены в табл. 1). Согласно различным прогнозам в ближайшие 50 лет потребности в электроэнергии в мире увеличатся в 2–3 раза по сравнению с современным уровнем. В России для обеспечения электроснабжения необходимо будет ввести десятки, если не сотню АЭС.

Таблица 1. Ядерные реакторы мира

Ядерные реакторы мира	Количество	Суммарная мощность, ГВт
Действующие	434	374,3
Строящиеся	70	74,9
Запланированные к строительству	173	186,4
Предложенные к рассмотрению на 15-20 лет	310	349,2

Источник: WNA Reactors Database 01.02.2014.

Наиболее зависимыми от атомной энергетики можно считать 13 стран, поскольку ее доля в общем производстве электроэнергии у них превышает 30 % (табл. 2). Наибольшее количество реакторов (84 %) расположено в 11 странах.

_

^{*} Опубликовано в журнале «Теплоэнергетика». – 2014. – № 8. – С. 13–19.

Таблица 2. Страны, наиболее зависимые от производства атомной энергии

	*	<u> </u>
Страны	Доля, %	Количество реакторов
Франция	77,7	58
Бельгия	54	7
Словакия	54	4
Украина	47,2	15
Венгрия	43,2	4
Словения	41,7	1
Швейцария	40,8	5
Швеция	39,6	10
Корея южн.	34,6	23
Армения	33,2	1
Чехия	33,0	6
Болгария	32,6	2
Финляндия	31,6	4

Источник: World Nuclear Power Reactors. http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html

Следует полагать, что закрытие этого источника энергии для них чревато потрясениями в экономике, поэтому очень маловероятно, что они смогут отказаться от нее.

В 2012 г. потребление урана в мире составило 68 тыс. т и в ближайшие 10–15 лет может вырасти до 100 тыс. т в год. Основные потребители урана (в тыс. т): США (20), Франция (9,2), Китай (6,5), Россия (5,5), Япония (5), Республика Корея (4,2), Индия (4).

Оценки показывают, что, если не будут найдены и развиты другие большие источники энергии типа месторождения газа в сланцах, неминуем переход к созданию реакторов с воспроизводством ядерного топлива, т.е. на реакторы с таким спектром нейтронов, который обеспечит значительное уменьшение расходов урана.

В Международной программе Генерация-4 (Gen-IV) обозначены пять типов быстрых ядерных реакторов (см. табл. 3, где их характеристики приведены в алфавитном порядке). Теплоносителями в этих реакторах предполагаются гелий, свинец, расплавы солей, натрий, вода. Из всех этих теплоносителей промышленное использование в атомной энергетике нашли только вода (наработка более 14000 реакторолет) и натрий (наработка около 270 реакторо-лет)*). Наибольшие успехи достигнуты в России (БН-600, БОР-60, БН-350). Разработка реакторов с охлаждением натрием ведется во Франции, Японии, Индии, Китае [7, 11, 12, 18]. Международное сообщество обратилось к созданию быстрых реакторов и МАГАТЭ организовало две международные программы по SFR и SCWR. Другие теплоносители пока не нашли место в ядерной энергетике или их опыт оказался неудачным. Так все демонстрационные и коммерческие реакторы в мире с охлаждением гелием закрыты (США и Германия) или дорабатывают свой ресурс (Великобритания). Опыт использования фторидных солей также не получил распространения, хотя экспериментальный реактор работал [8, 9, 16].

_

^{*)} БОР-60 (1969-н/в), БН-350 (1972-99), БН-600 (1980-н/в), Phenix (1973-2003), Super Phenix (1985-98), DFR (1959-77), PFR (1974-94), EBR-2 (1963-98), FFTF (1980-96), FBTR (1985-н/в), MONJU (1994-2009).

Проект БРЕСТ-300 и других с охлаждением свинцом вызвал острую дискуссию среди специалистов. Опубликовано много работ, выполненных в обоснование проекта, и еще очень многое предстоит сделать [3–5].

Таблица 3. Реакторы на быстрых нейтронах, охлаждаемые разными теплоносителями (G-IV)

Аббре- виатура	Наименова- ние	Теплоноси- тель	Температура, °С	Давление, МПа	Топ- ливо	Мощность эл., МВт эл.
GFR	Gas-cooled fast reactors	гелий	850	7-15 высокое	U^{238}	1200
LFR	Lead-cooled fast reactors	свинец	480–800	~ 2 низкое	U^{238}	20–180 300–1200 600–1000
MSR	Molten salt fast reactors	расплав. фторид соли	700–800	~ 2 низкое	UF	1000
SFR	Sodium- cooled fast reactors	натрий	550	~ 2 низкое	U ²³⁸ и МОХ	300–1500 1000–2000
SCWR	Supercritical water-cooled fast reactors	вода	510–625	25 высокое	UO ₂	300–700 1000–1500

Источник: WNA. http://www.world-nuclear.org/info/inf77.html

Проект водоохлаждаемого ядерного реактора на сверхкритических параметрах **ВВЭР СКД** («Генерация-4») или SCWR по международной классификации опирается на: накопленный опыт эксплуатации ВВЭР, PWR, BWR (более 14000 реакторолет); многолетний мировой опыт эксплуатации тепловых электростанций в которых используется водяной пар сверхкритических параметров (СКП) (25 МПа, 540 °C) и суперсверхкритических (35–37 МПа, 620–700 °C). Это более 400 блоков, которые имеют наработку более 20000 блок-лет. Рассматриваемая концепция одноконтурной ЯЭУ на СКД воды опирается на опыт тепловой энергетики СССР и России (котлы ЗИО, ТКЗ; турбины ЛМЗ, ХТЗ).

Мощн. блока, МВт.эл	300	500	800	1200	Всего
К-во блоков в СНГ	195	16	20	1	= 232
В том числе в России	107	7	14	1	= 129

Создание и введение блоков 300 МВт в эксплуатацию по годам было настолько стремительным, что до сих пор это вызывает искреннее удивление -1963(1), 1965(12), 1970(69), 1975(144).

Концепция ВВЭР-СКД опирается также на разработки ЯЭУ с ядерным перегревом пара, опыт эксплуатации пароперегревательных твэлов на БАЭС (540–560 °C).

В истекшие 1964—1990 гг. и позже к этой задаче приступали Курчатовский институт, ОКБ «Гидропресс», ОКБМ, НИКИЭТ. Однако, эти разработки не получили в то время должного развития. После первого Международного семинара (2000) в ГНЦ РФ — ФЭИ были начаты расчетные работы по физике и теплогидравлике. Результаты обсуждались на межведомственных семинарах и конференциях.

В настоящее время разработки по данной тематике ведутся более чем в 15 странах (Япония, Корея, Канада, Европейское сообщество, Китай и др.) [13, 17, 19, 21]. Реализуется проект Международной программы основных направлений НИОКР в этой области, ход которого регулярно обсуждается на заседаниях рабочих групп МАГАТЭ. В 2011 г. Россия вступила в эту программу Международный форум «Поколение IV» (GIF the Generation-IV International Forum) [13]. Еще ранее ОКБ «Гидропресс», ГНЦ РФ – ФЭИ и РНЦ КИ разработали в 2007 г. основы концепции коммерческого реактора для АЭС 1700 МВт эл. [20, 22].

Десять преимуществ концепции ВВЭР СКД

- **1.** Жесткий (быстро-резонансный) спектр нейтронов, позволяющий достичь высокого коэффициента воспроизводства топлива (около 1), сократить расходы урана, обеспечить использование U²³⁸, выжигание радиоактивных отходов. В качестве топлива можно использовать освоенный диоксид урана, МОХ-топливо или другие виды топлив, которые предполагается использовать в БН-800, 1200.
- **2.** Увеличение коэффициента полезного действия цикла до 44–45 % вместо существующих на АЭС 33–34 % (на современных ТЭС КПД приближается к 50–53 %). Увеличенный КПД приводит не только к экономии топлива, но и улучшает экологическую обстановку около АЭС (сокращаются выбросы тепла, испарение воды в окружающих водоемах).
- **3.** Уменьшение расхода теплоносителя через активную зону, связанное с возможностью увеличения подогрева теплоносителя в активной зоне от 280 до 540 °C, т.е. на 270 °C по сравнению с подогревом в ВВЭР 30–35 °C. Уменьшение расхода позволяет сократить проходные сечения трубопроводов (в 2,5–3 раза), размеры запорно-регулирующей аппаратуры, мощности и размеры главных циркуляционных насосов, снизить затраты энергии на прокачку теплоносителя, уменьшить количество петель (до двух).
- **4.** *Прямоточная схема АЭС* сокращает количество оборудования, позволяет отказаться от парогенераторов оборудования второго контура, компенсаторов давления, насосов второго контура, сепараторов. Установки ВВЭР СКД выгодно отличаются от остальных ЯЭУ размерами капитальных затрат и прогнозируется, что их стоимость на 20–30 % будет ниже стоимости ВВЭР.
- **5.** Обеспечивается применение освоенного серийного оборудования машинного зала, широко используемого в настоящее время в тепловой энергетике (турбины, подогреватели и т.п.).
- **6.** Упрощение систем безопасности по сравнению с действующими ВВЭР. Исключаются (или значительно сокращаются) проблемы водородной безопасности при исключении циркониевых сплавов и использовании оболочек твэлов из нержавеющих сталей или никелевых сплавов, снимается необходимость во многих компонентах этой системы.
- **7.** Значительно уменьшается объем защитной оболочки при той же мощности АЭС, из-за исключения парогенераторов, и другого оборудования, что снижает и затраты, и сроки строительства.
- **8.** Указанные факторы приводят к меньшей металлоемкости РУ ВВЭР-СКД по сравнению с существующими ВВЭР. Подтверждением является анализ такого по-казателя как удельная металлоемкость РУ в т/ МВт (эл). Для БН реакторов этот показатель равен: БН-350 17,7; БН-600 13,0 и БН-800 9,7. Для реакторов ВВЭР-1000

этот показатель равен 3,25, для двухконтурного реактора ВВЭР СКД И – 3,1, для одноконтурного реактора ВВЭР-СКД около 1,4–1,6. Упрощение конструкции и применение отработанных технологических решений позволяет сократить сроки строительства.

- **9.** Сокращение эксплуатационных затраты. Уменьшение количества оборудования, приборов РУ сокращает не только затраты на его проектирование, изготовление, монтаж, но и на ремонт, включая замену в случае необходимости. Меньшее количество оборудования сокращает эксплуатационные затраты.
- **10.** Выбор корпусного реактора ВВЭР СКД связан с 50-летним опытом разработки, изготовления и эксплуатации реакторов ВВЭР в СССР, России, Украине и других странах.

Реализация этих преимуществ зависит от дальнейших систематических научных исследований и технических разработок

Научно-технические проблемы, требующие решения при разработке ВВЭР СКД

Перечень проблем, требующихся для обоснования ВВЭР СКД (сверхкритическое давление) и начала проектирования экспериментального реактора с тепловой мощностью 30 МВт достаточно стандартен и очевиден, как и при разработке реактора любого типа.

Основные задачи физики реактора это: определение приемлемых значений коэффициента воспроизводства топлива (КВ) и выгорания; обеспечение отрицательных коэффициентов реактивности в разных режимах работы реактора. Обеспечение само защищенности реактора.

Проблемы материалов в первую очередь касаются корпуса, топлива, оболочек твэлов. Конструкционные материалы корпуса (стали 12X18H12T, 08X18H12T) испытаны в потоке быстрых нейтронов при разработке и эксплуатации реакторов БР-10, БОР-60, БН-600, 800. Необходим анализ возможных изменений этих материалов в другом спектре нейтронов. Топливо — диоксид урана UO2 широко используется в реакторах разного типа и какие-либо проблемы в случае его использования в экспериментальном ВВЭР СКД-30 пока не просматриваются. Материалы оболочек твэлов предстоит выбрать на основании опыта эксплуатации оболочек твэлов БОР-60, БН-350, 600. Вероятно, это будут хромо-никелевые сплавы (17Cr, 13Ni, 2Mo), для которых требуется провести оценку величины распухания при соответствующих интенсивностях облучения (сна) [10–12].

Основные особенности теплогидравлических процессов в таком реакторе – значительное изменение плотности и теплоемкости воды при сверхкритических параметрах ($T_{\rm K}=374,096$ °C, $P_{\rm K}=22,064$ МПа, $\rho_{\rm K}=322$ кг/м³) (рис. 1). При $P < P_{\rm K}$ и $P > P_{\rm K}$ характер зависимостей коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления хорошо исследован применительно к каналам разной формы.

При околокритических параметрах эти характеристики измерить труднее. В настоящее время неопределенность (погрешность) в расчетах коэффициентов теплоотдачи для каналов простой формы (круглая труба, плоская щель) составляет около \pm 15 %.

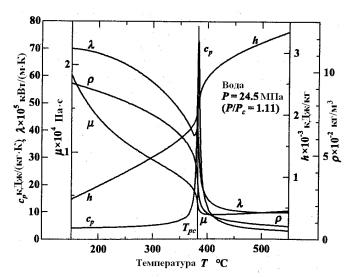


Рис. 1. Изменение свойств воды при сверхкритических параметрах: λ – теплопроводность; ρ – плотность; μ – динамическая вязкость; h – энтальпия; C_p – удельная теплоемкость

Для начального этапа разработок такая неопределенность (точность) достаточна, но необходимо проведение дополнительных экспериментов в каналах простой и сложных форм, в первую очередь на пучках стержней с тесной упаковкой (например, с шагом 1,1–1,15).

Плотности тепловыделения (кВт/л) и характерные линейные нагрузки характеризуются следующими значениями:

Тепловыделение	ВВЭР	ВВЭР СКД
$q_{ u}$, к B т/л	110	~ 110
\overline{q}_l , Вт/см	160–178	160
$(q_l)_{\max}$, BT/CM	448	~ 300

Именно в этих условиях необходимы эксперименты по исследованию теплообмена в тесных пучках стержней с целью создания более совершенных методик расчетов и поиск приемлемых методов интенсификации теплообмена. Появление режима ухудшенного теплообмена, можно ликвидировать закруткой потока, дистанционирующими решетками и т. п.

Предстоит также исследовать процессы перемешивания струй «холодной» $(T < T_{\kappa})$ и «горячей воды» $(T > T_{\kappa})$ с целью выявления неустойчивых режимов, которых неприятны, но пока в проведенных экспериментах не проявляются.

Особенности водно-химического режима (ВХР) при СКД в котлах на ТЭС хорошо отработаны. Специфика применения воды околокритических параметров в ядерных реакторах связана с воздействием радиационного излучения и возникающего радиолиза воды, что имеет место в реакторах типа ВВЭР, ВWR, РБМК.

Предстоит оценить и экспериментально исследовать это явление в другом, более жестком, спектре нейтронов, включая массоперенос продуктов коррозии и радионуклидов. Исследования коррозии материалов, намеченных к применению в ВВЭР СКД, должны быть выполнены как в статических условиях, так и в потоках воды в поле реакторного излучения, т. е. в реакторных петлях.

Проблемы создания систем безопасности реактора ВВЭР СКД аналогичны тем, что решены при разработке ВВЭР-1000 (активные и пассивные системы). Особенностью как экспериментального реактора ВВЭР СКД-30, так и дальнейших проектов с СКД, может быть создание организации естественной циркуляции в контуре реактора с помощью специальных устройств или отдельных каналов для отвода тепла.

Проверка научно-технических решений по конструкции ВВЭР СКД должна быть проведена на моделях, а отдельные конструкция узлов испытаны в натуральную величину. Предстоит разработка и верификация программных средств, включая коды улучшенной оценки, для связанных расчетов нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик ВВЭР СКД, которые будут учитывать сложный характер изменения свойств теплоносителя в пределах рабочих температур ($T_{\text{вх}} = 350 \, ^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{вых}} = 550 \, ^{\circ}\text{C}$).

Опыт создания реакторов на быстрых нейтронах в России показывает, что следует начинать с разработки экспериментального реактора небольшой мощности (~30 МВт), например, ВВЭР СКД-30. Именно на такой установке можно проверить основные технические решения, отработать необходимые режимы и найти решения возникающих проблем. Как показывает время, игнорирование опыта предварительного (перед демонстрационным) создания экспериментальных реакторов малой мощности (таких как БН-10, БОР-60, EBR-2 и т. п.) приводит к многолетним затратам без получения существенных результатов для создания коммерческого блока [7, 10, 14, 18].

Предварительный анализ разработок ВВЭР СКД

Этот анализ выполнен в МАГАТЭ на основании методологии ИНПРО* [6, 10, 15]. Процедура оценки ИНПРО предлагает возможность сравнения различных типов ЯЭУ (или различных конструкций её узлов) с целью определить, оптимальную систему или выявить её сильные и слабые стороны с точки зрения конкурентоспособности и установить конкретные цели для разработчиков.

На настоящем этапе применение данной методологии в полном объеме затруднительно, так как разработка этой методологии пока еще не завершена и отсутствуют многие данные по разрабатываемым установкам. Вместе с тем, отдельные количественные и качественные оценки уже можно сделать.

Определение возможностей ЯЭУ. В разработанной концепции достаточно детально рассмотрены проблемы АЭС с ВВЭР СКД и сделан вывод о широких возможностях их развития: повышение КПД по сравнению с ВВЭР, PWR и BWR; применение отработанных технологий и, как следствие, значительное сокращение сроков создания и строительства; возможность применения различных видов топлива, что может быть особенно важно в переходный период к использованию освоенного МОХ-топлива, так как позволяет примерно в два и более раз сократить потребление природного урана. Кроме того, применение в ВВЭР СКД жесткого спектра нейтронов привлекательно с позиций обеспечения КВ=1. Это позволяет «смягчить» требование по высокому темпу ввода БН-реакторов.

Методология оценки инновационных ядерных реакторов и топливных циклов изложена в Техническом отчете МАГАТЭ IAEA-TECDOC-1434.

 $^{^{*)}}$ Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам был создан по инициативе Президента РФ В.В. Путина в сентябре 2000 г.

Суждение о зрелости ЯЭУ. Пока недостаточность проработок конструкций и неполнота сведений приводит, согласно методологии ИНПРО, к риску. Вместе с тем, проведение таких исследований, как реакторные испытания твэлов в условиях СКД позволят сделать конкретные выводы по перспективности данного направления. Степень неопределенности относится к умеренной. Это заключение можно сделать на основе уже имеющихся исследований и большого опыта эксплуатации котлотурбинных установок ТЭС, одноконтурных реакторных установок: БАЭС − блоки № 1 и 2, РБМК, ВК-50 и ВWR. Перспективными дальнейшими этапами работ могут быть реакторные и стендовые испытания для обоснования выбора конструкций твэла, верификации расчетных методик, предваряющих создание экспериментальной установки.

Доступность стоимости энергии для потребителя. Этот принцип будет выполнен, так как прогнозы по применению атомной энергетики являются оптимистическими и показатель будет близок к существующему для реакторов PWR, BWR и BBЭР.

Допустимость по объему инвестиций. Установки ВВЭР СКД выгодно отличаются от остальных ЯЭУ капитальными затратами (примерно в 1,5–2 раза в сравнении с БН-реакторами и прогнозируется, что их стоимость на 20–30 % будет ниже стоимости ВВЭР).

Риск инвестиций. Критериями по данному требованию являются сроки лицензирования, строительства, устойчивость политической обстановки. Они могут быть получены в дальнейшем для конкретной страны. Можно прогнозировать, что какиелибо особенности для данной установки вряд ли возникнут. По конструкции первого контура, по исполнению защитной оболочки (3O) и по размещению турбины (вне 3O) одноконтурная установка подобна установкам с ВВЭР, которые во многих странах уже сооружается и лицензированы (ВВЭР, PWR, BWR).

Требования по надежности и безопасности включают (по данным зарубежных публикаций):

- Проектный срок 60 лет; достаточно высокий КИУМ, хорошая управляемость в диапазоне 100–50–100 %; топливный цикл до 24 месяцев. Пока данные для оценки выполнимости этих требований отсутствуют.
- Оценки чувствительности к нарушениям, когда требуется подключение систем безопасности, также пока отсутствуют. Они будут получены после выполнения технического проекта.
- Частота повреждений активной зоны оценивается ниже 10^{-5} на реакторо-год, а суммарная частота крупного выброса в результате повреждения активной зоны реактора ниже 10^{-6} на реакторо-год. В проектах аналогов усовершенствованных BWR эти требования выполняются. Оценка применительно к ВВЭР-СКД будет получена в дальнейших разработках.
- Автоматизация процессов (снижение вероятности совершения оператором ошибки) и конструктивные средства для управления тяжелыми авариями – эти требования должны быть выполнены на стадии проекта. Кроме того, следует рассмотреть требования по более низким целевым значениям выбросов применительно к разным странам.
- «Инновационная конструкция должна включать эшелонированную защиту, как часть фундаментального подхода к безопасности, и обеспечивать такие уровни эшелонированной защиты, которые будут более независимы, чем в существующих установках». Этот базовый принцип будет выполнен. Перспективно применение керметного топлива, матрица которого может сыграть роль дополнительного защитного барьера, «независимого» от других.

Заключение

Изложенное выше позволяет заключить что, рассматриваемый проект наиболее привлекателен с позиций базового принципа для инфраструктуры – адаптации АЭС без чрезмерных инвестиций [13, 21, 22].

Это обусловлено применением наиболее распространенного теплоносителя – воды; использованием решений общих с котлотурбинными установками ТЭС (турбин, теплообменного оборудования, опыта эксплуатации), меньшими экономическими затратами, чем другие инновационные концепции. Реакторы ВВЭР-СКД, согласно методологии ИНПРО, являются привлекательными. В полной мере методологию ИНПРО на данном этапе применить не удается, так как пока еще недостаточно сведений для полного анализа, но сравнительный анализ по ряду критериев SCWR, SFR, LFR уже вполне возможен, несмотря на разные уровни знаний их характеристик, и предстоящих исследований технических проблем.

Анализ зарубежных исследований по ВВЭР СКД свидетельствует об их системности, согласованности, и что особенно важно о заблаговременной подготовке кадров. Зарубежные институты проводят совместно с МАГАТЭ специальные курсы по конструкции и технологии SCWR. Цель этих курсов – подготовка преподавателей для будущих специалистов по этой тематике в атомной энергетике.

Для уже работающих специалистов по данному направлению ядерной техники проводятся Международные симпозиумы, на которых обсуждаются практические вопросы по концепции SCWR и освещаются последние достижения отдельных коллективов в областях: реакторной физики; материалов, химии воды и коррозии; теплогидравлики; безопасности; тепловые схемы АЭС, проблемные вопросы и методы их решения.

Отсутствие в России в течение длительного времени утвержденной программы по ВВЭР СКД создает угрозу потери приоритета России, которая была первой в развитии программы создания блоков СКД (1960–1975 гг. см. ранее). Сохранение такого состояния в течение еще 2–3-х лет может привести к тому, что Россия безнадежно отстанет в освоении технологии водоохлаждаемых реакторов при СКД (SCWR).

Накопленные за последние годы лет знания позволяют уточнить разработанную ранее концепцию, наметить план первоочередных исследований, составить техническое задание и приступить к проектированию экспериментального реактора небольшой мощности 30 МВт тепл. – ВВЭР СКД-30.

Успехи, демонстрируемые Нидерландами, Швейцарией, Швецией, Кореей, Японией, доказывают, что достижения в технике зависят не только от количества средств, вкладываемых в развитие исследований и разработок, сколько от рационального выбора направлений [23].

Список литературы

- 1. WNA Reactor Database 01.01.2013.
- 2. The Future of the Nuclear Fuel Cycle. Massachusetts Institute of Technology. 2011.
- 3. Алексеев П.Н., Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю. и др. О стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г. // Атомная энергия. 2011. Т. 111. Вып. 4. С. 183–196. См. также книгу с тем же названием М.: Изд-во НИЦ Курчатовский институт. 2012.
- 4. Драгунов Ю.Г., Мелихов В.В., Смирнов В.С., Чернецов Н.Г. Технические решения и этапы разработки РУ БРЕСТ-ОД-300 // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 1. С. 58-64.

- 5. Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин Д.В. и др. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России до 2100 г. // Атомная энергия. 2012. Т. 112. Вып. 6. С. 319–331.
- 6. Введение в использование методологии ИНПРО для оценки ядерноэнергетических систем. – Изд-во МАГАТЭ. № NP-T-1.12. – Вена. 2011.
- 7. Эл. текст на рус. яз. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1478R web.pdf См. также IAEA-TECDOC-1434.
- 8. *Takeda T., Shimazu Y.* Reviev of Safety Improvement on Sodium-cooled Fast Reactors after Fukushima Accident. Natural Science. V. 4. Special ISSUE. 2012. Pp. 921–935.
- 9. *Mc Pherson H.* The Molten Salt Reactor Adventure. Nucl. Sci. Eng. 1985. V. 90. No 4. Pp. 374–380.
- 10. Proc. International Conference GLOBAL-2011. Toward and Over the Fukushima Daiichi Accident. Japan. Makuhari. 2011.
- 11. Beaty R.L., Gowin P.J., Phillips J.R., Ocenic E.L. The International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). Paper on European Nuclear Conference (ENC 2012). Manchester. UK. 9-12 December. 2012.
- 12. Le Coz P. et al. Sodium-cooled Fast Reactor the ASTRID Plant Project. Proc. ICAPP 2011. Nice. France. 2-5 May. 2011.
- 13. *Beils S. et al.* Safety Approach and R&D Program for Future French Sodium-cooled Reactors. Jour. Nucl. Sci. and Techn. 2011. V. 48. No 4.
- 14. *Schulenberg T.* Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR). Report on the Working Group IAEA on SCWR Programme. Mississauga. Toronto. Canada. 19–23 September. 2011.
- 15. Bychkov A. Fast Reactors and Closed Fuel Cycle: Safety Technologies and Sustainability. Proc. of IAEA IAEA Int. Workshop on Prevention and Mitigation of Severe Accidents in Sodium-cooled Fast Reactors. Japan. Tsuruga. 11–13 June. 2012. (Cit. by [7]).
- 16. ИНПРО: Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам. http://www.atomic-energy.ru/articles/2012/08/22/35443.
- 17. Ingersoll D.T. Status of Physics and Safety Analyses for the Liquid-salt-cooled, Very High Temperature Reactor (LS VHTR). ORNL/TM 2005/218 (Dec. 2005). (Cit. by [7]).
- 18. *Corradini M.* Supercritical Flow and Heat Transfer in Advanced Reactor. Nucl. Tech. 2013. V. 181. No 1. Pp. 2–10.
- 19. Aoto K., Uto N., Sakamoto Y. et al. Design Study and R&D Progress on Japan Sodium-cooled Fast Reactor. Jour. Nucl. Sci. and Techn. 2011. V. 48. Pp. 463–471.
- 20. *Duffey R.B., Pioro I., Zhou X. et al.* Supercritical Water-cooled Nuclear Reactors Current and Future Concepts. Proc. ICONE-16, paper 48869. USA. Orlando. 11–15 May. 2008.
- 21. Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б., Никитенко М.П. и др. Водоохлаждаемые реакторы со сверхкритическими параметрами (ВВЭР-СКД) перспективные реакторы 4-го поколения // Доклад на 8-й конференции по реакторному материаловедению. НИИАР. Димитровград. 2007.
- 22. Starfinger J., Shulenberg T., Marsault P. et al. European Research Activities within the Project: "High Performance Light Water Reactor Phase 2". Proc. ICAPP-07, paper 7146. Nice. France. 13–18 May. 2007. См. также работу этих авторов "High Performance Light Water Reactor-design and Analyses". KIT Scientific Publishing. 2012.
- 23. Ryzhov S.B., Mohov V.A., Nikitenko M.P. et al. Concept of a Single-circuit RP with Vessel Type SCWR. Report on 8-th Int. Symposium (ISSCWR+5). Paper PO76. Vancouver. Canada. 13–16 March. 2011.
 - 24. Бюллетень МАГАТЭ. 2000. Т. 42. № 2.

Информация об авторах

Калякин Сергей Георгиевич, д-р техн. наук

Институт ядерных реакторов и теплофизики АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»

Кириллов Павел Леонидович, д-р техн. наук, проф., советник директора,

Институт ядерных реакторов и теплофизики АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: kirillov@ippe.ru

Баранаев Юрий Дмитриевич, начальник лаборатории,

Отделение ядерных реакторов и топливного цикла АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: baranaev@ippe.ru

Глебов Александр Платонович, ведущий научный сотрудник,

Отделение ядерных реакторов и топливного цикла АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: glebov@ippe.ru

Богословская Галина Павловна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

Отделение безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»

Никитенко Михаил Петрович, начальник отдела АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»,

142103, г. Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, 21

Махин Валентин Михайлович, д-р техн. наук, главный специалист АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»,

142103, г. Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, 21, e-mail: makhin@grpress.podolsk.ru

Чуркин Андрей Николаевич, канд. техн. наук, начальник отдела АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»,

142103, г. Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, 21,

e-mail: churkin@grpress.podolsk.ru

УДК 621.039.534

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, РАЗВИВАЕМЫЕ В ГНЦ РФ – ФЭИ*

В. И. Рачков, П. Н. Мартынов, Р. Ш. Асхадуллин, В. В. Григоров, Н. И. Логинов, В. П. Мельников, А. С. Михеев, А. Г. Портяной, Е. Н. Сердунь, А. П. Сорокин, А. Н. Стороженко, В. В. Ульянов, И. В. Ягодкин

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

Изложены результаты выполненных в ГНЦ РФ - ФЭИ исследований и разработок с использованием тяжелых жидкометаллических теплоносителей (свинца, эвтектического сплава 44,5% Рb - 55,5% Вi, галлия) в области прямоконтактных жидкометаллических технологий получения водяного пара, пресной воды, сингаза и водорода, жидкометаллической технологии синтеза наноструктурных оксидов и аэрогелей, технологии плазмохимического синтеза полифункциональных наноструктурных покрытий (мембран) на пористых подложках фильтрующих элементов для очистки питьевой воды, переработки технических жидкостей на АЭС и предприятиях атомной промышленности (очистка воды от радионуклидов), в химических производствах (очистка промышленных стоков), гальванических производствах (очистка и частичное восстановление электролитов), в горнодобывающей промышленности при выделении из растворов ценных примесей (золото, никель, серебро и др.), металлургической промышленности для чистки оборотной воды от механических примесей. Изложены результаты разработок в области жидкометаллических тепловых труб, в том числе, для создания химического реактора для конверсии исходного углеводородного сырья в смесь ароматических углеводородов, исследований научнотехнических основ энерготехнологии лиофобных капиллярно-пористых систем и разработки устройств с их использованием (аккумуляторы и преобразователи энергии, компенсаторы давления жидкости, демпферы, пассивные защитные устройства для тепловой, космической и атомной энергетики). Представлено описание разработанных систем контроля кислорода и водорода в газовых и жидких средах, в том числе, для раннего обнаружения и контроля горючих и взрывоопасных газов.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (далее ГНЦ РФ — ФЭИ) создан в соответствии с постановлением СНК СССР от 19.12.45 №3117-937сс как Лаборатория «В». Неоценимый вклад в развитие института внесли академик АН УССР А.И. Лейпунский, член-

корреспондент АН СССР Д.И. Блохинцев и многие другие известные в стране и за рубежом ученые и специалисты. В 1951 г. Лаборатории «В» было поручено сооружение в Обнинске атомной электростанции, создание которой впервые продемонстрировало возможность мирного использования атомной энергии. Первая в мире АЭС была введена в эксплуатацию в ФЭИ 27 июня 1954 г. (рис. 1).



Рис. 1. Первая в мире АЭС

^{*} Опубликовано в журнале «Известия вузов. Ядерная энергетика». – 2014. – № 1. – С. 16–38.

В 2002 г. после 48 лет безаварийной работы реактор первой в мире атомной электростанции был остановлен. Первенец ядерной энергетики доказал полную безопасность нахождения АЭС в самой густонаселенной части России. Первая АЭС была той экспериментальной базой, на которой отрабатывались модели атомных станций новых поколений, а теперь она стала полигоном для разработки технологий вывода других АЭС из эксплуатации.

В настоящее время ГНЦ РФ – ФЭИ является многопрофильной научной организацией, ведущей комплексные исследования физико-технических проблем ядерной энергетики, в том числе инновационные разработки для атомной промышленности и гражданского назначения. Центр состоит из 5 институтов, насчитывающих 70 лабораторий.

Теоретические и экспериментальные работы проводятся в области ядерной физики, физики ядерных реакторов и радиационной защиты, теплофизики и гидравлики, коррозии конструкционных материалов, радиационного материаловедения, технологии жидкометаллических теплоносителей, химии и радиохимии и других разделов атомной науки и техники.

Для проведения этих исследований ГНЦ РФ – ФЭИ располагает высококвалифицированными кадрами (численность сотрудников – 3500 человек (70 докторов и 316 кандидатов наук)) и уникальной экспериментальной базой.

Многие разработки ГНЦ РФ – ФЭИ получили практическое воплощение. Среди них:

- быстрые реакторы БР-1, БР-2, БР-5, БР-10 в Обнинске, БОР-60 в Димитровграде, БН-350 в Актау (Казахстан), БН-600 этот реактор имеет более чем 30-летний опыт успешной работы на БАЭС, завершается строительство БН-800 также на БАЭС, идет его подготовка к пусковым работам;
- реакторы для подводных лодок со свинцово-висмутовым охлаждением наземные прототипы, опытные образцы и серийные установки (рис. 2);
- реакторы «ТОПАЗ» и «БУК» для энергоустановок космических аппаратов, прошедшие успешные испытания на околоземных орбитах;
- под научным руководством ГНЦ РФ ФЭИ и с его участием были созданы также реакторы первой очереди Белоярской АЭС на Урале, передвижная АЭС ТЭС-3, Билибинская АТЭЦ на Чукотке, разработано около сотни других проектов ядерных энергоустановок различного назначения.



Рис. 2. Атомные подводные лодки (проекты 705 и 705К) с теплоносителем Pb-Bi

В настоящее время ГНЦ РФ – ФЭИ является координатором и научным руководителем Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года», в рамках которой предполагается создание ряда инновационных реакторных установок, охлаждаемых жидкими металлами (БН-1200, БРЕСТ-300, СВБР-100, МБИР).

Другими инновационными направлениями деятельности института являются: использование радиации для лечения онкологических заболеваний, разработки по радиоизотопам и радиофармпрепаратам, создание медицинских приборов; создание систем очистки и контроля жидких и газовых сред; разработки прямоконтактных жидкометаллических технологий получения водяного пара, пресной воды, сингаза и водорода; разработки в области тепловых труб, исследования в области лиофобных капиллярно-пористых систем и разработка устройств на их основе; получение чистого кремния с использованием натриевой технологии; получение высокочистых галлия, свинца, эвтектического сплава 44,5 % Pb – 55,5 % Bi; разработка нанотехнологий и т. д.

История вовлечения ГНЦ РФ – ФЭИ в наноиндустрию берет свое начало с 1993 г. с развития двух нанотехнологий (жидкометаллической технологии синтеза наноструктурных аэрогелей и оксидов и технологии плазмохимического синтеза полифункциональных наноструктурных покрытий на пористых подложках).

Ниже остановимся на результатах развития ряда наиболее интересных технологий.

1. Тяжелые жидкометаллические теплоносители (ТЖМТ) в прямоконтактных технологиях производства водяного пара, пресной воды, сингаза и водорода

Тяжелые теплоносители свинец-висмут и свинец могут эффективно использоваться для охлаждения реакторов в ядерных энергетических установок. Это оказалось возможным благодаря ряду теплофизических преимуществ ТЖМТ перед другими теплоносителями при высокотемпературном переносе тепла. ТЖМТ имеют также физико-химические особенности, которые позволяют рассматривать не только принципиально новые и более эффективные схемы производства тепла и электричества в ЯЭУ, но и варианты получения при непосредственном смешении ТЖМТ с перерабатываемыми средами в контурах ЯЭУ таких ценных технологических продуктов, как водород, синтез-газ, пресная вода и водяной пар.

Разработки прямоконтактных технологий и устройств, проводимые в Γ НЦ $P\Phi$ – Φ ЭИ можно условно разделить на два направления:

- 1) получение водяного пара и пресной воды;
- 2) производство водорода и синтез-газа.
- В рамках первого направления на сегодняшний день достигнуто следующее:
- спроектированы и изготовлены макетные образцы прямоконтактных испарителя и опреснителя;
- разработана методика расчета теплообмена при прямом смешении жидкого металла с водой;
- проведены испытания созданных макетных образцов (температура расплава, подаваемого в зону испарения воды, 150–450 °C, давление в макетных образцах 1,1–3,0 бар, расход воды через зону испарения изменялся от 0,5 до 8 кг/ч, объем зоны испарения 2,5 л).

Полученные при испытаниях данные показали преимущества испытанных макетных образцов по сравнению с прямоконтактными моделями, разработанными японскими исследователями (основными конкурентами российских разработчиков прямоконтактных систем). Определенные по результатам испытаний значения усредненного объемного коэффициента теплообмена существенно выше, чем в экспериментах, выполненных в частном институте CRIEPI, и близки к данным, полученным в Токийском Технологическом институте (хотя последние были получены в условиях более благоприятных для процессов теплообмена – при высоком давлении в системе – вплоть до 5,0 МПа). Указанные преимущества достигнуты за счет эффективной конструкции диспергатора пароводяной смеси (представляющего собой цилиндр с вертикальными прорезями в нижней половине) и удачной конструкции макетных образцов. Благодаря этому инжекция воды осуществлялась не только по центру зоны испарения (как это происходило у японских исследователей), а практически на весь объем расплава. Поэтому при проведении настоящих испытаний в прямоконтактном теплообмене участвовал больший, чем в японских моделях, объем металла.

Выполненный расчет кожухотрубной модели на основе режимных параметров при проведении экспериментов с макетными образцами показал существенное преимущество (уменьшение размеров и повышение эффективности теплообмена) прямоконтактных систем по сравнению с кожухотрубными.

Во всех режимах испытаний макетные образцы работали устойчиво и без «паровых взрывов». Установление и изменение режима работы макетных образцов не вызывало каких-либо затруднений и осложнений.

Полученные результаты убедительно продемонстрировали преимущества прямоконтактных технологий испарения и опреснения воды, главными из которых являются высокий объемный коэффициент теплообмена при смешении ТЖМТ с водой, простота конструкции и технологичность изготовления аппаратов для их реализации.

В рамках второго направления предлагается создание генераторов водорода и синтез-газа на основе следующих процессов: разложение водяного пара, оксидная конверсия газообразных углеводородов.

При разложении водяного пара (t = 400-1000 °C) протекает реакция:

$$Pb + H2O \Leftrightarrow Pb + H2 + [O]. \tag{1}$$

Возможная схема процесса представлена на рис. 3. Для интенсификации процесса получения водорода необходимо постоянно отводить растворенный в расплаве кислород из зоны реакции. Это можно осуществить при помощи специального кислородного насоса, разрабатываемого в ГНЦ РФ – ФЭИ.

В ГНЦ РФ – ФЭИ получены первые экспериментальные результаты термического разложения водяного пара в расплаве Pb-Bi.

Относительно небольшие концентрации полученного водорода объясняются использованием несовершенного (с малой площадью электролита, небольшими допустимыми напряжениями на электродах) кислородного насоса. Также очевидно, что при таком способе производство водорода целесообразно проводить при повышенных температурах ($t \ge 800\,^{\circ}$ C).

При оксидной конверсии (рис. 4) углеводородов (при $t \ge 500$ °C) возможна реакция:

$$CH_4 + PbO \Leftrightarrow CO + 2H_2 + Pb.$$
 (2)

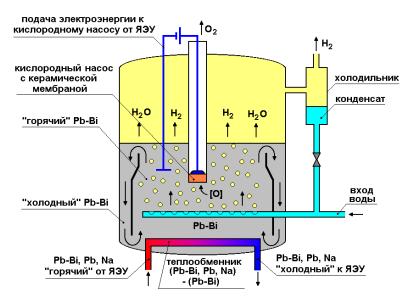


Рис. 3. Принципиальная схема процесса генерации водорода при разложении водяного пара в ТЖМТ

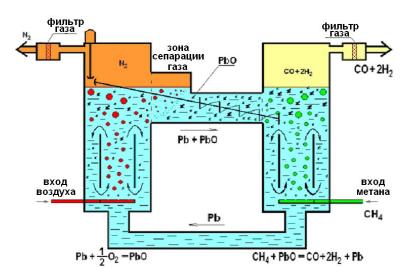


Рис. 4. Схема процесса генерации синтез газа при оксидной конверсии углеводородов в ТЖМТ

Оксидная конверсия может протекать при более низких температурах по сравнению с традиционной паровой конверсией. Повышение эффективности конверсии происходит за счет новых, ранее не применяемых процессов: окисление углеводородов оксидами, присутствующими в зоне реакции в растворенном в расплаве виде и (или) в виде твердой фазы.

Непрерывное получение PbO возможно непосредственно в контуре циркуляции при окислении жидкого металла кислородом воздуха по реакции:

$$Pb + 1/2O_2 \Leftrightarrow PbO.$$
 (3)

При протекании реакции (3) выделяется тепло, которого достаточно для обеспечения теплом реакции (2). Таким образом, система для реализации реакций (2) и (3) может не нуждаться в непрерывном подводе тепла.

Первые экспериментальные результаты подтвердили принципиальную возможность осуществимости оксидной конверсии углеводородов (на примере пропана).

2. Системы контроля кислорода и водорода в газовых и жидких средах

На базе большого опыта ГНЦ РФ – ФЭИ по созданию различных устройств контроля для атомной энергетики разработаны датчики на твердых электролитах для контроля водорода и кислорода в жидкометаллических теплоносителях (Pb, Bi, Na), а также в газовых контурах и производственных помещениях.

Основным устройством в датчиках для контроля активности кислорода и водорода является керамический чувствительный элемент на основе твердых электролитов из оксидной керамики, обладающий способностью работать длительное время в условиях повышенных температур и термоударов в расплавах металлов, обладающий стабильностью проводящих и механических свойств, термостойкостью, низкой газопроницаемостью.

В результате проведенных исследований удалось разработать технологию изготовления высокоплотной твердоэлектролитной керамики на основе нанокристаллических порошков частично стабилизированного ZrO_2 с добавкой наноструктурного аэрогеля AlOOH для применения в качестве электролита. Применяемые в рассматриваемой технологии получения керамики оксидные нанопорошки (аэрогель AlOOH) синтезируются по оригинальной жидкометаллической технологии, разработанной в Γ HЦ $P\Phi$ – Φ 9I.

По областям применения разрабатываемые детекторы делятся на следующие виды.

1. Датчики термодинамической активности кислорода в свинцовосодержащих расплавах. Данные устройства предназначены для измерения термодинамической активности кислорода в жидкометаллических теплоносителях АЭС.

Технические характеристики датчиков для измерения активности кислорода в жидкометаллических расплавах: диапазон измерения активности кислорода – $a=10^6$ –1; диапазон рабочих температур – 350–650 °C; рабочая среда – Pb, Pb-Bi, Na; рабочее давление – 0–1,5 МПа; скорость изменения температуры – до 100 °C/c; ресурс работы – до 10000 часов.

С использованием таких датчиков для реакторных установок СВБР, БРЕСТ разрабатываются специальные автоматизированные системы контроля и управления качеством жидкометаллических теплоносителей.

2. Высокотемпературные датчики кислорода в газовых средах. Разработаны на основе датчиков активности кислорода в жидкометаллических расплавах. Датчик состоит из измерительного и электронного блоков, соединенных кабельной линией длиной до 120 метров. Сенсор, в основе которого находится твердоэлектролитная керамическая ячейка, расположен внутри термостатированного корпуса измерительного блока, куда обеспечивается непрерывная подача исследуемого газа путем конвекции.

Основные технические характеристики: диапазон измерения содержания кислорода в анализируемой газовой смеси — от 0 до 30 кПа; параметры анализируемой газовой смеси (% об.): воздух — от 10 до 100; СО — до 1; СО₂ — до 1; водяной пар — до 100; водород — до 0,01; предел допускаемой основной относительной погрешности — 12 %; диапазон допустимых температур среды в месте установки датчика, (°C) — до 700 °C; диапазон допустимых давлений — от 0 до 0,7 Па.

3. Система раннего обнаружения и контроля горючих и взрывоопасных газов (рис. 5). Разработана на основе датчиков кислорода в газовых средах. Система предназначена для обеспечения безопасной эксплуатации и контроля технологических процессов производств, связанных с получением, использованием, переработкой или хранением горючих газов (водород, кислород, метан, пропан и др.) и паров легковоспламеняющихся жидкостей (спирт, ацетон, аммиак и др.).

Нижний порог обнаружения в воздухе:

- водорода (% об.) 0,01;
- паров ацетона, спирта и др. (% об.) 0,05;
- метана, пропана и др. (% об.) 0.1;
- кислорода в инертных газах (% об.) 10^7 .

Диапазон допустимых давлений – до $0.7~\mathrm{Mna}$, диапазон допустимых температур среды до $500~\mathrm{^{\circ}C}$.



Рис. 5. Система раннего обнаружения и контроля горючих и взрывоопасных газов

4. Датчики водорода в натриевом теплоносителе и газовых контурах АЭС на быстрых нейтронах. Устройства входят в систему аварийной защиты парогенератора и предназначены для контроля течи воды в натрий второго контура.

Диапазон измерения водорода в натрии от 0.01 до 14 ppт, рабочий диапазон температур от 350 до $500\,^{\circ}$ C, инерционность – не более 20 с.

3. Жидкометаллическая технология синтеза наноструктурных оксидов и аэрогелей

В разработанной ГНЦ РФ – ФЭИ жидкометаллической технологии синтеза, в отличие от традиционной «автоклавной» золь-гель технологии, не используются вредные и агрессивные жидкости. Также нет необходимости создавать высокие давления, что существенно снижает уровень затрат на оборудование и упрощает технологические схемы. Кроме того, предлагаемая не имеющая аналогов жидкометаллическая технология отличается низким энергопотреблением и высокой производительностью.

Предложенный способ синтеза наноструктурных оксидов заключается в последовательном осуществлении двух стадий.

1 стадия. Растворение в галлии при 323–423 К (свинце при 653–873 К, свинцевисмуте при 453–873 К) металла, обладающего большим сродством к кислороду по

сравнению с Ga (Pb) и растворимостью в конкретной жидкометаллической среде не менее 0.1 % масс.

2 стадия. Окисление растворенного металла в галлии (свинце, свинцевисмуте) водяным паром в соответствии с реакциями:

$$2\{Ga\} + 3(H2O)) = \langle Ga2O3 \rangle + 3(H2);$$
 (4)

$$\langle Ga_2O_3 \rangle \Rightarrow [Ga_2O_3];$$
 (5)

$$x[Me] + y[Ga2O3] = < MexO3y + 2y{Ga},$$
 (6)

где x и y – стехиометрические коэффициенты, а вид скобок характеризует состояние реагентов и продуктов реакции: « $\{ \}$ » – жидкое; «[]» – растворенное; «()» – газообразное; «< >» – твердое (аморфное).

Рассмотрение известных данных по растворимостям металлов в галлии, свинце и свинце-висмуте наряду с термодинамическими расчетами параметров реакций образования оксидов в перечисленных растворителях свидетельствует о возможности получения большого количества соединений вида Me_xO_y . Так при селективном окислении системы $\{Ga\}$ –[Me] до 423 К следует ожидать получения Na_2O , Li_2O_3 , Al_2O_3 , MgO и CaO. Аналогичные расчеты приводят к выводу о возможности синтеза TeO, NiO, GeO_2 , SnO_2 , In_2O_3 , K_2O , ZnO, Ga_2O_3 , Na_2O , MnO, Li_2O , Al_2O_3 , BaO, SrO, Ce_2O_3 , MgO и CaO в расплавах свинца и свинца-висмута до 873 К.

На рис. 6 представлена схема реализации рассматриваемого способа получения ультрадисперсных оксидов из расплавов галлия, свинца и эвтектики 44,5 % Pb – 55,5 % Ві. Рост частиц образующегося оксидного вещества с поверхности барботажного устройства, с помощью которого в расплав галлия (свинца, свинца-висмута) подается газовая смесь с водяным паром, вглубь жидкометаллической среды ограничен и определяется соотношением величин разнонаправленных сил (Архимедовой, тяжести, подъема газа, поверхностного натяжения, адгезии, инерции).

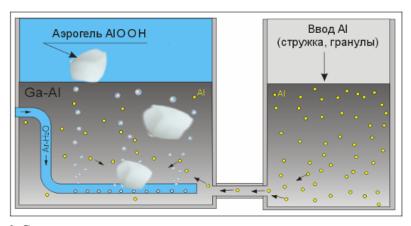


Рис. 6. Схема получения ультрадисперсных оксидов из расплавов галлия, свинца и эвтектики 44,5 % Pb – 55,5 % Bi

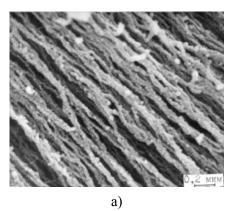
По данной (жидкометаллической) не имеющей аналогов технологии теоретически можно получить порядка 100 различных соединений. Это следует из термодинамических расчетов возможности образования оксидных (галогенидных, нитридных, гидридных) фаз металлов, растворенных в расплавах галлия или свинца, или эвтектики Pb-Bi и селективно окисляемых (галогенируемых, азотируемых, гидрируемых) в этих жидкометаллических средах-растворителях.

К настоящему времени по способу селективного окисления металлических примесей в расплавах галлия, свинца и свинца-висмута получены наноструктурные оксиды: A1₂O₃, AlOOH (аэрогель), In₂O₃, Fe₃O₄, MgO, MoO₃, SnO₂, ZnO, Ga₂O₃. Синтезированные вещества имеют объемный вид (порошки с макрочастицами размером до 500 мкм, аэрогели с линейными размерами образцов до 10 см). Структурные составляющие ультрадисперсных оксидов находятся в пределах от 5 до 200 нм, что зависит от химического состава полученных веществ и условий их синтеза.

Синтезированные вещества в силу наноструктурного состояния являются уникальными материалами для создания тепло- и электроизоляции, сенсоров, керамики, ядерного топлива, катализаторов с улучшенными технико-экономическими показателями.

Рассмотрим, например, технологию получения и некоторые свойства аэрогеля AlOOH. Для получения этого вещества используется жидкий металл — галлий (температура плавления $29.8\,^{\circ}$ C). В расплавленном галлии растворяется около $0.1\,^{\circ}$ 6 масс. алюминия. Далее через полученный бинарный расплав продувается инертный газ (аргон), увлажненный водяным паром. Алюминий, в силу его большего сродства к кислороду по сравнению с галлием, окисляется по реакции, приводящей к образованию легкого, белого вещества — аэрогеля. Важно отметить, что указанный процесс проводится при невысоких температурах (не более $80\,^{\circ}$ C) и давлениях (не более $1.2\cdot10^{6}\,^{\circ}$ Па).

Образцы получаемого таким способом материала имеют слоисто-волокнистое строение. Минимальные структурные составляющие этого материала характеризуются размерами (диаметрами) на уровне 5–10 нм (чаще 20–50 нм) и представляют собой волокна, ориентированные в одном направлении (рис. 7а). Расстояние между волокнами колеблется от 10 до 100 нм. Волокна в свою очередь формируют несколько наложенных друг на друга слоев (рис. 7б).



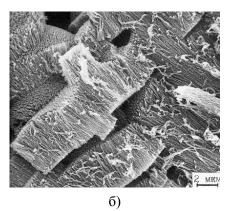


Рис. 7. Микроструктура аэрогеля AlOOH при различном увеличении

Свойства аэрогеля: плотность — $13-80~\rm kr/m^3$, теплопроводность в диапазоне температур $130-1500~\rm K$ — $0,02~\rm Br/(m\cdot K)$, электрическое сопротивление — более $10^{10}~\rm Om\cdot m$, пористость — до $99,5~\rm \%$, площадь удельной поверхности (БЭТ) — до $800~\rm m^2/r$. Аэрогель AlOOH обладает также способностью эффективно поглощать газы (СО, CO₂, NO, NO₂ и др.), катализировать органические реакции (ароматизации, получения синтез-газа), а также характеризуется неподверженностью к старению при многолетнем хранении и др. Свойства синтезированного в ГНЦ РФ — ФЭИ наноструктурного материала не уступают (и даже превосходят) свойствам аэрогелей, полученных по золь-гель технологии.

4. Технология плазмохимического синтеза полифункциональных наноструктурных покрытий (мембран) на пористых подложках

Появлению фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами предшествовали многолетние научные изыскания. Правда, с самого начала они были нацелены на достижение важных практических результатов в других областях науки — это технологии, созданные для транспортных энергетических установок и очистки жидких радиоактивных отходов АЭС.

В ГНЦ РФ – ФЭИ разработана технология получения уникального фильтрующего материала. Главная особенность технологии плазмохимического синтеза полифункциональных наноструктурных покрытий состоит в том, что переход вещества из твердого состояния в плазменное, а затем в твердое осуществляется как единый неразрывный процесс. На рис. 8 приведена схема получения наноструктурных мембран путем осаждения частиц из эрозионной плазмы на пористую подложку. Для этого используются промышленные установки электродугового испарения.

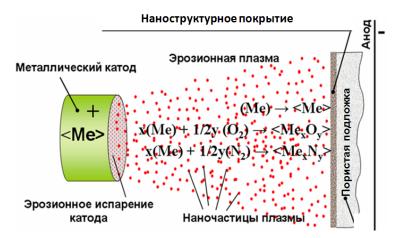


Рис. 8. Схема получения наноструктурных мембран

Уникальность этого фильтрующего материала (наноструктурной мембраны) заключается в том, что его поверхность содержит миллиарды нанощелей, которые не пропускают частицы величиной больше 0,1 мкм. Толщина такой наноструктурной мембраны всего 7–12 мкм, что в 5–10 раз меньше диаметра человеческого волоса, однако ей не страшны давление, вибрация, она устойчива к истиранию абразивными материалами — свойства не ухудшатся. Технология позволяет подбирать свойства мембраны в зависимости от состава очищаемой жидкости и условий фильтрования. Наноструктурную мембрану можно изготавливать многослойной, из разных материалов. Например, есть возможность сделать каждый 5-микронный слой мембраны из различных компонентов.

В зависимости от назначения и условий фильтрования подложка, на которой формируется наноструктурная мембрана, может быть полимерной, керамической, металлической или композиционной. От режимов формирования и состава мембраны зависит, например, будет ли осадок прилипать к ее поверхности или, наоборот, будет легко отделяться от нее. Основным направлением использования таких наноструктурных мембран является очистка водных растворов, в том числе очистка питьевой воды.

Основные преимущества фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами:

- высокая механическая прочность в широком интервале температур (10−250 °C) и диапазоне давлений фильтрации (1,0−60 атм.);
 - высокая износостойкость мембран;
 - слабая адгезия к осадкам взвесей фильтруемых жидкостей;
 - длительный ресурс ее эксплуатации;
 - высокая коррозионная стойкость;
- оптимальное сочетание тонкости очистки с гидравлическим сопротивлением потока жидкости;
- высокая удельная производительность более $600 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{атм.})$, что значительно выше, чем у аналогов;
 - производство экологически безопасно;
 - обладают свойствами гибкой керамики.

Как уже отмечалось, наноструктурные мембраны очищают воду от мельчайших частиц размером более 0,1 мкм, в том числе от взвесей железа, доводя ее до прозрачности двойного дистиллята. Кроме этого, мембрана производит безреагентное (бесхлорное) обеззараживание воды от широкого класса болезнетворных микроорганизмов с размером более 0,1 мкм. В том числе обеспечивается 100-процентная очистка от кишечной палочки E.coli.

Полученные фильтрующие элементы не только очищают жидкости от всех механических примесей, даже мельчайших, на 99,95 %. Они являются стойкими к воздействию радиоактивного излучения и могут применяться для утилизации жидких радиоактивных отходов. Такие фильтрующие элементы сохраняют прочность при температурах до 650°, работают в условиях вибраций и больших, до 60 атм., давлений. Эти характеристики существенно превосходят показатели фильтроматериалов, в том числе лучших зарубежных образцов, применяемых сегодня в различных отраслях промышленности, например, на атомных станциях при очистке горячей воды первого контура или турбинных масел.

И еще одно достоинство наноструктурных фильтрующих элементов: значительный ресурс работы. Мембрана специально создана с такими свойствами, чтобы к ней очень плохо прилипали любые загрязнения, а для удаления накопленных осадков конструкция разработанного фильтра предусматривает режим самоочистки, то есть не нужны химические растворители или другие вредные вещества.

Также новые мембранные фильтроэлементы позволяют существенно повысить области применения сорбентов. Один из них — трепел — давно известен своими хорошими адсорбционными свойствами. Он эффективно сорбирует многие вредные примеси из растворов. Но его применение для очистки воды было ограничено, так как его взвеси трудно выделить из очищаемой жидкости. Наноструктурная мембрана полностью выводит этот сорбент и тем самым резко повышает возможность его использования.

Кроме того, наноструктурные мембраны можно использовать для повышения эффективности работы уже существующих методов очистки. Например, всем известно, что можно обеззараживать воду ультрафиолетом. Это совершенно безопасный способ очистки воды в бассейнах. Но, почему же тогда чаще применяют хлорирование? Дело в том, что для достижения наибольшей эффективности использования ультрафиолетовой лампы необходимы высокая прозрачность воды и отсутствие осадка на стекле лампы. Созданные наноструктурные мембраны помогают

этого добиться. Работая практически в идеальных условиях, лампа обеспечивает длительное и эффективное обеззараживание воды, которое обходится значительно дешевле.

Ниже перечислены основные области применения фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами:

- 1. Очистка питьевой воды:
- предприятия Министерства чрезвычайных ситуаций (мобильные системы очистки воды);
- жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ) и индивидуальные пользователи (получение питьевой воды высшего качества);
- пищевая промышленность (питьевая вода, вода для производства безалкогольной продукции и др.);
 - учреждения здравоохранения (получение воды для фармацевтики).
 - 2. Переработка технических жидкостей:
- АЭС и предприятия атомной промышленности (очистка воды от радионуклидов);
 - химические производства (очистка промышленных стоков);
- гальванические производства (очистка и частичное восстановление электролитов);
- горнодобывающая промышленность (выделение из растворов ценных примесей (золото, никель, серебро и др.);
- металлургическая промышленность (очистка оборотной воды от механических примесей).

В целом можно сказать, что учеными ГНЦ РФ – ФЭИ создан принципиально новый класс фильтрующих материалов, имеющих наноразмерную структуру и ряд важных технико-экономических преимуществ. Уже сейчас в указанном институте идет завершающая стадия создания производства фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами для доочистки питьевой воды в домашних условиях, которые можно использовать как в разработанных фильтрах ГНЦ РФ – ФЭИ, так и в фильтрах других производителей.

Помимо этого в планах есть место созданию производств новых инновационных продуктов на основе фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами. Это мембранные фильтры различной производительности, а также целые комплексы систем сорбционной и мембранной очистки. Комплексные системы позволят производить очистку из любого источника воды (река, озеро, болото, лужа и т. п.) до уровня питьевой, кроме этого — осуществить переработку радиоактивных отходов, очистку технических масел турбин, трансформаторов, двигателей, гальванических растворов, утилизацию моющих средств, очистку воды в отопительных системах, аквариумах и многое другое.

5. Разработки тепловых труб для различных отраслей промышленности

Тепловая труба представляет собой замкнутое теплопередающее устройство, в котором перенос тепла из зоны подвода тепла в зону отвода тепла осуществляется паром в виде скрытой теплоты парообразования в результате процессов испарения и конденсации рабочего вещества, а возврат конденсата обратно производится действием массовых (гравитационных, центробежных) и/или поверхностных сил (поверхностное натяжение жидкости).

В ГНЦ РФ – ФЭИ работы по тепловым трубам начались в 60-х годах прошлого века сначала применительно к системам прямого преобразования тепловой энергии в электрическую космического назначения, а затем и для других отраслей промышленности. Были разработаны физические (методы расчета и конструирования) и технологические (способы изготовления) основы тепловых труб, практически освоен диапазон от криогенных температур до $1500\,^{\circ}$ С. Результаты исследований и разработок опубликованы в двух монографиях, получивших международное признание, большом количестве журнальных статей, трудах конференций, в виде патентов на изобретения. В качестве примера ниже приведен ряд разработок, выполненных в последнее десятилетие.

На рис. 9 показана модель абсолютно черного тела для градуировки пирометров, изготовленная по заказу ОАО «Метропир». Она представляет собой коаксиальную тепловую трубу, длиной ~ 500 мм, с внутренним диаметром 69 мм. Градиент температуры на внутренней поверхности – не более $0.01\,^{\circ}$ С/см.

На рис. 10 изображен внешний вид термостата технологического, изготовленного по заказу ООО НПФ СМІLаb, для производства полупроводниковых материалов. Термостат имеет три колодца, в которых поддерживается заданная температура с градиентом не более $0.01\,^{\circ}$ С/см. Глубина колодцев $-350\,$ мм, диаметр $-60\,$ мм. Особенностью этого термостата является то, что он устанавливается на вращающемся столе (в поле действия центробежных сил).

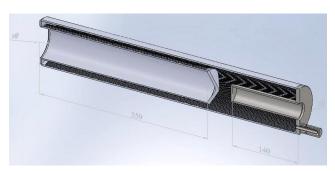


Рис. 9. Модель абсолютно черного тела (рабочее вещество – натрий, диапазон рабочих температур 480...800 °C)



Рис. 10. Термостат технологический с тремя колодцами для загрузки образцов (рабочее вещество – калий, диапазон рабочих температур 350...650 °C)



Рис. 11. Тепловая труба для химического реактора (рабочее вещество – калий, диапазон рабочих температур 550...600°C)

На рис. 11 показаны тепловые трубы, разработанные и изготовленные в ГНЦ РФ – ФЭИ по заказу ООО «САПР-НЕФТЕХИМ». Эти тепловые трубы предназначены для создания изотермических условий в реакционной зоне химического реактора, в котором происходит конверсия исходного углеводородного сырья в смесь ароматических углеводородов. Мощность тепловой трубы – 70 кВт, общая высота – 9 метров.

6. Технология лиофобных капиллярно-пористых систем для создания энергетического оборудования нового поколения

Особенностью лиофобных капиллярно-пористых систем (ЛКПС) является развитая поверхность раздела фаз и малый размер пор, что приводит к необходимости учитывать несколько различных эффектов (капиллярность, образование поверхностной энергии и др.). ЛКПС обладают ярко выраженной синергетичностью, т. е. их свойства не определяются непосредственно параметрами компонентов, а, в первую очередь, характером их взаимодействия.

Специфика лиофобных капиллярно-пористых систем заключается в том, что, несмотря на практически несжимаемость составляющих компонентов, они представляют собой системы, обладающие высокой сжимаемостью. При давлении, превышающим давление Лапласа, и в начале заполнения пор, изотермическая сжимаемость ЛКПС резко возрастает и ее величина становится на несколько порядков выше сжимаемости лиофобной жидкости ($k_T \sim 10^{-6} \, \Pi a^{-1} \,$ при $r \sim 1 \,$ мкм и $\Pi = 0.9$).

Традиционные вещества (газы, жидкости, твердые тела) в основном обладают положительным температурным коэффициентом объемного расширения (ТКОР), т. е. вещества расширяются при нагревании. Лиофобные системы обладают отрицательным ТКОР по модулю в разы превышающим ТКОР традиционных веществ. Таким образом, в лиофобных системах наблюдается эффект так называемого температурного сжатия, т. е. с ростом температуры лиофобная система уменьшает свой объем.

При плавлении лиофобного рабочего вещества в матрице ЛКПС происходит значительное увеличение объема системы. Увеличение объема при плавлении, например, жидких металлов, составляет от –3 до +6 %, в то время как для ЛКПС, в зависимости от пористости, это значение может достигать 50 %.

Лиофобные системы способны крайне эффективно обратимо накапливать и преобразовывать энергию за счет межфазного взаимодействия поверхности раздела капиллярно-пористой матрицы и лиофобной жидкости. Обратимый процесс образования межфазной поверхности является тепломеханическим, т. е. необходим одновременный подвод как тепловой, так и механической энергии.

Уникальные физические и термодинамические свойства лиофобных систем позволяют рассматривать их как новый тип рабочего тела для создания нового поколения энергетических установок и устройств различного функционального назначения. Основными преимуществами энергетических устройств на основе ЛКПС перед традиционными являются: высокие удельные характеристики, возможность работы в широком диапазоне температур, бесшумность, поскольку работа происходит без разрыва сплошности жидкости.

Особый интерес представляют пассивные защитные устройства различного функционального назначения: устройства аварийной остановки реактора (Патенты РФ № 2096009, № 2138086), демпферы пульсаций давления (Патент РФ № 2084750), компенсаторы давления жидкости (Патент РФ № 2187742, см. рис. 12). Полученные данные по термодинамическим и теплофизическим характеристикам ЛКПС и предложения по их использованию для создания пассивных систем безопасности ЯЭУ были отмечены на уровне «Росатома» среди особых достижений за 2007 год в области фундаментальных исследований по теплофизике.

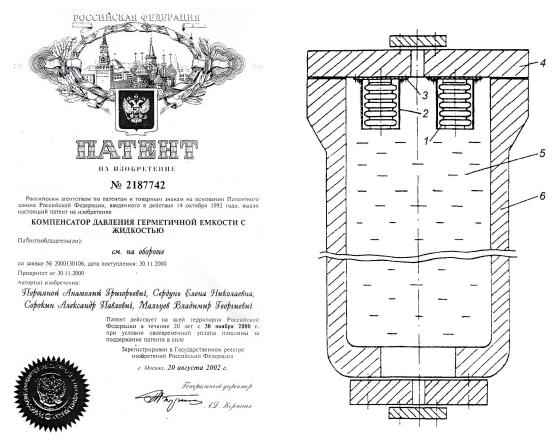


Рис. 12. Компенсатор давления герметичной ёмкости с жидкостью для повышения безопасности нагруженных давлением экологически опасных герметичных систем с жидкостью:

1 — сильфон; 2 — направляющий перфорированный цилиндр; 3 — опорная плита; 4 — крышка герметичной ёмкости; 5 — жидкость; 6 — герметичная ёмкость

Заключение

Результаты инновационных разработок на базе вышеперечисленных технологий ГНЦ РФ – ФЭИ защищены патентами, удостоены дипломов и медалей различного уровня специализированных выставок и форумов.

Коммерциализация разработок является приоритетным направлением деятельности ГНЦ $P\Phi - \Phi ЭИ$: на сегодняшний день созданы производства радиофармпрепаратов, аэрозольных фильтров для A Э C, подготовлены производственные участки по выпуску оборудования для комплексной очистки воды, сорбентов для A Э C, оборудования для контроля теплофизических характеристик и примесного состава жидкостей и газов и др.

Разработаны технологии получения высокочистых галлия и кремния, нанотехнологии получения аэрогелей и оксидов, полифункциональных покрытий на пористых подложках.

В результате многолетних исследований и разработок в ГНЦ РФ – ФЭИ созданы и испытаны тепловые трубы, в том числе, высокотемпературные с жидкометаллическими (натрий, калий, литий, цезий) и другими (вода, ацетон) теплоносителями, которые находят широкое применение в различных областях техники и промышленности.

Нам основе выполненного комплекса исследований фундаментальных свойств ЛКПС обоснованы технические решения для создания энергетических устройств нового поколения различного функционального назначения: аккумуляторы и преобразователи энергии, компенсаторы давления жидкости, демпферы, пассивные защитные устройства для тепловой, космической и атомной энергетики.

В заключение следует отметить, что у ГНЦ РФ – ФЭИ славное прошлое, устойчивое настоящее и большое будущее.

Информация об авторах

Рачков Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН,

научный руководитель ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: vrachkov@ippe.ru

Мартынов Петр Никифорович, д-р техн. наук, заместитель генерального директора – директор Института физико-химических технологий ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Асхадуллин Радомир Шамильевич, канд. техн. наук, заместитель директора

Института физико-химических технологий ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

e-mail: raskhadullin@ippe.ru

Григоров Виталий Владимирович, научный сотрудник

Института физико-химических технологий ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: vgrigorov@ippe.ru

Логинов Николай Иванович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник

Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: loginov@ippe.ru

Мельников Валерий Петрович, начальник отдела

Института физико-химических технологий ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: piv@ippe.ru

Михеев Александр Сергеевич, начальник лаборатории

Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: mikheyev@ippe.ru

Портяной Анатолий Григорьевич, начальник лаборатории

Института специальных систем ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: mikheyev@ippe.ru

Сердунь Елена Николаевна, канд. техн. наук, начальник отдела ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: enserd@ippe.ru

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, заместитель директора

Института ядерных реакторов и теплофизики ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

Стороженко Алексей Николаевич, начальник лаборатории

Института физико-химических технологий ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: anstor@ippe.ru

Ульянов Владимир Владимирович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

Института физико-химических технологий ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: vulyanov@ippe.ru

Ягодкин Иван Васильевич, канд. техн. наук, начальник лаборатории

Института физико-химических технологий ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: yagodkin@ippe.ru

УДК 621.039

СОТРУДНИЧЕСТВО С ФРАНЦУЗСКИМИ СПЕЦИАЛИСТАМИ В ОБЛАСТИ ТЕПЛОФИЗИКИ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ*

А. П. Сорокин¹, В. М. Поплавский¹, А. А. Труфанов¹, Ф. А. Козлов¹, Ю. А. Кузина¹, В. В. Алексеев¹, К. Латже²

¹ АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского»
 (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Обнинск, Россия
 ² Ядерный исследовательский центр Кадараш, Комиссариат по атомной энергии и альтернативным источникам энергии (КАЭ), Франция

Франко-российское научно-техническое сотрудничество в области теплофизики быстрых реакторов с натриевым теплоносителем осуществляется с целью повышения уровня научно-технического обоснования характеристик и конструкторских решений, повышения эффективности и безопасности их работы. Основные направления сотрудничества — теплогидравлика активной зоны и различных узлов оборудования, натриевая технологии, развитие аварий, вывод из эксплуатации быстрых реакторов, Представлены и обсуждаются результаты, полученные в ходе двустороннего франко-российского сотрудничества в области теплофизики быстрых реакторов по Соглашению от 8 июня 2010 года между Госкорпорацией «Росатом» и Комиссариатом по атомной энергии и альтернативным источникам энергии (КАЭ) Франции о мирном использовании атомной энергии в рамках Рабочей группы № 3 «Технология» (РГ-3). Сформулированы основные направления и задачи дальнейшего двустороннего сотрудничества.

Двустороннее франко-российское научно-техническое сотрудничество в области теплофизики быстрых реакторов с натриевым теплоносителем плодотворно осуществляется с начала 1990-х годов. Координатором с российской стороны являлся В.М. Поплавский. В 1990-е годы основные усилия были направлены на разработку проекта Европейского реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем большой мощности. Руководителями работ в области теплофизики реакторов на быстрых нейтронах с французской стороны являлись Жан Луи Гарсиа, Жан Клод Астажиано и, в последний период времени, Кристиан Латже, с российской стороны – Федор Козлов и Александр Сорокин. Осуществлялся интенсивный информационный обмен результатами исследований по теплогидравлике активной зоны и различных узлов оборудования (промежуточный теплообменник, парогенератор, камеры смешения, натриевая полость и т. д.), технологии натрия, отдельным аварийным ситуациям. В 2000-х годах акцент был сделан на фундаментальных и поисковых исследованиях. В проведении сотрудничества принимала участие большая группа российских специалистов: Виктор Алексеев, Юрий Загорулько, Екатерина Орлова, Альберт Жуков, Алексей Опанасенко, Евгений Иванов, Юрий Ашурко, Вячеслав Борисов и др.

В связи с выводом из эксплуатации французских быстрых реакторов «Феникс» и «Суперфеникс» и российского исследовательского реактора на быстрых нейтронах «БР-10» в начале 2000-х годов появилось новое направление, связанное с разработкой технологий демонтажа, обращения и утилизации компонент реакторных установок (теплоноситель, материалы). Научным руководителем по этому направлению с российской стороны являлся Лев Кочетков.

232

^{*} Опубликовано в журнале «Вопросы атомной науки и техники». Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2017. Вып. 2. – С. 148–156. – Эл. ресурс: http://vant.ippe.ru/archiv/year2017.html

В последнее время, начиная с 2011 года, научно-техническое сотрудничество в области теплофизики быстрых реакторов проводится в соответствии с Соглашением от 08 июня 2010 года между Госкорпорацией «Росатом» и Комиссариатом по атомной энергии и альтернативным источникам энергии (КАЭ) Франции о мирном использовании атомной энергии в рамках Рабочей группы № 3 «Технология» (РГ-3).

Цель сотрудничества – повышение уровня научно-технического обоснования конструкторских решений и характеристик быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, повышение эффективности и безопасности их работы. В числе важнейших задач сотрудничества – совершенствование понимания теплофизических явлений и обоснования реакторных систем и компонентов. Итоги работы подводятся ежегодно на заседании Координационного Комитета (КК) по сотрудничеству между Госкорпорацией «Росатом» и Комиссариатом по атомной энергии и альтернативным энергоисточникам (КАЭ) Франции. Последние заседания КК состоялись 10 декабря 2015 года в Москве и 11–12 января 2017 года в Париже [1, 2].

В 2015 году состоялось 2 совещания Рабочей группы – техническое совещание 2–4 июня в ГНЦ РФ – ФЭИ, г. Обнинск (рис. 1) и рабочее совещание 15–17 сентября в Научно-техническом центре Кадараш, провинция Экс-Прованс во Франции, 4–6 июня 2016 года техническое совещание Рабочей группы состоялось в ГНЦ РФ – ФЭИ. В течение прошедших совещаний:

- состоялся информационный обмен результатами исследований в области теплогидравлики натриевого теплоносителя, массопереноса и технологии натрия, развития тяжелых аварий, обоснования безопасности в поддержку проектов реакторов нового поколения на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем АСТРИД (КАЭ) и реактор большой мощности (Госкорпорация «Росатом»), а также по выводу из эксплуатации быстрых реакторов;
- обсуждены предложения по двухстороннему сотрудничеству в указанных областях, отмечена необходимость организации сотрудничества по выбранным проблемам на основе подготовленных «кооперационных протоколов»;



Рис. 1. Совещание РГ-3 «Технология» в сервисном комплексе ГНЦ РФ – ФЭИ

- французские специалисты ознакомились со стендами ГНЦ РФ ФЭИ: «AR-1», «6Б» (лаборатория теплогидравлики жидкометаллических теплоносителей), «Протва-1», «Протва-2», «СИД», Плутон» (натриевая лаборатория), В-200 (лаборатория теплогидравлических исследований безопасности ядерных реакторов);
- для российских специалистов был проведен технический тур в Центре Кадараш на технологические платформы PAPIRUS Na (технология) и PLINUS (тяжелая авария).

Теплогидравлические исследования в поддержку новых реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем

На прошедших в 2015 году совещаниях РГ-3 «Технология» были рассмотрены следующие вопросы в области теплогидравлики быстрых реакторов:

- результаты экспериментов в ГНЦ РФ - ФЭИ по кипению натрия в модели ТВС активной зоны реактора на быстрых нейтронах в аварийных режимах на стенде «AP-1» и французских специалистов в Гренобле на установке SENSAS и расчетов французских специалистов развития процесса кипения в активной зоне реакторов, направленных на углубленное понимание процесса кипения, совершенствование и верификацию расчетных кодов (рис. 2, 3);



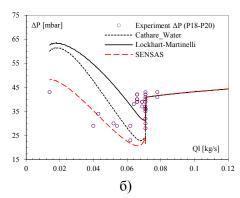


Рис. 2. Экспериментальные исследования французских специалистов по кипению в ТВС быстрых реакторов: внешний вид установки SENSAS (масштаб 1:1, воздух/вода) (*a*),

внешний вид установки зелуму (масштао т.т, воздух/вода) (а результаты исследований на модели GR-19 (натрий) (б)

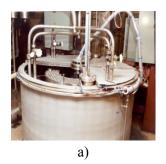


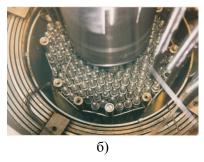


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки (на стенде «AP-1») (а) для исследования кипения натрия в модели ТВС (б) в аварийных режимах

– результаты экспериментальных исследований структуры течения, температурных полей, стратификации теплоносителя на баковой модели быстрого реактора с интегральной компоновкой оборудования при переходе к расхолаживанию естественной конвекцией (рис. 4).

Результаты расчетных исследований аварии ULOF в реакторе на быстрых нейтронах показали, что характер режима кипения натрия в активной зоне, в особенности в «натриевой полости», находящейся над активной зоной, оказывает сильное влияние на величину НПЭР и, соответственно, на характер протекания аварийного процесса и его последствия. Впервые экспериментальные исследования показали, что при наличии «натриевой полости» обеспечивается длительное охлаждение ТВС кипения натрия в модели ТВС реактора на быстрых нейтронах (рис. 5).





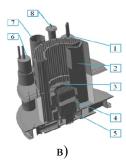


Рис 4. Общий вид баковой модели быстрого реактора с интегральной компоновкой оборудования (a), вид сверху на имитаторы ТВС активной зоны (δ), основные элементы первого контура водяной модели (ϵ):

- 1, 6 промежуточные теплообменники (ПТО); 2 элеваторная выгородка;
- 3 элементы внутрибаковой защиты; 4 активная зона (имитаторы ТВС);
- 5 напорная камера; 7 имитатор ГЦН-1; 8 автономный теплообменник (АТО)

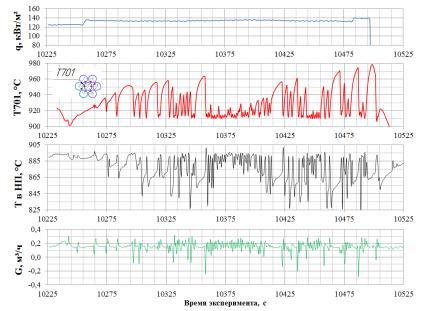


Рис. 5. Изменение температуры стенки центрального имитатора (Т701), температуры потока теплоносителя в натриевой полости и расхода теплоносителя в эксперименте с моделью верхнего торцевого экрана и «натриевой полостью» в условиях естественной циркуляции натрия

Эксперименты на баковой модели показали, что во всех исследованных вариантах расхолаживания температура теплоносителя на выходе из головок ТВС активной зоны понижается по сравнению с режимом принудительной циркуляции (рис. 6).

Участниками совещания были сформулированы предложения по дальнейшему сотрудничеству в области теплогидравлики быстрых реакторов:

- кипение натрия: французская сторона заинтересована в проведении новых экспериментов при большей мощности, с использованием усовершенствованных измерительных устройств, в условиях естественной и принудительной циркуляции (при мощности около 8 кВт/имитатор и более) на стенде «АР-1» (ГНЦ РФ ФЭИ);
- системы отвода остаточного тепловыделения: подготовка и проведение бенчмарка с целью верификации кодов с использованием экспериментальных данных, полученных специалистами ГНЦ РФ ФЭИ на модели системы аварийного отвода остаточного тепловыделения в реакторе.

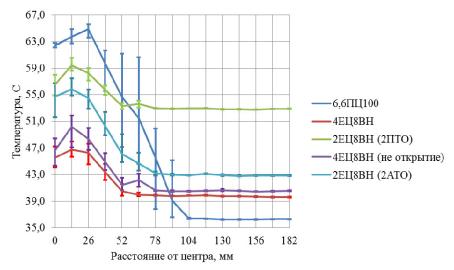


Рис. 6. Распределение осредненной температуры и пульсаций температуры теплоносителя по радиусу активной зоны реактора в различных режимах работы на высоте 20 мм от головок ТВС

Теплофизические исследования развития тяжелых аварий в быстрых реакторах с натриевым теплоносителем

Исследования развития тяжелых аварий в быстрых реакторах с натриевым теплоносителем проводятся с целью совершенствования и верификации расчетных кодов для обоснования безопасности быстрых реакторов: идентификация механизмов разрушения оболочек твэлов, численная оценка интенсивности этих механизмов в процессе деградации активной зоны, взаимодействию кориума с натрием и др.

На совещаниях РГ-3 «Технология» специалистами были рассмотрены следующие вопросы:

- результаты экспериментов на стенде «Плутон» в ГНЦ РФ ФЭИ по разрушению тепловыделяющей сборки в условиях аварии ULOF (рис. 7), результаты расчетов поведения оболочки твэлов, программа планируемых экспериментов;
- результаты теста GR19 BP, проведенного в КАЭ (Франция) на установке CFNa, по разрушению оболочек твэлов в ТВС при полной мгновенной блокировке

потока, моделирование GR19 BP и расчетное исследование аварии ULOF в ASTRID с использованием кода SIMMER (рис. 8). Также были представлены результаты расчётного моделирования аварии ULOF в активной зоне CFV-V3 реактора ASTRID;

– французской стороной было представлено описание установки PLINIUS-2 в части, касающейся быстрых натриевых реакторов, включая вопросы разработки систем и технологических процедур обращения с натрием: системы заполнения натрием, реакционная ёмкость для взаимодействия натрия с кориумом, система дренажа натрия и его фильтрации перед повторным использованием, удаление остаточного натрия из кориума посредством дистилляции (либо с использованием других эффективных процессов).



Рис. 7. Начало зоны глобальной деградации (а), признаки хрупкого разрушения оболочек имитаторов твэлов (б), плавления материала оболочек имитаторов твэлов (в)

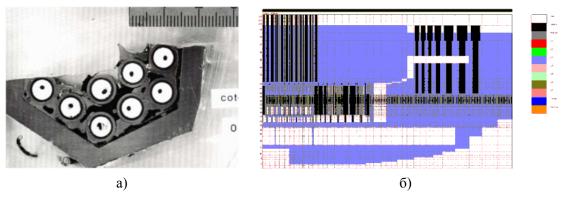


Рис. 8. GR19 BP верхняя область разрушения: плавление стали (а), ASTRID: моделирование аварии ULOF с использованием кода SIMMER (б)

Данный проект объявлен французской стороной открытым для международного сотрудничества посредством финансирования, материального обмена или двустороннего участия.

В результате проведенных на стенде «Плутон» в ГНЦ РФ – ФЭИ экспериментальных исследований идентифицированы возможные механизмы разрушения оболочек твэлов ТВС реактора на быстрых нейтронах при аварии с потерей расхода теплоносителя (процесс проплавления, температурные напряжения, термическое взаимодействие кориума с натрием). Также были разработаны расчетные модели и впервые показано, что время до проплавления оболочки составляет около $10 \, \mathrm{c}$.

Предложения по дальнейшему сотрудничеству по проблеме развития тяжелых аварий:

- продолжить информационный обмен по вопросам взаимодействия натрия с кориумом и взаимодействию кориума с конструкционными материалами, представляющим интерес как для российской, так и для французской сторон;
- рассмотреть вопрос о возможности подготовки совместного международного проекта по исследованию развития тяжелой аварии на стендах ПЛУТОН и PLINUS-2.

Массоперенос, физическая химия и технология натриевого теплоносителя

Обсуждены следующие вопросы:

- результаты экспериментов ГНЦ РФ ФЭИ по кинетике и распределению примесей в модели холодной ловушки и численного моделирования процессов массопереноса в холодных ловушках (рис. 9a, б);
- оценки французских специалистов процессов, связанных с вводом водорода для связывания трития во втором контуре инновационной системы конверсии энергии (цикл Брайтона).

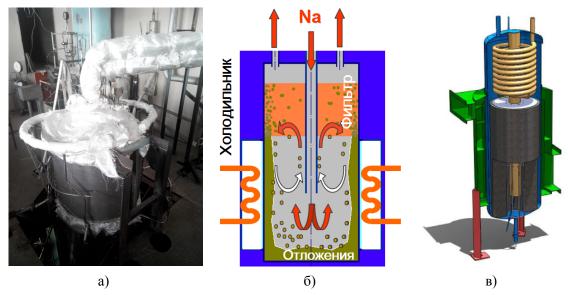


Рис. 9. Экспериментальная модель холодной ловушки, подготовленная для проведения испытаний на стенде «Протва-1» (а), схематическое изображение расчетных моделей холодных ловушек российскими (б) и французскими специалистами (в)

Представители ГНЦ РФ – ФЭИ представили результаты численного моделирования холодных ловушек без фильтрующей набивки (рис. 10) и экспериментальных исследований по кинетике и распределению примесей в модели ловушки.

Предложения по дальнейшему сотрудничеству в области физической химии, массопереноса и технология натриевого теплоносителя:

- провести сравнение расчетных моделей, результатов расчетов по усовершенствованным методикам отложения примесей в натриевом теплоносителе в холодных ловушках и сопоставить с экспериментом;
- следовать стратегии сотрудничества, обсуждавшейся ранее, по моделированию массопереноса активных продуктов коррозии и примесей в контурах быстрых реакторов;

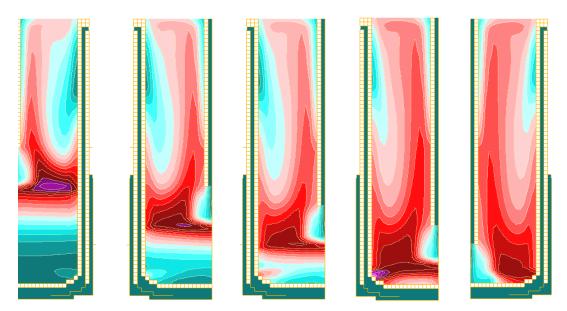


Рис. 10. Концентрация кристаллизовавшейся примеси при разной длине центральной трубы в холодной ловушке

- сравнить расчётные модели и сформировать список данных, необходимых для расчётных моделей (для явлений коррозии и отложений примесей), и определить, каких данных не хватает, какие подлежат оценке;
- определить набор данных (из имеющихся) для верификации моделей массопереноса (распределение продуктов коррозии в компонентах, экспериментальные петли Fe-Cr-Ni или реакторы для радионуклидов);
- организовать двухсторонний бенчмарк по моделированию массопереноса продуктов коррозии и примесей в контурах быстрых реакторов.

Исследования в обоснование безопасности реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем

В ходе состоявшихся в 2015 году совещаний Рабочей группы были проанализированы:

- общие подходы к обеспечению безопасности реакторов на быстрых нейтронах, требования к системам пассивной аварийной защиты реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, разработки дополнительных (пассивных) систем безопасности;
- результаты исследований по некоторым вариантам пассивных систем безопасности.

Предложения по дальнейшему сотрудничеству по вопросам безопасности быстрых реакторов включают:

- обсуждение вопросов двустороннего сотрудничества по пассивным устройствам аварийной защиты быстрых реакторов с гидравлически взвешенным стержнем;
- проведение информационного обмена по результатам исследований в области натриевой технологии (пожаров): моделирование, средства пожаротушения;
- анализ идеологии и результатов моделирования, диагностики и регистрации течей воды в натрий (малые и большие течи).

Заключение

Основными направлениями франко-российского научно-технического сотрудничества в области теплофизики быстрых реакторов с натриевым теплоносителем являются экспериментальные и расчетные исследования теплогидравлических процессов в первом и втором циркуляционных контурах, включая различные компоненты оборудования (активная зона, промежуточный теплообменник, парогенератор, камеры смешения, натриевая полость реактора и т. д.), в номинальных, переходных и аварийных режимах, физико-химических процессов и технологии натриевого теплоносителя, разработка численных моделей процессов и их константного обеспечения, разработка средств диагностики и аварийной защиты.

Следует отметить в качестве перспективного направления двустороннего сотрудничества работу над инновационным проектом реакторной установки с натриевым реактором на быстрых нейтронах с использованием системы преобразования энергии, основанной на цикле Брайтона.

Работа по такому проекту проводится французскими специалистами совместно с компаниями ALSTOM Power, Rolls-Royce и т. д. В России также выполнены отдельные аналитические исследования по модульным быстрым реакторам с газотурбинным циклом (цикл Карно).

В дискуссии, состоявшейся на совещании РГ-3 «Технология» в июне 2015 года было отмечено, что российские и французские специалисты имеют общую точку зрения по поводу многообещающих перспектив разработки газотурбинного цикла для быстрых реакторов в сравнении с традиционным паротурбинным циклом. Обе стороны выразили заинтересованность в проведении совместных исследований по разработке газотурбинного цикла для быстрых реакторов. Первым шагом в этом направлении должен стать обмен мнениями и предложениями по возможным исследованиям в области указанной системы преобразования энергии для использования в ядерных приложениях.

Список литературы

- 1. Sorokin A.P., Latge C. Cooperation on Fast Reactors in the framework of WG-3 "Technology"// Report Presentation / VI meeting of the Coordinating Committee between the State Atomic Energy Corporation "Rosatom" and Commissariat on an atomic energy and alternative energy sources (CEA) of France, December 9-10, 2015. M.: SC «Rosatom» (unpublished).
- 2. Sorokin A.P., Latge C. Cooperation on Fast Reactors in the framework of WG-3 "Technology"// Report Presentation / VII meeting of the Coordinating Committee between the State Atomic Energy Corporation "Rosatom" and Commissariat on an atomic energy and alternative energy sources (CEA) of France, Paris, January 11-12, 2017. Paris: CEA, France (unpublished).

Информация об авторах

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, заместитель директора Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

Поплавский Владимир Михайлович, д-р техн. наук, проф., заместитель генерального директора по быстрым реакторам АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

- Труфанов Александр Анатольевич, заместитель директора
 - Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: tral@ippe.ru
- **Козлов Федор Алексеевич**, д-р техн. наук, проф., советник директора Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»
- **Кузина Юлия Альбертовна**, канд. техн. наук, заместитель генерального директора директор Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: ukuzina@ippe.ru
- Алексеев Виктор Васильевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ ФЭИ», e-mail: alexeev@ippe.ru
- **Латже Кристиан**, д-р техн. наук, профессор международного ядерного университета, международный эксперт координационной программы «Поколение-IV», директорат по ядерной энергетике, Департамент ядерной технологии, Ядерный исследовательский центр Кадараш, Комиссариат по атомной энергии и альтернативным источникам энергии (КАЭ), Франция, e-mail: Christian.latge@cea.fr

УДК 621.039.534

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТА РИФМА*

Н. И. Логинов, А. С. Михеев, Т. Н. Верещагина

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

Приводится описание концептуального проекта электрогенерирующей установки с атомным реактором, с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую за пределами активной зоны, охлаждаемой тепловыми трубами. Проект относится к установкам сверхмалой мощности: тепловая мощность от 100 до 1000 кВт, электрическая — от 10 до 100 кВт. Установка предназначается для объектов, удалённых от централизованного электроснабжения, в частности расположенных в Арктике. Преобразование тепловой энергии в электрическую осуществляется с помощью термофотоэлектрических преобразователей, работающих в инфракрасной области спектра. Активная зона реактора выполнена в виде независимых модулей, содержащих тепловыделяющие элементы, тепловые трубы и преобразователи энергии. Тепло передаётся от активной зоны реактора к преобразователям энергии высокотемпературными тепловыми трубами. Температура зоны конденсации тепловых труб, являющейся излучателем, составляет 1200 °С. В докладе рассматриваются теплофизические задачи, которые приходилось решать при разработке проекта.

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

Привлекательно использовать здесь известные полностью автономные космические ядерные установки БУК и ТОПАЗ с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую, но у них низкий КПД (до 7 %) и большие тепловые выбросы, ухудшающие экологическую обстановку. Разрабатываемые сейчас термоэмиссионные электрогенерирующие каналы могут обеспечить КПД преобразования 10–15 % при температуре эмиттера около 1600 °С. Машинные способы преобразования (циклы Ренкина, Брайтона, Стирлинга) обеспечивают более высокий КПД, но требуют обслуживания. Известно, что удельные технико-экономические характеристики установок малой мощности существенно хуже, чем у крупных установок. Поэтому требуются новые технические решения, не только удовлетворяющие потребности в электроэнергии, но и приемлемые экономически, обеспечивающие пассивную безопасность, не требующие обслуживания.

В ГНЦ РФ – ФЭИ [1] разработана концепция атомной энергетической установки сверхмалой мощности нового типа – проект РИФМА. Это Реактор Испарительный Фотоэлектрический Малой мощности Автономный, бассейнового типа, с электрической мощностью не менее 10 кВт, при тепловой мощности до 100 кВт. Он рассчитан на использование в зоне вечной мерзлоты – температура шахты реактора на границе с грунтом не выше нуля градусов. Срок службы без перегрузки активной зоны – до десяти лет. Другой вариант установки РИФМА рассчитан на электрическую мощность 100 кВт. Рассматривается вариант с электрической мощностью до 1 МВт.

^{*} Опубликовано в сборнике докладов на Научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2018)» под общей редакцией Ю.А. Кузиной, А.П. Сорокина. Технический редактор Н.А. Денисова. – г. Обнинск, ГНЦ РФ – ФЭИ, 16–18 мая 2018 г. – Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ – ФЭИ. – 2018. – С. 51–57.

Основные новшества проекта РИФМА:

- Испарительное охлаждение активной зоны с помощью высокотемпературных литиевых тепловых труб.
 - Фотоэлектрическое преобразование энергии.
 - Модульная конструкция активной зоны и преобразователей энергии.
- Полностью пассивная система охлаждения активной зоны, как в номинальном, так и в аварийном режиме работы.
- Полностью пассивная система отвода неиспользованного тепла низкотемпературными тепловыми трубами.

Идея охлаждения атомных реакторов с помощью тепловых труб высказана давно [2, 3]. Однако о реализации таких идей не было известно до конца двадцатого столетия. В Физико-энергетическом институте исследования и разработки тепловых труб интенсивно проводились с 1968 года. Основные результаты изложены в [4, 5]. В 1988–1997 годах был разработан технический проект экспериментальной реакторной установки, охлаждаемой по принципу тепловой трубы, и выполнен обширный объём исследований на электрообогреваемых теплофизических моделях [6]. Но эта работа не была доведена до конца. Один из недостатков проекта [6] состоит в том, что активная зона представляла собой одну паровую камеру и в случае её разгерметизации вся активная зона выходила бы из строя. Было ясно, что нужно разбить активную зону на отдельные автономные модули.

В работе [7] описана космическая атомная энергетическая установка SAIRS с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую, активная зона которой выполнена в виде отдельных модулей. Каждый модуль представляет собой тепловую трубу и три тепловыделяющих элемента, припаянных к ней. При разгерметизации одной или нескольких тепловых труб установка сохраняет работоспособность.

Одно из полезных свойств тепловых труб состоит в том, что они работают без энергоснабжения и каких-либо механизмов. В охлаждаемых тепловыми трубами реакторных установках с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую нет движущихся частей, кроме органов управления мощностью реактора. Для передачи тепла тепловыми трубами требуется в десятки раз меньше теплоносителя, чем в традиционных циркуляционных системах. В то же время передача тепла про-исходит практически в изотермических условиях, то есть температура потребителя тепла может быть увеличена почти до температуры источника, и при этом отсутствуют термомеханические напряжения в элементах активной зоны.

Солнечные батареи с фотоэлементами на основе кремния уже широко используются и обеспечивают КПД 15 % и более. Более сложные многопереходные фотоэлементы, используемые, в частности, на международной космической станции, имеют КПД 20–30 %, а в лабораторных образцах достигнуты значения КПД 40–45 % [8]. Разработаны и производятся за рубежом фотоэлементы, эффективно работающие в инфракрасной области спектра. Эти элементы получили название термофотоэлектрических или термофотовольтаических. По литературным данным [9] такие элементы на основе GaSb позволяют получить системный КПД около 20 % при работе с искусственными излучателями с температурой около 1500 К. Но рабочая температура термофотоэлементов должна быть не выше 60 °C, а, желательно, не выше 50 °C, так как КПД этих преобразователей снижается с ростом температуры. Поэтому их охлаждение нужно производить при малой разности температуры между элементом и конечным поглотителем тепла.

Таким образом, в проекте РИФМА имеют место две главные теплофизические задачи: отвод тепла от высокотемпературной (1200 °C) активной зоны и сброс неиспользованного тепла при низкой температуре (50 °C). Кроме того, необходимо свести к минимуму утечки тепла из активной зоны в воду. Эти задачи и рассматриваются в докладе.

Облик установки РИФМА

Основу установки РИФМА составляет атомный реактор с тепловым спектром нейтронов. Цилиндрический корпус реактора диаметром около 2,5 м и высотой около 8 м заполнен водой. Активная зона реактора погружена в воду на расстояние от дна около 1 м. Активная зона снабжена твёрдым (бериллиевым) замедлителем нейтронов с вертикальными отверстиями, в которых расположены модули, содержащие тепловыделяющие элементы и тепловые трубы. В зазорах между модулями и твёрдым замедлителем находится вода, выполняющая также функцию замедлителя и, кроме того, функцию теплоносителя, охлаждающего твёрдый замедлитель. Поперечное сечение активной зоны показано на рис. 1.

Активная зона содержит 37 модулей. Внешний диаметр корпуса модуля около 60 мм. Внутри корпуса расположена тепловая труба, выполненная из тугоплавкого металла, например, ниобиевого сплава. Внутри тепловой трубы расположены 7 тепловыделяющих элементов (твэл) Оболочка каждого твэла и внутренняя поверхность тепловой трубы снабжена капиллярной структурой — фитилём, заполненным литием. Тепловая труба имеет длину более 3 метров. Её верхняя часть — зона конденсации паров лития — является излучателем и окружена сборкой термофотоэлектрических преобразователей. Преобразователи расположены на внутренней поверхности корпуса модуля, охлаждаемого снаружи водой.

Выполнены нейтронно-физические расчёты 8 вариантов активной зоны реактора, но во всех вариантах использовалась одна и та же концепция, а именно: тепловой спектр нейтронов, низкообогащённое топливо, активная зона компонуется из отдельных, независимых друг от друга модулей, содержащих тепловые трубы, тепловыделяющие элементы и термофотопреобразователи. Система отвода неиспользованного тепла рассматривалась в двух вариантах: общая для всех модулей и автономная для каждого модуля.

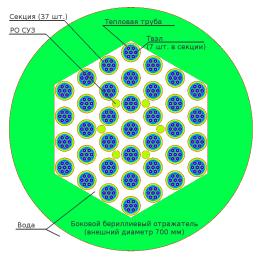


Рис. 1. Поперечное сечение активной зоны

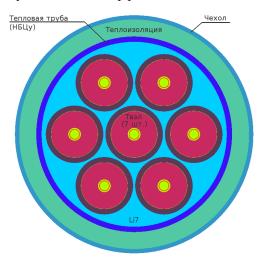
Охлаждение модулей активной зоны

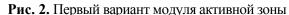
Первый вариант установки рассчитан на тепловую мощность 100 кВт. Топливо – диоксид урана с обогащением 19,75 %. Активная зона составлена из 37 модулей, в каждом из которых помещено по 7 тепловыделяющих элементов, расположенных внутри тепловой трубы, изготовленной из тугоплавкого металла, например, сплава НбЦУ. Диаметр трубы 46 мм, толщина стенки 1,5 мм. Оболочки тепловыделяющих элементов предполагалось выполнить из молибдена диаметром 13 мм. На наружной поверхности оболочки твэла и на внутренней поверхности тепловой трубы выполнены продольные канавки, представляющие собой капиллярную структуру для лития. Корпус модуля — чехол с наружным диаметром около 60 мм выполнен из циркониевого сплава Э110. В пространстве между тепловой трубой и чехлом помещена экранно-вакуумная изоляция из молибденовой или ниобиевой фольги. Поперечное сечение модуля показано на рис. 2. Высота активной части тепловыделяющих элементов 450–500 мм. В качестве теплоносителя тепловой трубы использован литий.

При тепловой мощности установки 100 кВт в модуле выделяется всего 2,7 кВт, а мощность одного тепловыделяющего элемента составляет всего 386 Вт. Радиальные тепловые потоки и перепады температуры во всех элементах модуля очень малы и не представляют теплофизических проблем. Проходное сечение для пара в тепловой трубе таково, что осевой удельный тепловой поток всего 2 кВт/см². Для литиевой тепловой трубы с рабочей температурой 1500 К это примерно на порядок величины меньше звукового предела мощности, переносимой тепловой трубой. Скорость пара также мала и нет опасности уноса жидкого теплоносителя с поверхности канавочной капиллярной структуры встречным потоком пара. Выше активной зоны тепловая труба может быть сужена до диаметра около 14 мм, при котором проходное сечение для пара ещё вполне достаточно.

Реакторное излучение отрицательно влияет на работоспособность термофотоэлементов, и они должны быть отнесены от центра активной зоны примерно на два метра. Поэтому общая длина тепловой трубы будет более 3 метров.

Кроме семиэлементного модуля, показанного на рис. 2, рассмотрены ещё несколько вариантов исполнения модулей активной зоны. Нейтронно-физические расчёты показали, что центральный тепловыделяющий элемент в семиэлементном модуле не очень эффективен, и от него можно отказаться. На рис. 3 представлена





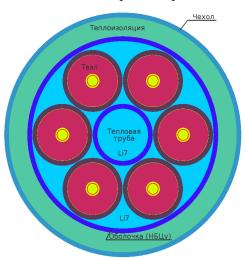


Рис. 3. Шестиэлементный модуль

другая конструкция модуля, содержащая только шесть тепловыделяющих элементов. Количество модулей и компоновка активной зоны остались прежними. Вместо центрального тепловыделяющего элемента помещена тепловая труба. Оболочки тепловыделяющих элементов не имеют капиллярной структуры, что упрощает их конструкцию и повышает надёжность. Тепловая труба и тепловыделяющие элементы заключены в тугоплавкую оболочку, заполненную жидким литием, передающим тепло к тепловой трубе. Число твэлов в модуле может быть различным, оптимальным оказалось четыре.

Во всех вариантах реакторной установки основные теплофизические задачи, перечисленные во введении, одни и те же. Их рассмотрение проведено на примере первого варианта с шестью твэлами.

Теплофизический расчёт модуля с 6 тепловыделяющими элементами

Исходные данные для расчёта приведены в таблице.

Расчет температурного поля проводился в среде SolidWorksFlowSimulation. При выполнении расчетов предполагалось, что литий полностью смачивает твэлы и корпус тепловой трубы, то есть имеет место идеальный тепловой контакт между жидкостью и твердым телом. На рис. 4 изображено поле температуры в срединном сечении зоны подвода тепла. Плотность теплового потока на стенке тепловой трубы в зоне подвода тепла составляет $0,147~{\rm MBt/m^2}$. Максимальная температура в топливе $-1255~{\rm ^{\circ}C}$. Таким образом, максимальный перепад температуры между топливом и паром лития в тепловой трубе равен $55~{\rm ^{\circ}C}$. Температура внешней поверхности оболочки $-1228~{\rm ^{\circ}C}$.

Для снижения потерь тепла с оболочки, внутри которой находятся твэлы, на корпус электрогенерирующего модуля, охлаждаемого водой, используется экранновакуумная теплоизоляция. В качестве экранов используются цилиндры, свернутые из ниобиевой фольги толщиной 0,1 мм. Экраны располагаются с шагом 0,4 мм, количество экранов – 9. Дистанционирование экранов осуществляется с помощью выполненных на них пуклевок.

T			
Исходные	ланные	лля	расчета

Параметр	Значение
Количество тепловыделяющих элементов	6
Мощность тепловыделяющего элемента, кВт	0,45
Тепловая мощность модуля, кВт	2,7
Температура пара в тепловой трубе, °С	1200
Топливная композиция UO ₂ с обогащением	19,75 %
Объёмное энерговыделение в топливе, МВт/м ³	10,5
Диаметр твэла ($D \times \delta$), мм	13×1
Диаметр тепловой трубы ($D \times \delta$), мм	13×1
Диаметр оболочки ($D \times \delta$), мм	41,5×1
Рабочая жидкость тепловой трубы	Li-7
Жидкость между твэлами	Li-7
Высота активной зоны, мм	450
Конструкционный материал	Сплав МЧВП

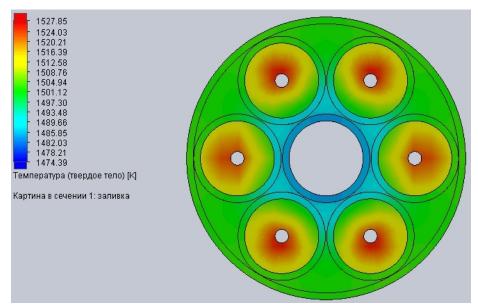


Рис. 4. Поле температуры в среднем сечении модуля

Интегральная степень черноты ниобия $\epsilon_{Nb} = 0,19$, молибдена $\epsilon_{Mo} = 0,166$ и полированной нержавеющей стали $\epsilon_{steel} = 0,155$. Температуры оболочки и охлаждающей корпус воды при расчетах приняты равными 1200 и 60 °C. Распределение температуры по экранам, полученное в результате численного решения системы уравнений, приведено на рис. 5. Тепловой поток через экраны по высоте активной зоны составляет 176 Вт. Таким образом, прямые тепловые потери в активной зоне не превышают 7 % мощности, переносимой тепловой трубой. Разумеется, что транспортная зона тепловой трубы длиной около 2 метров также теплоизолирована. Поскольку радиальный кольцевой зазор между тепловой трубой и чехлом модуля значительно больше, чем в активной зоне, то здесь размещается большее число экранов и потери тепла с единицы поверхности транспортной зоны тепловой трубы, соответственно, меньше.

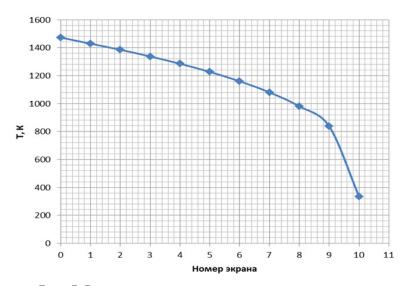


Рис. 5. Распределение температуры в теплоизоляции

Охлаждение преобразователей энергии

В зоне конденсации тепловой трубы тепло излучается на термофотоэлектрические преобразователи, расположенные вокруг неё с радиальным зазором около 5 мм. При температуре 1500 К абсолютно чёрное тело излучает более 28 Вт с квадратного сантиметра. При степени черноты 0,9 тепловой поток будет около 25 Вт/см². Чтобы сбросить 2,7 кВт тепла излучатель должен иметь длину около 400 мм при диаметре 20 мм. Для получения указанной степени черноты излучающая часть тепловой трубы должна иметь специальное покрытие. Это может быть карбид кремния SiC или смешанный оксид NiOMgO. При расположении фотопреобразователей на диаметре 30 мм падающий на них тепловой поток будет около 17 Вт/см². Современные термофотопреобразователи позволяют получать электрическую мощность 1–2 Вт/см². Коэффициент полезного действия этих преобразователей при температуре 1500 К составляет 10–20 %. Даже при наименьшем значении КПД падающий на преобразователи тепловой поток удовлетворит их потребность. Однако, как уже говорилось, температура фотопреобразователей должна быть около 50 °C, а конечным поглотителем тепла должен быть атмосферный воздух.

Эта задача представляется одной из наиболее сложных, поскольку требуется сбрасывать достаточно большое количество тепла при малой разности температур источника и поглотителя. Тепло необходимо сбрасывать пассивными средствами, без применения принудительной циркуляции хладагента. Фотопреобразователи располагаются на медной подложке толщиной около 2 мм, вставленной в корпус модуля из сплава Э110 толщиной 1 мм. При идеальном тепловом контакте перепад температуры на стенке составит 5–7 градусов. Способ отвода тепла от корпуса модуля к конечному поглотителю в настоящее время ещё не выбран.

Заключение

Выполненная концептуальная проработка реакторной установки РИФМА с тепловой мощностью от 100 кВт до 1 МВт представляется реализуемой. При конструкторской разработке конкретного проекта установки потребуется обратить особое внимание на систему сброса неиспользованного тепла. Следует заметить, что эта же система сброса тепла будет использоваться и при аварийном охлаждении установки, когда преобразователи энергии полностью, или частично, не работают.

Список литературы

- 1. Патент РФ 2650885, МПК G21C1/02. Ядерный реактор с прямым преобразованием энергии за пределами активной зоны / Логинов Н.И., Пышко А.П., Михеев А.С., Денежкин И.А. 2018.
- 2. Патент GB785886, MПКF22D1/26, G11B15/26, G21C15/02. Impruvments in orrelating to Nuclear Reactors / Ritz H.L. 1957.
- 3. Патент GB1149946, МПК G21C15/02, G21C3/322/ Nuclear Reactor / Fiebelmann P. 1969.
- 4. *Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В.* Физические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1978.
- 5. *Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Чулков Б.А., Ягодкин И.В.* Технологические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1980.

- 6. Loginov N.I. Development experience for experimental reactor facility cooled with evaporating liquid metals / Intern. Conf. on Fast Nuclear Reactors and Related Fuel Cycles. Yekaterinburg, 2017.
- 7. *El-Genk M.S.*, *Tournier J.-M.E.* "SAIRS" Scalable AMTEC Integrated Reactor Space Power System // Progress in Nuclear Energy. 2004. V. 45. N 1. P. 25–59.
- 8. *Andreev V.M.* An overview of TPV cell technologies // AIP Conference Proceedings. AIP. 2003. V. 653. N 1. P. 289–304.
- 9. *Bauer T.* Thermophotovoltaics: basic principles and critical aspects of system design // Springer Science & Business Media. 2011.

Информация об авторах

Логинов Николай Иванович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник

Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: loginov@ippe.ru

Михеев Александр Сергеевич, начальник лаборатории

Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: mikheyev@ippe.ru

Верещагина Татьяна Николаевна, д-р техн. наук, главный научный сотрудник

Отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»,

249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», e-mail: vtn@ippe.ru

УДК 001.31:53

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ТЕПЛОФИЗИКА РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ (ТЕПЛОФИЗИКА – 2015)»*

А. П. Сорокин, Т. Н. Верещагина, А. А. Труфанов

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

В статье представлены итоги работы научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2015)». Перечислены организации-участники, приведен аналитический обзор представленных докладов, связь их тематики с выполнением Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 – 2015 годов и на перспективу до 2020 года», отражено участие в работе конференции молодых участников. Представлен анализ докладов конференции. Участники конференции обсудили широкий спектр проблем в области теплофизики ядерных энергетических установок. Были представлены результаты исследований в обоснование систем и элементов конструкций, а также безопасности реакторов на быстрых и на тепловых нейтронах. Научное сообщество ознакомилось с результатами, полученными на предприятиях Госкорпорации «Росатом», а также в смежных организациях и ВУЗах, по реакторам, охлаждаемых как жидкометаллическими теплоносителями, так и охлаждаемых водой, в области гидродинамики и теплообмена в различных узлах оборудования реакторных установок, их безопасности, физхимии и технологии теплоносителей, методов и программ расчета. Сделан вывод о важной роли научно-технических конференций как площадки для плодотворных научных дискуссий, поиска оптимальных технических решений и как средства для обмена знаниями и их сохранения.

Проходивший с 6 по 16 октября 2015 года в ГНЦ РФ – ФЭИ при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований научно-технический форум «Нейтронно-физические и теплофизические проблемы ядерной энергетики» объединил две конференции: «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2015)» и «Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики (Нейтроника – 2015)».

Первая научно-техническая конференция, посвященная использованию жидких металлов в качестве теплоносителей ядерных энергетических установок, была проведена в Физико-энергетическом институте в 1955 году. Научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2015)» – это сороковое мероприятие, проведенное в институте под ставшим уже традиционным названием «Теплофизика».

Ужесточение требований к безопасности разрабатываемых и эксплуатируемых ядерных энергетических установок, необходимость повышения конкурентоспособности и расширения рынка ядерной энергетики, выдвигают новые научные и технические задачи. Для решения этих задач необходимы глубокие знания теплофизических и физико-химических процессов, позволяющие создавать и внедрять новые, передовые технологии ядерной энергетики.

^{*} Опубликовано в журнале «Вопросы атомной науки и техники». Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2017. Вып. 2. – С. 208–222. – Эл. ресурс: http://vant.ippe.ru/archiv/year2017.html

Сегодня проблемами, так или иначе связанными с теплофизикой и технологией теплоносителей, занимается ряд научных коллективов в организациях и на предприятиях Госкорпорации «Росатом», Российской Академии наук, Министерства образования и науки, различных министерств и ведомств Российской Федерации. Поэтому в работе конференции кроме 93 специалистов АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» приняли участие 77 ученых и специалистов из 22 организаций. Среди них: Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Инновационно-технологический центр проекта «Прорыв» (ЧУ «ИТЦП «ПРОРЫВ»), г. Москва, АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежаля» (АО «НИКИЭТ»), г. Москва, АО «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), г. Нижний Новгород, АО «Опытное конструкторское бюро «Гидропресс» (АО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), г. Подольск, АО «Красная Звезда», г. Москва, АО «Всероссийский Научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (АО «ВНИИАЭС»), г. Москва, ГНЦ ФГУП «ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей», г. Санкт-Петербург, Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Белоярская атомная станция», г. Заречный, Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), г. Москва, Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), г. Москва, АО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций (АО «ЭНИЦ»), г. Электрогорск, Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт машиноведения им. А.А. Благонравова (ИМАШ РАН), г. Москва, Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), г. Москва, Федеральное государственное бюджетное учреждение Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), г. Москва, Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН), г. Москва, Новосибирский филиал ИБРАЭ РАН, г. Новосибирск, Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), г. Москва, Институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ИАТЭ НИЯУ МИФИ),



Участники XXXX научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2015)»

г. Обнинск, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»), г. Москва, ФГБОУ ВПО «Московский Государственный Индустриальный Университет» (ФГБОУ ВПО «МГИУ»), г. Москва, Московский государственный технический университет имени им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва.

1. Тематика конференции

На конференции был заслушан 121 доклад. На пленарных заседаниях были рассмотрены результаты, достигнутые в рамках реализации новой технологической платформы ядерной энергетики (ЧУ «ИТЦП «ПРОРЫВ»), состояние разработки проекта быстрого реактора большой мощности (АО «ОКБМ Африкантов»), актуальные теплофизические проблемы технологии реакторов с натриевым теплоносителем на современном этапе ее развития, современное состояние и перспективы развития технологии технология тяжелых жидкометаллических теплоносителей: состояние дел и перспективы развития (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), аварийные режимы теплообмена в термоядерном реакторе (НИУ «МЭИ»), проблемы теплообмена в современных проектах реакторных установок (АО «ВНИИАЭС»).



Открытие конференции. Участников конференции приветствует председатель программного комитета Форума, научный руководитель ГНЦ РФ – ФЭИ, член-корреспондент РАН В.И. Рачков

В научных докладах, представленных на секциях конференции, нашло отражение состояние работ и задачи исследований, связанных с научно-техническим обоснованием реакторов нового поколения на тепловых и быстрых нейтронах с различными жидкометаллическими теплоносителями по широкому кругу ключевых теплофизических проблем в области гидродинамики и теплообмена в различных узлах оборудования реакторных установок, их безопасности, физхимии и технологии теплоносителей. В докладах также представлено современное состояние фундаментальных и прикладных исследований процессов тепломассопереноса и свойств жидких металлов.

На конференции работали следующие секции:

физико-химические характеристики и теплофизические свойства жидкометаллических теплоносителей;

- экспериментальные и расчетные исследования гидродинамики и теплообмена в обоснование повышения эффективности и безопасности водо-охлаждаемых реакторов;
- исследования в обоснование нового поколения водо-водяных энергетических реакторов со сверхкритическими параметрами пара;
- гидродинамика и теплообмен в реакторах с жидкометаллическими теплоносителями;
 - методы и средства контроля;
 - массоперенос и технология жидкометаллических теплоносителей;
 - структура потоков, виброакустика гетерогенных сред;
 - расчетные модели, коды и результаты расчетных исследований;
 - исследования в обоснование инновационных технологий.



Заседание конференции в большом конференц-зале

2. Анализ содержания секционных докладов

Около 40 % от общего числа докладов было представлено по тематике реакторов, охлаждаемых жидкометаллическими теплоносителями, около 25 % — по тематике водоохлаждаемых ядерных реакторов. Количество докладов, посвященных разработке новых методов и кодов теплогидравлического расчета, составило около 20 %, докладов по использованию жидких металлов в термоядерном реакторе и инновационных нереакторных технологиях — около 15 %.

Наибольшее количество докладов было представлено в секциях: «Гидродинамика и теплообмен в реакторах с жидкометаллическими теплоносителями» и «Расчетные модели, коды и результаты расчетных исследований», тематика которых соответствует актуальным задачам в области теплофизического обоснования безопасности ядерных реакторов нового поколения.

В докладах секций были представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамических процессов и теплообмена жидких металлов в условиях, приближенных к реакторным. Большое внимание было уделено вопросам изучения процессов массопереноса и технологии жидкометаллических теплоносите-

лей, очистки натриевого теплоносителя от примесей, а также методам и средствам контроля теплофизических характеристик. Представлены доклады по физико-химическим и теплофизическим свойствам жидкометаллических теплоносителей, использующихся в действующих и перспективных реакторах. Актуальной проблемой, с точки зрения повышения ресурса ЯЭУ, является взаимодействие теплоносителя и конструкционных элементов. В связи с этим были рассмотрены вопросы коррозии материалов в жидких металлах, теплофизических свойств сталей. Ряд докладов отражал результаты работ, поддержанных грантами РФФИ.

Основой проектирования вновь создаваемых атомных и термоядерных реакторов является теплогидравлический расчет активной зоны. Анализ материалов конференции показывает, что продолжаются работы по освоению зарубежных кодов, разработка отечественных расчетных кодов трехмерного моделирования теплогидравлических процессов в ядерных реакторах, их тестированию и верификации, а также по их практическому использованию при обосновании проектных решений и безопасности. В проектных и исследовательских организациях (АО «ОКБ «Гидропресс», АО «ОКБМ Африкантов», РНЦ «Курчатовский институт», ИАТЭ НИЯУ «МИФИ», НИЯУ «МИФИ» и др.) освоены и успешно применяются зарубежные расчетные коды для численного моделирования трехмерных течений жидкостей и газов. Практически важной и актуальной является задача обоснования безопасности парогенераторов реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем при наличии межконтурной течи. Представлен ряд докладов по программам (кодам), разрабатываемым для обоснования безопасности парогенераторов, как с натриевым, так и со свинцовым теплоносителем.

Важными, как с точки зрения уточнения замыкающих соотношений расчетных кодов различного класса, так и их верификации, являются работы по созданию отечественной базы экспериментальных данных. В связи с этим актуальны исследования, выполняемые на стендах, позволяющих проводить эксперименты в широком диапазоне режимных параметров, и получать данные, необходимые для верификации результатов и методов численного моделирования.

Экспериментальным исследованиям локальных характеристик гидродинамики и теплообмена были посвящены доклады, представленные сотрудниками НГТУ им. Р.Е. Алексеева, АО «ОКБМ Африкантов», АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», АО «ОКБ «Гидропресс», МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИУ «МЭИ», ОИВТ РАН и др. При этом, судя по докладам, используется арсенал апробированных технических средств (датчиков) для определения локальных характеристик потока. С сожалением можно констатировать, что в России пока не достаточно широко используются лазерная и оптоволоконная техника, томографы и другие технические средства, обеспечивающие прецизионный уровень измерений локальных характеристик и визуализации при моделировании пространственных процессов в ядерных реакторах, необходимый для подтверждения трехмерных расчетных кодов.

Основной объем результатов исследований для реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем представлен по наиболее актуальным вопросам безопасности, в том числе, результаты экспериментов по теплообмену при кипении натрия в модели ТВС в аварийных режимах, деградации модельных топливных сборок при авариях с потерей расхода натрия, моделирования термического взаимодействия кориума с натрием в процессе развития тяжелой аварии, аварийного расхолаживания с использованием встроенных в бак реактора теплообменников, течи воды в натрий, натриевых пожаров, водородной безопасности и т. д. В докладах, представленных на секциях «Методы и средства контроля», «Массоперенос и технология жидкометаллических теплоносителей» большое внимание уделено изучению процессов массопереноса и технологии жидкометаллических теплоносителей, очистки натриевого теплоносителя от примесей, а также методам и средствам контроля теплофизических характеристик.

В секции «Исследования в обоснование инновационных технологий» были заслушаны результаты исследований по применению жидкометаллических теплоносителей (ЖМТ) для термоядерных установок, неядерному использованию ЖМТ для получения синтез-газа, пресной воды, наноматериалов с заданными свойствами, переработки радиоактивных отходов. Показано, что эти результаты могут быть положены в основу создания инновационных разработок (проектов) энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий.

Два секционных заседания были посвящены научно-техническим проблемам повышения безопасности и эффективности водоохлаждаемых реакторов. Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований теплогидравлических характеристик элементов активной зоны водоохлаждаемых ядерных реакторов, полученные за последнее время. В ряде докладов были представлены результаты исследований теплоотдачи при движении воды сверхкритического давления в условиях, моделирующих элементы реакторных установок со сверхкритическими параметрами водяного пара (ВВЭР-СКД), проведен анализ особенностей термодинамических циклов АЭС с РУ ВВЭР-СКД, приведены результаты экспериментального и численного моделирования теплообмена и устойчивости течения теплоносителя в активной зоне таких реакторов. Сформулированы проблемы, требующие решения. Отмечается интенсивное развитие работ по созданию реакторов со сверхкритическими параметрами воды (SCWR или ВВЭР-СКД) за рубежом. Отмечено, что Россия, занимавшая передовые позиции по данной проблеме в 20-м и в начале 21-го века, на настоящем этапе теряет свое лидирующее положение.

В секции «Структура потоков. Виброакустика неоднородных сред» представлены результаты исследований по влиянию геометрических факторов на формирование вихревых структур в коллекторных системах ядерных реакторов с тяжёлыми теплоносителями. Представлены результаты измерений локальных характеристик потока в оребренных трубах, применяемых в системах аварийного отвода тепла, результаты по экспериментальному определению интегральных и структурных характеристик двухфазных потоков при течении в вертикальных каналах в условиях естественной циркуляции. Полученные экспериментальные данные дополняют верификационные базы расчетных теплогидравлических кодов улучшенной оценки, применяемых при проектировании и обосновании безопасности водоохлаждаемых ЯЭУ, в части моделирования контуров с естественной циркуляцией двухфазных потоков. Представлены результаты экспериментальных исследований структуры двухфазного потока в условиях действия периодических поперечных сил в условиях естественной циркуляции, с помощью передовых оптических методов (PIV).

Представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований гидродинамически возбуждаемых вибраций тепловыделяющих элементов. Результаты теоретических исследований в области вибрационной динамики гетерогенных сред позволяют моделировать распространение звука и вибрации в различных классах сложного теплообменного оборудования ЯЭУ.

3. Итоги конференции

В решении конференции отмечено, что сокращение финансирования теплофизических исследований для реакторов с ЖМТ, безусловно, привело к сужению фронта исследований и объема выполняемых работ. Однако, на основании докладов конференции можно констатировать, что Россия продолжает оставаться лидером в области использования жидких металлов в качестве теплоносителей ядерных энергетических установок.

Устойчивое развитие отрасли и расширение сферы мирного использования ядерной энергии невозможно без передачи молодому поколению ученых и инженеров накопленного за 70-летнюю историю ядерной энергетики объема знаний и опыта. Для поддержки молодежи оргкомитет обеспечил льготные условия участия в конференции аспирантов и студентов ВУЗов, организовал конкурс докладов молодых авторов. В результате, в работе конференции приняли участие 39 молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов. По представлению председателей секций 10 молодых участников были награждены дипломами и памятными подарками за лучшие доклады.

К началу конференции был издан сборник тезисов докладов [1], в котором приведен перечень теплофизических конференций, проведенных в институте за прошедшие 60 лет. Участники конференции также получили сборники полных текстов докладов предыдущей конференции, «Теплофизика – 2014», выпущенные на CD [2].

Участники конференции выразили благодарность организационному и программному комитетам конференции за четкую организацию и проведение мероприятия, а также отметили необходимость подобных конференций как незаменимых площадок для дискуссий, полемики, обмена опытом и распространения знаний.



Интервью журналистам Обнинского телевидения дает заместитель генерального директора АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» по быстрым реакторам Поплавский В.М.



С докладом выступает главный конструктор проекта реакторной установки БН-1200 Шепелев С.Ф.



Награды победителям конкурса докладов молодых ученых вручает заместитель генерального директора — директор отделения безопасности ЯЭУ AO «ГНЦ РФ — ФЭИ» Труфанов А.А.

Заключение

Сороковая научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2015)», проведенная в ГНЦ РФ – ФЭИ, прошла на высоком научном и организационном уровне во многом благодаря финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-20823).

Работа конференции способствовала выявлению и систематизации результатов фундаментальных научных исследований, проводимых в ВУЗах, в отраслевых и академических НИИ по следующим направлениям исследований:

- физико-химическое взаимодействие жидких металлов и конструкционных материалов;
- поиск новых методов интенсификации теплообмена и повышения КПД термодинамических циклов;
- теплогидравлическое обоснование активных зон и конструкторских решений для реакторов нового поколения;
- совершенствование методов измерений, приборов и датчиков для проведения экспериментальных исследований процессов тепло- и массообмена в элементах и системах ЯЭУ;
 - гидродинамически возбуждаемые вибрации элементов конструкций ЯЭУ;
- виброакустическая динамика гетерогенных сред; а также других научных проблем, необходимых для разработки технологий ядерных реакторов нового поколения и неядерных применений жидких металлов.

В докладах конференции нашли отражение результаты решений наиболее актуальных научно-технических проблем и задач по разработке и обоснованию новых научно-технических, технологических и конструкторских решений, а также безопасности реакторов нового поколения (таких как БН-1200, МБИР, БРЕСТ-ОД-300, ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ, ВВЭР-СКД и др.), поставленных перед научным сообществом Федеральной Целевой Программой «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010—2015 годов и на перспективу до 2020 года».

Участниками конференции на заключительном пленарном заседании принято решение конференции, которое направлено руководству Госкорпорации «Росатом». По результатам работы конференции можно сделать вывод, что Россия продолжает занимать лидирующие позиции в области использования жидких металлов в качестве теплоносителей ядерных энергетических установок.

Список литературы

- 1. Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика 2015) / Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика 2015)», 06–09 октября 2015 г., г. Обнинск. Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ ФЭИ, ISBN 978-5-906512-70-3, 2015. 274 с.
- 2. Сборник докладов «Теплофизика реакторов на нового поколения» (Теплофизика 2015). 06–09 октября 2015 г., г. Обнинск. Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ ФЭИ, 2016. 710 с. электронное издание.

Информация об авторах

Сорокин Александр Павлович, д-р техн. наук, заместитель директора

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: sorokin@ippe.ru

Верещагина Татьяна Николаевна, д-р техн. наук, главный научный сотрудник

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: vtn@ippe.ru

Труфанов Александр Анатольевич, заместитель директора

Отделения безопасности ядерно-энергетических установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», e-mail: tral@ippe.ru

Результаты исследований

Научной школы по тепломассопереносу, физической химии и технологии теплоносителей в энергетических системах, обобщенные в монографиях

- 1. Жидкие металлы / Сборник статей под редакцией П.Л. Кириллова, В.И. Субботина, П.А. Ушакова. М.: Атомиздат. 1967.
- 2. Багдасаров Ю.Е., Пинхасик М.С., Кузнецов И.А., Козлов Ф.А. и др. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах / Под редакцией Ю.Е. Багдасарова. М.: Атомиздат. 1969.
- 3. Зенкевич Б.А., Песков О.Л., Петрищева Г.А., Сергеев Н.Д., Субботин В.И. Анализ и обобщение опытных данных по кризису теплообмена при вынужденном течении кипящей воды в трубах. М.: Атомиздат. 1969.
- 4. Субботин В.И., Сорокин Д.Н., Овечкин Д.М., Кудрявцев А.П. Теплообмен при кипении металлов в условиях естественной конвекции. М.: Наука. 1969.
- 5. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. М.: Атомиздат. 1970.
- 6. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М.: Атомиздат. 1975.
- 7. Сидоров В.И., Логинов Н.И., Козлов Ф.А. Элементы теплофизики в атомных энергетических установках. М.: Атомиздат. 1975.
- 8. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Субботин В.И. Испарение и конденсация металлов. М.: Атомиздат. 1976.
- 9. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В. Физические основы тепловых труб. М.: Атомиздат. 1978.
- 10. Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.П., Таранов Г.С., Сабелев Г.И. Структура Турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. М.: Атомиздат. 1978.
- 11. Турчин Н.М., Дробышев А.В. Экспериментальные жидкометаллические стенды. М.: Атомиздат. 1978.
- 12. Ушаков П.А., Жуков А.В., Мантлик Ф., Гейна Я. и др. Исследование термодинамических характеристик в правильных и деформированных решетках твэлов быстрых реакторов. М: Изд-во СЭВ. 1978.
- 13. Субботин В.И., Кащеев В.М., Номофилов Е.В., Юрьев Ю.С. Решение задач реакторной теплофизики на ЭВМ. М.: Атомиздат. 1979.
- 14. Логинов Н.И. Электромагнитные преобразователи расходов жидких металлов. М.: Энергоатомиздат. 1981.
- 15. Ivanovskii M.N., Sorokin V.P. and Yagodkin I.V. The Physical Principles of Heat Pipes. –Translated by R. Berman and G. Rice. Oxford: Clarendon Press. 1982.
- 16. Кривцов В.А., Масагутов Р.Ф. Высокотемпературные акустические датчики с органосиликатной изоляцией. Л.: Наука. 1982.
- 17. 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.
- 18. Кириллов П.Л., Ушаков П.А., Жуков.А.В., Матюхин Н.М., Сорокин А.П., Тихомиров Б.Б., Юрьев Ю.С. (СССР), Кретг В. Мантлик Ф., Гейна Я., Шмид В. (ЧССР) Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов. М.: Энергоатомиздат. 1985.
- 19. Галин Н.М., Кириллов П.Л. Тепломассообмен (в ядерной энергетике). М.: Энергоатомиздат. 1987.
- 20. Мантлик Ф., Шмид В., Мильбауэр П., Пеха П. (ЧССР), Жуков А.В., Ушаков П.А., Сорокин А.П., Юрьев Ю.С., Богословская Г.П., Колмаков А.П., Титов П.А.,

- Тихомиров Б.Б. (СССР) Методы и программы теплогидравлического расчета сборок твэлов быстрых реакторов. Прага: Центр ядерной информации. 1987.
- 21. Бобков В.П. Статистические измерения в турбулентных потоках. М.: Энергоатомиздат. 1988.
- 22. Митенков Ф.М., Головко В.Ф., Ушаков П.А., Юрьев Ю.С. Проектирование теплообменных аппаратов АЭС / Под ред. Ф.М. Митенкова. М.: Энергоатомиздат. 1988.
- 23. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов (теоретические основы и физика процессоов). М.: Энергоатомиздат. 1989.
- 24. Кокорев Б.В., Фарафонов В.А. Парогенераторы ядерных энергетических установок с жидкометаллическим охлаждением / Под общ. ред. П.Л. Кириллова. М.: Энергоатомиздат. 1990.
- 25. Поплавский В.М., Козлов Ф.А. Безопасность парогенераторов натрий-вода. М.: Энергоатомиздат. 1990.
- 26. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов (расчетные программы и практическое приложение). М.: Энергоатомиздат. 1991.
- 27. Субботин В.И. Размышления об атомной энергетике. Санкт-Петербург: РАН ОЭЭП. 1995.
- 28. Субботин В.И., Арнольдов. М.Н., Ивановский М.Н., Мосин А.А., Тарбов А.А. Литий. М.: ИздАТ. 1999.
- 29. Жидкие металлы: от первого теплофизического стенда к крупномасштабной атомной энергетике / Под ред. А.Д. Ефанова, Ф.А. Козлова. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. 2001.
- 30. Игнатов В.И., Иванов В.Н., Бильдер З.П., Шарыпин В.И. Адиабатные испарители. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. 2001.
- 31. Фролов К.В., Махутов Н.А., Каплунов С.М., Смирнов Л.В., Федотовский В.С. и др. Динамика конструкций гидроаэроупругих систем / Под ред. С.М. Каплунова, П.В. Смирнова. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова. М.: Наука. 2002.
- 32. Дзюбенко В.В., Кузма-Китча Ю.А., Кутенков А.М., Свириденко И.П., Федик И.И., Харитонов В.В., Холпанов Л.П. Интенсификация тепло- и массопереноса в энергетике. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ». 2003.
- 33. Кузнецов И.А., Поплавский В.М. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах / Под общей редакцией члена-корреспондента АН РФ В.И. Рачкова. М.: Из- π AT 2012
- 34. Арнольдов М.Н., Каржавин В.А., Трофимов А.И. Основы метрологического обеспечения температурного контроля реакторных установок. М.: Изд. дом МЭИ, 2012.
- 35. Кириллов П.Л. Имена и числа подобия (очерки о русских ученых). М.: ИздАТ, 2013.
- 36. Теплофизическая стендовая база по атомной энергетике ГНЦ РФ ФЭИ. Под общей редакцией О.Ф. Кухарчука, А.П. Сорокина, А.А. Труфанова, В.Л. Чернонога. Обнинск: ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», 2014.
- 37. Арнольдов М.Н., Соловьев В.А., Комраков Г.С., Шорина Л.М. Растворимость элементов в жидком свинце. М.: ИздАТ, 2015.
 - 38. Рачков В.И. Основы теории опасных систем. М.: Наука, 2015.
- 39. Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н. Особенности гидродинамики проточных частей коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2016.
- 40. Теплофизическая стендовая база атомной энергетики России и Казахстана. Редакционная коллегия В.А. Першуков, А.В. Архангельский, О.Е. Кононов, А.П. Сорокин. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016.

Обобщение опыта сотрудников

Научной школы в учебно-педагогической работе в ВУЗах и техникумах и при подготовке специалистов высшей квалификации в учебных пособиях

- 1. Кириллов П.Л. Курс лекций «Теория теплообмена» (в 2-х книгах): Учебное пособие. Обнинск: Изд. Вечернего отделения МИФИ. 1961.
- 2. Кириллов П.Л. Конвективный теплообмен в однофазных средах. Конспекты курса «Теплообмен», выпуск 1: Учебное пособие. Обнинск: Обнинский филиал МИФИ. 1972.
- 3. Кириллов П.Л. Конвективный теплообмен в однофазных средах. Конспекты курса «Теплообмен», выпуск 2: Учебное пособие. Обнинск: Обнинский филиал МИФИ. 1972.
- 4. Кириллов П.Л. Задачи по тепломассообмену: Учебное пособие. Министерство высшего и среднего образования. Обнинск: ОИАТЭ 1985.
- 5. Кириллов П.Л., Галин Н.М. Сборник задач по теплопередаче: Учебное пособие. Министерство высшего и среднего образования. М.: МЭИ. 1985.
- 6. Галин Н.М., Кириллов П.Л. Тепломассообмен (в ядерной энергетике): Учебник для ВУЗов. М.: Энергоатомиздат. 1987.
- 7. Кириллов П.Л. Методическое пособие «Теплофизические свойства материалов ядерной техники» для решения задач по курсу «Теплопередача и теплообмен в ядерных энергетических установках»: Учебное пособие. Министерство высшего и среднего образования. Обнинск: ОИАТЭ. 1987.
- 8. Кириллов П.Л., Галин Н.М. Тепломассообмен (в ядерной энергетике): Учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат. 1987.
- 9. Кириллов П.Л. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Методическое пособие для решения задач по курсу «Теплопередача и теплообмен». Обнинск: ОИАТЭ. 1987.
- 10. Кириллов П.Л., Жуков А.В. Современные методы теплогидравлического расчета тепловыделяющих сборок реакторов: Учебное пособие. Государственный комитет СССР по народному образованию. Обнинск: ОИАТЭ-ФЭИ. 1988.
- 11. Юрьев Ю.С. Проектная теплогидравлическая номограмма ядерных реакторов: Учебное пособие по курсу «Теплогидравлический расчет реакторов». Обнинск: ИАТЭ-ФЭИ. 1989.
- 12. Юрьев Ю.С. Перегрев твэлов вследствие случайных отклонений параметров. Учебное пособие по курсу «Теплогидравлический расчет реакторов»: Обнинск: ИАТЭ-ФЭИ. 1989.
- 13. Жуков А.В., Сорокин А.П., Худаско В.В. Влияние теплогидравлических факторов на безопасность ТВС реакторов: Учебное пособие для слушателей КПК СП руководящих работников Минатомэнерго СССР с студентов спец. 10.10. Обнинск: ОИАТЭ. 1990.
- 14. Жуков А.В., Сорокин А.П., Худаско В.В. Проблемы теплогидравлики неноминальных режимов работы ТВС реакторов с жидкометаллическим охлаждением: Учебное пособие для слушателей курсов повышения квалификации и специального факультета. Обнинск: ОИАТЭ. 1990.
- 15. Богословская Г.П., Жуков А.В., Сорокин А.П., Худаско В.В. Проблемы оптимизации теплогидравлики ТВС активных зон реакторов с жидкометаллическим охлаждением: Учебное пособие для слушателей курсов повышения квалификации и специального факультета. Обнинск: ОИАТЭ. 1991.

- 16. Кириллов П.Л. Конспект лекций по курсу «Теплообмен». Разделы: теплообмен при кипении, двухфазные потоки: Учебное пособие. Государственный комитет СССР по народному образованию. Обнинск: ОИАТЭ. 1991.
- 17. Жуков А.В., Сорокин А.П., Свириденко Е.Я., Худаско В.В. Экспериментальное и расчетное моделирование теплогидравлики теплообменных аппаратов ЯЭУ. Модельные сборки, датчики, методики, жидкометаллический стенд: Учебное пособие для слушателей курсов повышения квалификации и специального факультета. Обнинск: ОИАТЭ. 1992.
- 18. Кириллов П.Л. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Методические рекомендации для решения задач по курсу «Теплопередача и теплообмен в ЯЭУ»: Учебное пособие. Государственный комитет РФ по высшему образованию. Обнинск: ОИАТЭ. 1994.
- 19. Дорохович С.Л., Жуков А.В., Кириллов П.Л. Теплогидравлический расчет активных зон реакторов типа ВВЭР и БН: Учебное пособие. Министерство общего и профессионального образования. Обнинск: ОИАТЭ. 1999.
- 20. Кириллов П.Л, Богословская Г.П. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат. 2000. ISBN 5-283-03636-7.
- 21. Юрьев Ю.С. Концепции современного естествознания. Обнинск: ИАТЭ. 2000.
- 22. Юрьев Ю.С. Методология и успехи современного естествознания. М.: ГУУ. 2000.
- 23. Юрьев Ю.С. О профессии, о ремесле, о мастерстве. Программа «Энергетика-3000». Обнинск: ФЭИ-МРНЦ. 2001.
- 24. Жуков А.В. Теплогидравлический расчёт реакторов. Часть 1 (общие вопросы): Учебное пособие для студентов по специальности 101.000 Атомные электростанции и установки. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 2001.
- 25. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет реакторов. Часть 2. Конвективный теплообмен при однофазном течении (классические и современные представления и решения): Учебное пособие для студентов. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 2002.
- 26. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной энергетики / Под общ. ред. Кириллова П.Л. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, ОИАТЭ. Учебно-научная лаборатория. 2005.
- 27. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет реакторов. Часть 3. Теплоотдача и температурные поля в регулярных решетках (однофазное течение: эксперимент расчет, методики и формулы): Учебное пособие для студентов. Том 1. Обнинск: ГНЦ РФ Φ ЭИ. 2006.
- 28. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет реакторов. Часть 3. Теплоотдача и температурные поля в регулярных решетках (однофазное течение: эксперимент расчет, методики и формулы): Учебное пособие для студентов. Том 2. Обнинск: ГНЦ РФ Φ ЭИ. 2006.
- 29. Жуков А.В., Юрьев Ю.С., Кузина Ю.А. Теплоотдача и температурные поля в квадратной решетке трубок теплообменников ЯЭУ: Учебное пособие. Обнинск: ГНЦ $P\Phi \Phi$ ЭИ. 2006.
- 30. Кириллов П.Л. Имена и числа подобия (четыре портрета). Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 2006.
- 31. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках: Учебное пособие для вузов; 2-е издание, перераб. М.: ИздАт. 2008. ISBN 978-5-86656-210-7.

- 32. Жуков А.В., Юрьев Ю.С., Кузина Ю.А. Теплогидравлический расчет реакторов. Часть 4. Температурные поля в теплообменниках ЯЭУ при малых скоростях течения теплоносителя с опрокидыванием циркуляции: Учебное пособие для студентов. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2008.
- 33. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет реакторов. Часть 5. Переменное энерговыделение в теплогидравлике реакторов: Учебное пособие для студентов. Обнинск: Γ НЦ $P\Phi$ Φ ЭИ, 2009.
- 34. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С. Гидродинамические расчеты (справочное учебное пособие). М.: ИздАТ. 2009.
- 35. Жуков А.В., Сорокин А.П., Санина И.В., Кузина Ю.А., Буркова И.В. Представительность быстрых реакторов в мире (действующие, проектируемые, выведенные из эксплуатации реакторы): Учебное пособие для студентов по специальности 14.04.04 «Атомные электростанции и установки». Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 2012.
- 36. Морозов А.В., Ремизов О.В. Пассивные системы аварийного охлаждения активной зоны реакторов: Учебное пособие для студентов по специальности 14.14.03 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг». Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 2012.
- 37. Морозов А.В., Ремизов О.В. Тяжелые аварии на АЭС с ВВЭР: сценарии, процессы деградации активной зоны, способы управления: Учебное пособие для студентов по специальности 14.14.03 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг». Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 2012.
- 38. Сердунь Н.Н., Портяной А.Г., Сердунь Е.Н., Сорокин А.П. Пассивные системы аварийной защиты реакторов на быстрых нейтронах: Учебное пособие для студентов вузов по курсу «Атомные станции и установки». Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2014.

Результаты исследований специалистов Научной школы в области тепломассопереноса и теплофизических свойств материалов ядерной техники, представленные в справочниках и руководящих технических материалах

- 1. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / Под общей редакцией П.Л. Кириллова. М.: Энергоатомиздат. 1984.
- 2. Жуков А.В., Сорокин А.П., Кириллов П.Л., Ушаков П.А., Кирюшин А.И., Кузавков Н.Г. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов // Руководящие технические материалы: РТМ 1604.008-86. Государственный комитет по использованию атомной энергии / Под ред. А.В. Жукова и А.П. Сорокина. Обнинск: ФЭИ Координационный Совет по теплофизике Отраслевой базовый центр теплофизических данных. 1988.
- 3. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / Под общей редакцией П.Л. Кириллова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат. 1990.
- 4. Рекомендации, правила, методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования энергетических установок // Руководящие технические материалы: РТМ 1604.062-90, часть 1. Министерство атомной энергетики и промышленности СССР. Обнинск: ФЭИ Координационный Совет по теплофизике Отраслевой базовый центр теплофизических данных. 1991.
- 5. Рекомендации, правила, методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования энергетических установок // Руководящие технические материалы: РТМ 1604.062-90, часть 2. Министерство атомной энергетики и промышленности СССР. Обнинск: ФЭИ Координационный Совет по теплофизике Отраслевой базовый центр теплофизических данных. 1991.
- 6. Рекомендации, правила, методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования энергетических установок // Руководящие технические материалы: РТМ 1604.062-90, часть 3. Министерство атомной энергетики и промышленности СССР. Обнинск: ФЭИ Координационный Совет по теплофизике Отраслевой базовый центр теплофизических данных. 1992.
- 7. Кириллов П.Л. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Методические рекомендации. Обнинск: ОИАТЭ, 1994.
- 8. Thermophysical Properties of Materials for Water Cooled Reactors // IAEA, Vienna, 1997. IAEA-TECDOC-949, 1997.
- 9. Bogoslovskaya G.P., Cevolani S., Ninokata H., Rinejski A.A., Sorokin A.P., Zhukov A.V. LMFR Core and Heat Exchanger Thermohydraulic Design: Former USSR and Present Russian Approaches // IAEA, Vienna, 1998. IAEA-TECDOC-1060, ISSN 1011-4289, January 1999.
- 10. LMFR Core Thermohydraulics: Status and Prospects // IAEA, Vienna, 2000. IAEA-TECDOC-1157, ISSN 1011-4289, June 2000.
- 11. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Изд-е 2-е, испр. и доп. / Справочник под редакцией П.Л. Кириллова. М.: ИздАТ. 2007.
- 12. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике / Под общей редакцией П.Л. Кириллова. М.: ИздАТ. Т. 1.-2010.

- 13. Бобков В.П., Блохин А.И., Забудько Л.М., Казанцев Г.Н., Румянцев В.Н., Смогалев И.П., Тарасиков В.П. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Том 1. Свойства жидкометаллических теплоносителей / Под общей редакцией В.М. Поплавского. М.: ИздАТ. 2011.
- 14. Бобков В.П., Блохин А.И., Забудько Л.М., Казанцев Г.Н., Румянцев В.Н., Смогалев И.П., Тарасиков В.П. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Том 2. Свойства газовых сред / Под общей редакцией В.М. Поплавского. М.: ИздАТ. 2011.
- 15. Кириллов П.Л., Жуков А.В., Логинов Н.И., Махин В.М., Пиоро И.Л., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / Под общей редакцией П.Л. Кириллова. М.: ИздАТ. Т. 2.-2013.
- 16. Кириллов П.Л., Жуков А.В., Логинов Н.И., Махин В.М., Пиоро И.Л., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике (Теплогидравлические процессы при переходных и нестандартных режимах. Тяжелые аварии. Защитная оболочка. Коды, их возможности, неопределенности) / Составитель и редактор д.т.н., проф. П.Л. Кириллов. М.: ИздАТ. Т. 3. 2014.

КОНФЕРЕНЦИЯ «ТЕПЛОФИЗИКА – 2018»

























































































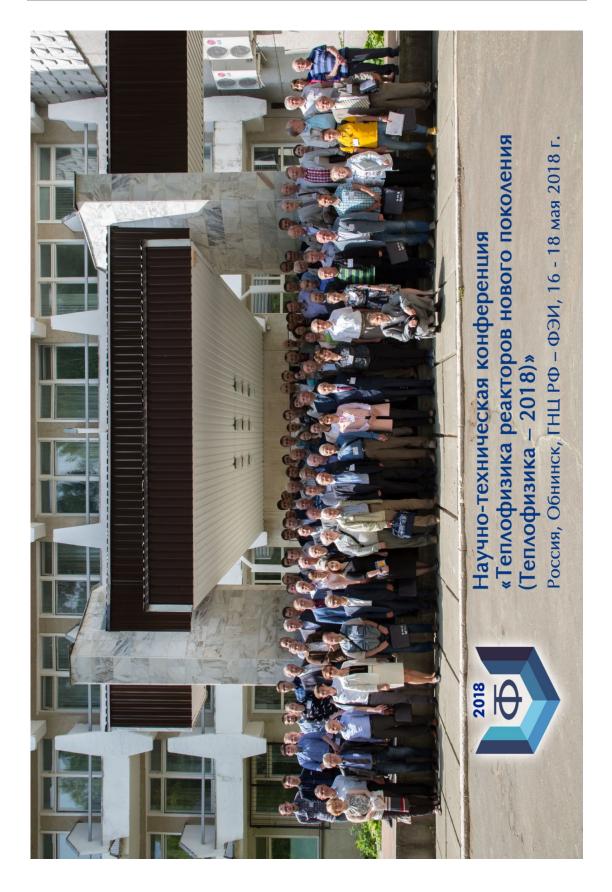












Авторский указатель

Алексеев В. В. 13, 39, 91, 105, 232 Асхадуллин Р. Ш. 118, 215

Ашурко Ю. М. 145

Баранаев Ю. Д. 204 Беляев И. А. 131 Беренский Л. Л. 145

Богословская Г. П. 51, 157, 204

Верещагина Т. Н. 242, 250

Волков А. В. 145

Глебов А. П. 204

Грабежная В. А. 13, 170, 194

Грачев Н. С. 170 Григоров В. В. 215 Гулевич А. В. 39 Гулевский В. А. 118

Дельнов В. Н. 76

Денисова Н. А. 51, 131, 145

Жуков А. В. 62

Загорулько Ю. И. 13

Иванов А. П. 39 Иванов Е. Ф. 145 Иванов К. Д. 118

Калякин С. Г. 194, 204 Камаев А. А. 13, 39 Кириллов П. Л. 157, 204 Козлов Ф. А. 105, 232 Кузина Ю. А. 13, 26, 39, 62, 91, 131,

Кузина Ю. А. 13, 26, 39, 62, 91, 131, 145, 232

Латже Кристиан 232 Левченко Ю. Д. 26 Легких А. Ю. 118 Логинов Н. И. 215, 242 Лощинин В. М. 26, 157

Мартынов П. Н. 215 Махин В. М. 204

Мельников В. П. 118, 215 Михеев А. С. 170, 194, 215, 242

Морозов А. В. 26, 39

Никитенко М. П. 204

Опанасенко А. Н. 131 Орлов Ю. И. 13, 118

Пометько Р. С. 157 Поплавский В. М. 232 Портяной А. Г. 215 Посаженников А. М. 118 Привезенцев В. В. 62

Разуванов Н. Г. 131 Рачков В. И. 62, 215

Свиридов Е. В. 131 Селиванов Ю. Ф. 157 Сердунь Е. Н. 215 Смирнов А. М. 157

Сорокин А. П. 13, 26, 39, 51, 62, 91, 105, 131, 145, 157, 194, 215, 232, 250

Стороженко А. Н. 215

Труфанов А. А. 26, 51, 157, 232, 250

Ульянов В. В. 118, 215

Чуркин А. Н. 204

Ягодкин И. В. 118, 215

Подписано в печать 01.08.2019. Тираж 100 экз. Заказ № 239. Уч.-изд. л. 17,0. Усл. п. л. 15,9. Отпечатано в ОНТИ ГНЦ РФ ФЭИ. 249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.

АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского»