

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В ОБОСНОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

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

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

** 249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1*

*** НИУ МФТИ*

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9



Представлены и обсуждаются результаты экспериментальных и расчетных исследований, полученные авторами, по гидродинамике и теплообмену в тепловыделяющих сборках твэлов активной зоны быстрых реакторов с щелочными жидкометаллическими теплоносителями, экспериментальные данные по гидродинамике проточных частей коллекторных систем теплообменников и реакторов. Изложены результаты исследований внутрибаковой циркуляции теплоносителя, полученные с использованием развитой теории приближенного моделирования полей скорости и температуры неизотермического теплоносителя в первом контуре реактора на быстрых нейтронах, демонстрирующие устойчивую стратификацию и термопульсации в теплоносителе. Приведены результаты экспериментального и расчетного моделирования процесса кипения щелочных жидких металлов на моделях тепловыделяющих сборок при развитии аварийной ситуации, связанной с нарушением нормальной эксплуатации при одновременном прекращении энерговыделения всех главных циркуляционных насосов и отказом органов аварийного останова реактора. Сформулированы задачи дальнейших исследований, решение которых актуально для развития жидкометаллической технологии, вытекающие из необходимости повышения безопасности, экономичности, экологичности, надежности и продления ресурса работающих и создаваемых ЯЭУ.

Ключевые слова: щелочные жидкие металлы, быстрые реакторы, гидродинамика, теплообмен, активная зона, бак реактора, раздающая коллекторная система, парогенератор, кипение.

ВВЕДЕНИЕ

Осенью 1950 г. при рассмотрении предложений А.И. Лейпунского секция НТС Главка рекомендовала лаборатории «В» (сейчас АО «ГНЦ РФ – ФЭИ») сосредоточиться на разработке реакторов с жидкометаллическим охлаждением. Были сформулированы

© Ю.А. Кузина, А.П. Сорокин, В.Н. Дельнов, Н.А. Денисова, Г.А. Сорокин, 2022

требования к теплоносителям, учитывающие их влияние на физические, технологические, коррозионные и теплогидравлические характеристики реакторов, токсичность и стоимость. Перечень жидких металлов и сплавов, нашедших применение или рассматривающихся в качестве перспективных в ядерной энергетике, включает в себя литий, натрий, эвтектический сплав натрия и калия, калий, цезий, свинец, эвтектический сплав свинца и висмута, галлий.

24 июня 1954 г. в ФЭИ был создан теплотехнический отдел, в дальнейшем преобразованный в теплофизический сектор, который возглавили В.И. Субботин, в дальнейшем П.Л. Кириллов, А.Д. Ефанов. Основными направлениями исследований явились теплогидравлика, механизмы турбулентного теплообмена, процессы кипения и конденсации жидких металлов, систематизация, анализ и обобщение теплофизических данных, создание базы экспериментальных теплофизических данных, тепловые трубы, теплофизика термоэмиссионных преобразователей, высокотемпературных ядерных энергетических установок космического назначения и термоядерных установок [1].

Необходимость научного теплофизического обоснования разрабатываемых АЭС и ЯЭУ нового типа потребовала создания новых методик, специального оборудования и соответствующей поставленным задачам для проектов быстрых реакторов БР-10, БОР-60, БН-350, БН-600, БН-800, БН-1200 экспериментальной базы. Созданный в ФЭИ комплекс гидродинамических, жидкометаллических теплогидравлических и технологических стендов обеспечил их выполнение и подготовил к выполнению экспериментального обоснования инновационных технических решений проектов ядерных энергетических установок (быстрых реакторов) нового поколения [2].

В итоге шестидесятилетнего опыта освоения щелочных жидких металлов (натрия, эвтектических сплавов натрий-калий, лития, цезия), совместно с институтами отрасли, академии наук и опытными КБ, выполняющими разработки атомных энергетических и силовых установок, созданы научные основы их применения в ядерной энергетике, научно обоснованы теплогидравлические параметры и технологические процессы, обеспечившие успешную эксплуатацию принципиально новых ЯЭУ. Суммарный опыт эксплуатации ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БР-10, БОР-60, БН-350, БН-600, БН-800) превышает 200 лет и 6,5 лет с натрий-калиевым теплоносителем для космических аппаратов БУК, ТОПОЛЬ, ТОПАЗ на номинальных параметрах. Большие ресурсы (десятки лет) работы со сплавом натрий-калий получены при эксплуатации БР-5, DFR и RAPSODIE [3].

Этому способствовало многолетнее международное сотрудничество в области использования натрия в ЯЭУ с зарубежными странами – Великобританией, Германией, Республикой Корея, США, Францией, Чехословацкой республикой, Японией и др.

Успехи, полученные в результате освоения щелочных жидкометаллических теплоносителей, позволили предложить жидкометаллическую технологию в различных технических приложениях: натрий – на АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, натрий и натрий-калий – в металлургической и химической промышленности; натрий-калий, цезий, литий – в установках космического назначения; литий – в реакторах синтеза – термоядерных реакторах и т.д.

Реализация стратегии двухкомпонентной атомной энергетики с замыканием топливного цикла с использованием реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем [4], обеспечение конкурентоспособности и сохранение приоритета, которым обладает Россия по АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, в том числе проектам реактора на быстрых нейтронах с газотурбинной установкой (БН-ГТ) и высокотемпературного реактора для атомно-водородной энергетики (БН-ВТ), требует продолжения комплекса проблемно-ориентированных теплогидравлических исследований.

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОБМЕН В КАНАЛАХ И ПУЧКАХ ТВЭЛОВ

Методология исследований. На всех этапах исследований большое внимание уделялось методикам и технике измерений, включая разработку уникальных датчиков скорости, расхода, давления, уровня, температуры и др. Созданы микротермопары для измерения температуры в защитных чехлах с наружным диаметром 0,3 – 0,8 мм, работающие в интервале температур 300 – 1800°C. Для измерения расходов жидких металлов созданы расходомеры различных конструкций. Позднее были созданы методики и техника электромагнитного измерения векторов локальных расходов (скоростей) жидкого металла в каналах и пучках стержней, измерений характеристик перемешивания теплоносителей в опытах на воздухе с добавкой малой доли газообразных трассеров в виде фреона или пропана [5, 6].

Большое внимание уделено методам физического моделирования экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена в ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями. Экспериментально доказана возможность моделирования гидродинамики несжимаемых сред, в том числе жидких металлов в опытах с воздухом, теплообмена в жидких металлах Na, Na-K, Li, Hg, Pb, Pb-Bi и др. с помощью моделирующих сред [7]. Указанные методики позволили выполнить широкий круг экспериментов фундаментального и прикладного характера.

Каналы и пучки твэлов. Проведены широкие исследования гидродинамики каналов сложной формы, включая пучки стержней, проточные части реакторных установок; максимальное внимание уделялось измерениям полей скоростей, распределению касательных напряжений, турбулентных характеристик.

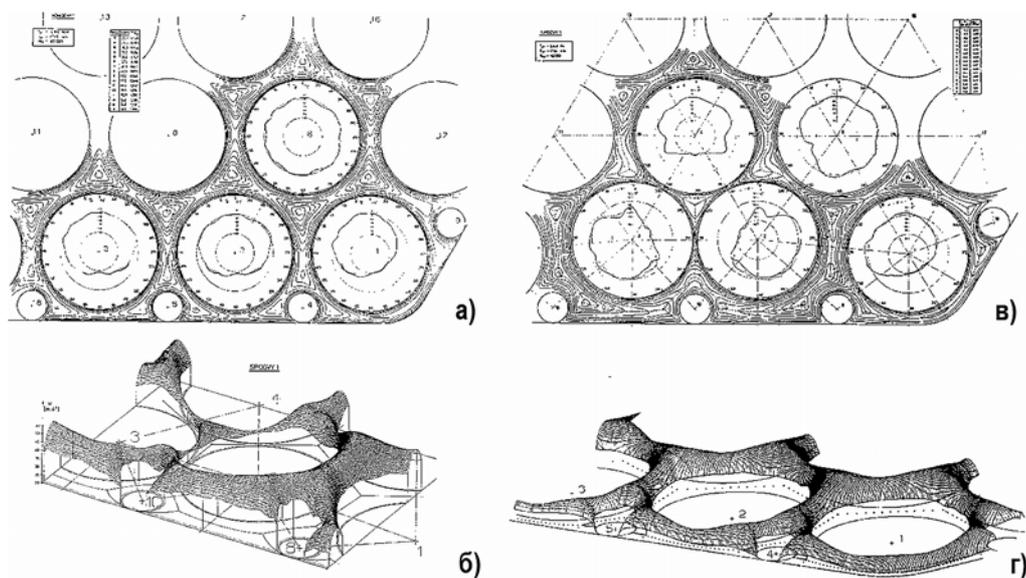


Рис. 1. Распределения касательных напряжений на поверхности твэлов и скорости в поперечном сечении каналов в периферийной области модельной ТВС с вытеснителями в периферийных каналах при номинальной геометрии (а, б) и деформации решетки твэлов в периферийной области ТВС (в, г)

Результаты экспериментальных исследований турбулентных гидродинамических характеристик в сборках твэлов на воздухе с использованием трубки Пито показали (рис. 1а, б), что в распределении касательных напряжений вдоль смоченного периметра ячейки правильной решетки стержней наблюдается локальный максимум в месте наибольшего расширения канала, который можно объяснить воздействием вторичного вихря [5].

В деформированной решетке (рис. 1в, г) распределение касательных напряжений

вдоль смоченных поверхностей практически симметрично относительно геометрических осей симметрии проточного сечения, хотя в некоторых областях ТВС наблюдаются аномалии, которые можно объяснить воздействием отдельных вторичных вихрей не только внутри каналов, но и на границе. Распределение скорости по нормали к смоченному периметру описывается универсальным законом, если для расчета динамической скорости использовать локальное значение касательного напряжения. Наблюдается значительная интенсификация турбулентных пульсаций скорости в периферийной области пучка по сравнению с бесконечной решеткой [5].

Наибольшее внимание уделено теплогидравлическим исследованиям самого высоконапряженного и ответственного узла реакторной установки – активной зоны реактора, подвергающегося воздействию различных факторов: конструктивных, режимных, технологических, радиационных и эксплуатационных в процессе кампании [6]. Было показано, что на границе раздела теплоноситель-поверхность теплообмена термическое (контактное) сопротивление отсутствует, когда концентрация примесей в теплоносителе не превышает их растворимость при температурах циркулирующего металла. В этих условиях теплоотдача к жидким металлам Na, Na-K, Li, Hg, Pb-Bi в трубах описывается единой критериальной зависимостью, близкой к формуле Лайона. При насыщении теплоносителя примесями коэффициенты теплоотдачи могут снизиться в полтора – два раза, что соответствует опытам ЭНИН, ЦКТИ, ФЭИ [6].

Экспериментальные и расчетные исследования показали необходимость решения «сопряженной» задачи теплоотвода от твэлов с учетом их теплофизических свойств твэлов. П.А. Ушаковым была разработана теория приближенного теплового подобия твэлов, расположенных в правильных решетках [7], которая позволила моделировать твэлы многослойными трубками с электрообогревом изнутри и нашла применение во всех исследованиях активных зон быстрых реакторов. Получены детальные экспериментальные данные по теплогидравлике полногабаритных моделей активных зон при наличии прогибов тепловыделяющих элементов, асимметричных сдвижек и деформаций элементов, перекрытии различных частей активной зоны, наличии встречных потоков.

В результате экспериментальных исследований и расчетно-теоретического анализа межканального обмена массой, импульсом и энергией в пучках гладких и оребренных спиральной дистанционирующей проволочной навивкой твэлов созданы физические обоснованные методы и программы (TEMP, MIF) теплогидравлического расчета формоизменяющих тепловыделяющих сборок активной зоны реакторов на быстрых нейтронах [8].

Исследовано влияние на температурный режим ТВС геометрии и материалов твэлов, эффектов радиационного распухания и ползучести, выявлены особенности формирования температурного режима в активной зоне в процессе эксплуатации (кампании) для реакторов на быстрых нейтронах. Показана эффективность использования разнонаправленных проволочных навивок, создающих противоположно направленные потоки теплоносителя в поперечных направлениях.

ГИДРОДИНАМИКА ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ КОЛЛЕКТОРНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛООБМЕННИКОВ И РЕАКТОРОВ

На аэродинамическом стенде и гидрлотке на протяжении длительного периода времени проведен большой комплекс экспериментальных исследований гидродинамики проточных частей различных типов осесимметричных плоских и цилиндрических раздающих коллекторных систем (РКС) с различными условиями подвода и отвода жидкости [9].

РКС с центральным подводом и боковым отводом жидкости. На гидрлотке получен характер течения воды в проточной части РКС плоского типа с центральным подводом и боковым отводом воды. Установлено, что характер течения жидкости в коллекторе определяется соотношением размеров и конструкцией РКС.

Схемы течения жидкости в РКС цилиндрического типа. В проточной части РКС цилиндрического типа течение жидкости имеет сложный характер и, в основном, определяется соотношением размеров и конструкцией РКС, режимом течения жидкости и коэффициентом гидравлического сопротивления проточной части выходного элемента. Характерные схемы течения жидкости в проточной части указанного типа РКС (рис. 2) получены с учетом результатов различных экспериментальных работ [9].

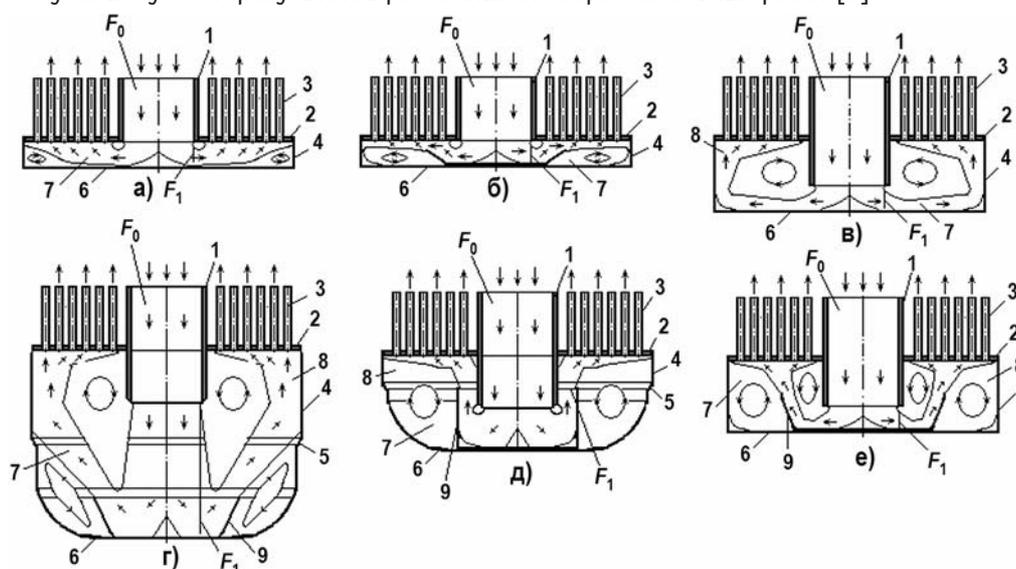


Рис. 2. Типичные конструкции и схемы течения жидкости в осесимметричных РКС цилиндрического типа с центральным подводом жидкости в коллектор: а), б) – сверхзатеснённые РКС без вылета центральной трубы соответственно при отсутствии и наличии распределителя; в) – затеснённая РКС с вылетом центральной трубы и коллектором с затеснённым входным участком; г) – затеснённая РКС с распределителем, вылетом центральной трубы и коллектором со свободным входным участком; д), е) – затеснённые РКС с распределителем, вылетом центральной трубы и коллектором с затеснённым и свободным входными участками; 1 – центральная труба; 2 – трубная доска; 3 – трубка пучка; 4 – корпус; 5 – ступень; 6 – днище; 7 – коллектор; 8 – боковой кольцевой канал, 9 – распределитель

РКС с боковым подводом и центральным отводом жидкости. На гидролотке получен характер течения воды в проточной части РКС плоского типа с боковым подводом и центральным отводом воды. Установлено, что характер течения жидкости в коллекторе определяется соотношением размеров и конструкцией 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 коэффициентом гидравлического сопротивления решетки. Характерные схемы течения жидкости в проточной части рассматриваемого типа РКС получены с учетом результатов экспериментальных работ [9]. Наиболее яркие особенности течения жидкости проявляются на входном, основном и выходном участках проточной части рассматриваемой РКС (рис. 3).

Научные открытия. По результатам исследований установлены и зарегистрированы в качестве научных открытий неизвестные ранее закономерность и явление, имеющие отношение к атомной, космической, металлургической и химической областям науки и техники.

Закономерность. Установлена неизвестная ранее закономерность распределения жидкости на выходе из проточных частей раздающих коллекторных систем, заключающаяся в том, что при выходе жидкости из коллектора образуются осесимметричные зоны, характеристики которых определяются конструктивными и технологическими особенностями коллекторной системы (места подвода жидкости, траектория движения, параметры струи, гидравлическое сопротивление и др.) [10].

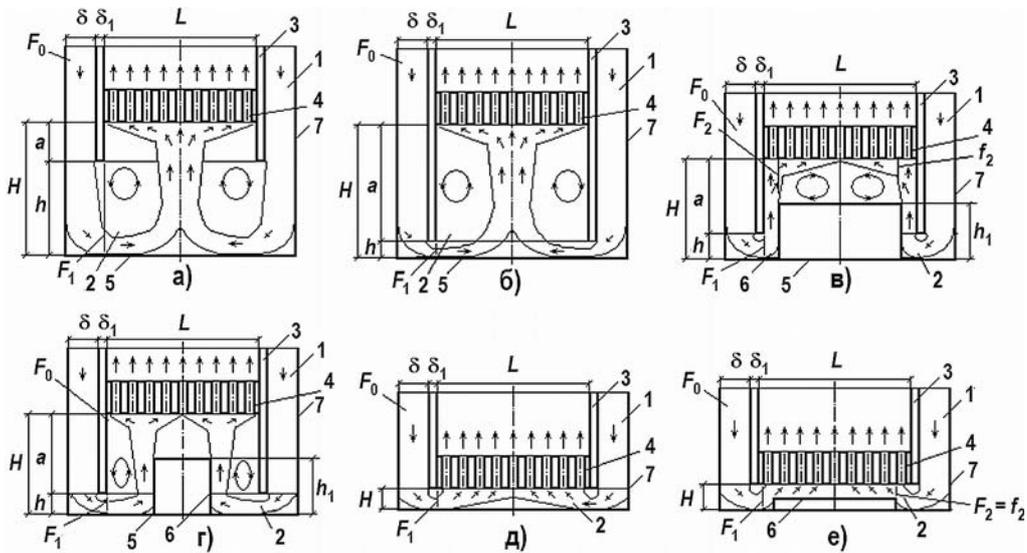


Рис. 3. Типичные конструкции и схемы течения жидкости в проточных частях осесимметричных РКС цилиндрического типа с боковым подводом жидкости в коллектор: а), б) – затеснённые РКС со смещенной трубной доской в обечайке и свободным и затеснённым входными участками соответственно; в), г) – затеснённые РКС с затеснённым входным участком, смещенной трубной доской в обечайке и вставками относительно большого и малого диаметров соответственно; д), е) – сверхзатеснённые РКС с коллектором, затеснённым входным участком, без смещения решётки в обечайке при отсутствии и наличии вставок соответственно; 1 – кольцевой канал; 2 – коллектор; 3 – обечайка; 4 – решётка; 5 – днище; 6 – вставка; 7 – корпус

Явление. Установлено неизвестное ранее явление возникновения гидродинамической идентичности в раздающих коллекторных системах, заключающееся в подобии гидродинамических характеристик проточных частей осесимметричных раздающих коллекторных систем, например, ядерных энергетических установок и теплообменников, с различными условиями подвода и отвода протекающей в системах жидкости» [11].

Отличия конструкций и гидродинамики проточных частей РКС различных типов. Конструктивные отличия РКС: в РКС цилиндрического и плоского типов в качестве выходного элемента используют соответственно трубную доску и систему пластин:

- 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.

Общая характеристика научных открытий. Научные открытия

- изменили сложившиеся научные представления в области гидродинамики осесимметричных РКС;

- объяснили научные факты и экспериментальные данные, которые не находили своего научного объяснения;

- показали чрезвычайно сильное влияние незначительных изменений конструкции и соотношения размеров РКС на течение жидкости в ней;

- позволили получить эмпирические соотношения по определению гидродинамических неравномерностей на выходе из различных конструкций и типов РКС;

- обеспечили прогнозирование до проведения экспериментальных и расчетных работ конструкций РКС с необходимым профилем расхода жидкости на выходе из коллектора;

- содержат сведения о схемах течения жидкости в различных типах РКС;
- установили наличие затесненных и свободных РКС, в которых течение жидкости существенно отличается от течения в хорошо изученных классических сверхзатеснённой и сверхсвободной РКС.

Научные открытия использованы при обосновании проточных частей РКС реакторов и теплообменников ЯЭУ и разработке и верификации расчетных кодов по гидродинамике проточных частей РКС.

ВНУТРИКОРПУСНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ, УЗЛЫ ОБОРУДОВАНИЯ

Внутрикорпусная циркуляция. Экспериментальные исследования, проведенные на интегральной водяной модели реакторов с использованием развитой теории приближенного моделирования, полей температуры и структуры движения неизотермического теплоносителя в элементах первого контура реактора на быстрых нейтронах для режимов принудительной циркуляции, перехода к режиму расхолаживания и аварийного расхолаживания естественной конвекцией теплоносителя [12], демонстрируют существенную и устойчивую температурную стратификацию теплоносителя в периферийной зоне верхней (горячей) камеры реактора над боковыми экранами, в холодной и напорной камерах, элеваторной выгородке, системе охлаждения корпуса реактора, на выходе из промежуточных и аварийных теплообменников в различных режимах их работы (рис. 4, 5).

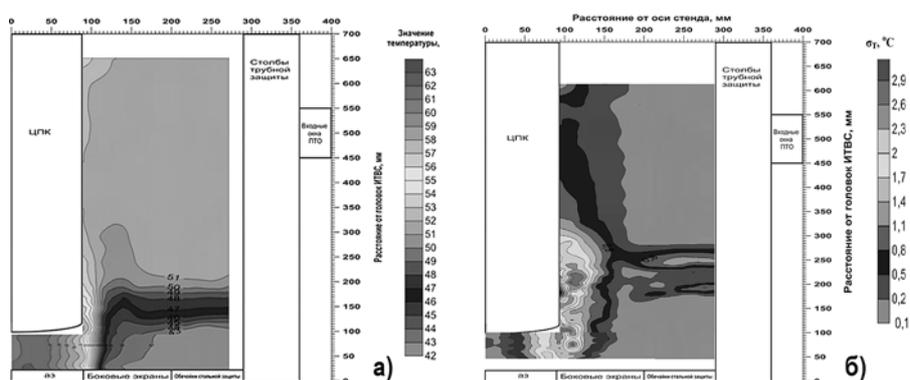


Рис. 4. Распределения осредненной температуры теплоносителя (а) и интенсивности пульсаций температуры (б) по высоте верхней камеры, полученные при перемещении подвижных термозондов по высоте верхней камеры, в номинальном режиме работы установки

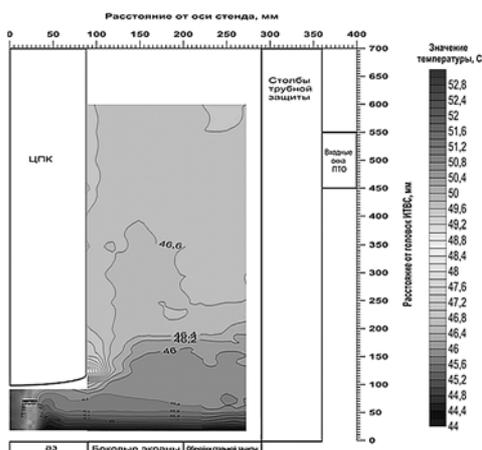


Рис. 5. Поле осредненной температуры по высоте верхней камеры в установившемся режиме расхолаживания естественной конвекцией

На границах раздела стратифицированных и рециркуляционных образований зафиксированы большие градиенты и пульсации температуры. Полученные результаты могут быть использованы для верификации расчетных кодов и приближенной оценки параметров реакторной установки при пересчете по критериям подобия.

Теплообменники и парогенераторы. С использованием кодов «Протва» и «Угра», созданных на основании развитой теории анизотропного пористого тела для расчетов сложных течений в реакторах, теплообменниках и парогенераторах, доказана возможность применения в проекте БН-800 теплообменников с той же поверхностью теплопередачи, как в БН-600. Исследованы характеристики теплообмена, критические тепловые потоки и устойчивость циркуляции парогенераторов реакторных установок с реакторами БН-350, БН-600, БН-800 и принципиально нового крупномодульного парогенератора перспективного быстрого реактора [13].

Кипение щелочных жидких металлов в пучках твэлов. Исследования кипения жидкого металла на моделях тепловыделяющих сборок твэлов (ТВС) показали три режима течения двухфазного потока жидких металлов в пучках твэлов: пузырьковый, снарядный и дисперсно-кольцевой, являющийся предельным по отношению к охлаждению сборки. Показана принципиальная возможность длительного охлаждения активной зоны в аварийных режимах с кипением жидких металлов. Изучена теплоотдача при кипении жидких металлов в пучках твэлов, исследовано воздействие шероховатости поверхности твэлов на развитие процесса кипения, построена картограмма режимов течения двухфазного потока жидких металлов в пучках твэлов [14, 15].

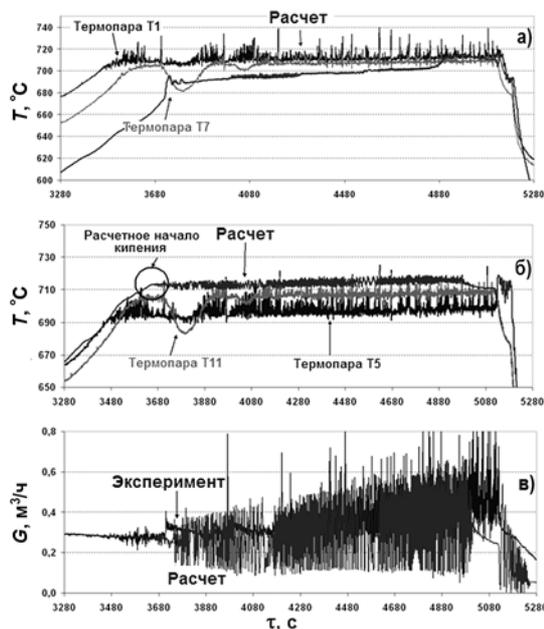


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных распределений во времени температуры поверхности имитаторов твэлов (а), температуры теплоносителя (б) и расхода теплоносителя (в) в левой ТВС при параллельной работе ТВС с одинаковым энерговыделением

Результаты расчетных исследований для системы параллельных ТВС (рис. 6), выполненных по модернизированной версии поканального кода SABENA [16], реализующей двухжидкостную модель двухфазного потока жидкого металла в приближении равных давлений в паровой и жидкой фазах воспроизводят ход температуры, развитие режимов течения однофазного потока (пузырькового, снарядного), пульсации расхода жидкого металла, полученные в экспериментальных исследованиях, а также демонстриру-

ют противофазные пульсации расхода теплоносителя в параллельных ТВС, межканальную неустойчивость, характеризующуюся значительным возрастанием амплитуды пульсаций расхода теплоносителя в параллельных ТВС по сравнению с одиночными ТВС, периодическим падением расхода теплоносителя в ТВС практически до нуля и возможным осушением ТВС – возникновение кризиса теплообмена.

Для исключения развития аварийной ситуации, связанной с нарушением нормальной эксплуатации при одновременном прекращении энергоснабжения всех главных циркуляционных насосов и отказе органов аварийного останова реактора (авария ULOF), предложено конструктивное решение, заключающееся в расположении над активной зоной реактора «натриевой полости». Сравнение результатов расчетов и экспериментов показало возможность отвода тепла кипящим теплоносителем в модельной ТВС с «натриевой полостью» при тепловых нагрузках 10 – 15% и уровне расхода натрия около 5% от номинальных значений [15].

Работы по систематизации теплофизических данных в области быстрых реакторов с щелочными теплоносителями были проведены под эгидой Центра теплофизических данных ФЭИ по многим направлениям теплофизики быстрых реакторов: поля скорости и температуры в активной зоне, горячей камере, теплообменниках и парогенераторах, гидравлическое сопротивление и теплоотдача в каналах и пучках твэлов для однофазного потока, теплоотдача, структура и карта режимов течения двухфазного потока, кризис теплообмена в сборках, теплофизические свойства теплоносителей и реакторных материалов. Разработаны руководящие технические материалы и справочники [17].

Задачи дальнейших теплогидравлических исследований в ЯЭУ для щелочных жидкометаллических теплоносителей:

- совершенствование методов расчета локальных турбулентных характеристик переноса импульса и энергии для однофазных и двухфазных потоков жидкого металла в каналах и больших объемах с учетом крупномасштабных вихревых течений, влияния стратификации протока теплоносителя;
- создание и обоснование системы верификационных тестов;
- разработка верифицированного комплекса кодов, учитывающих взаимосвязь ядерно-физических, теплогидравлических, физико-химических, термомеханических, массообменных и технологических процессов, происходящих в ЯЭУ, для обоснования ее ресурса с учетом всей совокупности процессов и режимов ее эксплуатации;
- оценка пульсаций температуры непосредственно в потоке теплоносителя и на стенках каналов, исследование влияния этих пульсаций на прочность конструкций;
- обоснование температурного режима активной зоны с учетом случайных отклонений параметров (геометрических режимных, технологических, погрешностей теплофизических свойств, расчетных констант и т.д.);
- проведение анализа последствий возможных нестандартных режимов (блокировки, аварийный отвод тепла, кипение) и разработка мероприятий, исключающих их переход в тяжелую аварию;
- изучение динамики распространения области кипения натрия в реальной ТВС с «натриевой полостью» над активной зоной;
- обоснование номинальных режимов, исключающих образование вихрей в коллекторе активной зоны и на поверхности натрия (захват газа), зон пассивной циркуляции (стратификационные явления, пульсации температуры);
- оценка пульсаций температуры непосредственно в потоке теплоносителя и на стенках каналов, исследование влияния этих пульсаций на прочность конструкций;
- разработка системы обнаружения аномалии в отдельной ТВС или в их группе до разрушения оболочки твэлов;
- проведение обоснования для крупноблочных ПГ теплогидравлических режимов и

гидродинамической устойчивости, комплексные испытания систем автоматической защиты парогенератора; для их выполнения обеспечить поставку и монтаж всех систем АЗ, принять в эксплуатацию стенд САЗ;

– для повышения безопасности крупноблочного парогенератора разработка материала и конструкции, обеспечивающих замедление процессов саморазвития и развития течей и оперативный ремонт ПГ после течи воды в натрий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющийся опыт освоения жидкометаллических теплоносителей позволяет считать, что они по праву занимают свою нишу в ядерной энергетике наравне с водным теплоносителем. Однако несмотря на это нельзя полагать, что все задачи решены и остаётся только тиражировать накопленный опыт при создании новых реакторных установок. Поэтому в статье сформулированы задачи, решение которых актуально для развития жидкометаллической технологии. Из предшествующих работ следует важный методологический вывод – наибольшая эффективность исследований достигается при сочетании фундаментальных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, создании на их основе опытных образцов-прототипов, изучении их характеристик с последующим переходом к промышленным изделиям.

Литература

1. Ефанов А.Д., Козлов Ф.А., Рачков В.И., Сорокин А.П., Черноног В.Л. Научная школа ГНЦ РФ – ФЭИ «Тепло- и массоперенос, физическая химия и технология теплоносителей в энергетических системах». / Научно-технический сборник «Итоги научно-технической деятельности института ядерных реакторов и теплофизики за 2014 г.» под общей редакцией А.П. Сорокина, А.А. Труфанова, Т.Н. Верещагиной. – Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2015. – С. 24-51.
2. Теплофизическая стендовая база атомной энергетики России и Казахстана. / Под ред. Першукова В.А., Архангельского А.В., Кононова О.Е., Сорокина А.П. – Саров: ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2016. – 160 с.
3. Рачков В.И., Арнольдов М.Н., Ефанов А.Д., Калякин С.Г., Козлов Ф.А., Логинов Н.И., Орлов Ю.И., Сорокин А.П. Использование жидких металлов в ядерной, термоядерной энергетике и других инновационных технологиях. // Теплоэнергетика. – 2014. – № 5. – С. 20-30. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040363614050087>.
4. 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. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/713/921> (дата доступа 05.12.2021).
5. Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Денисова Н.А. Гидродинамика турбулентных потоков в ТВС быстрых реакторов (поле скорости и микроструктура турбулентности). // ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы. – 2021. – № 2. – С. 139-166. Электронный ресурс: <https://vant.ippe.ru/year2021/2/thermal-physics-hydrodynamics/2001-10.html> (дата доступа 05.12.2021). DOI: <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2021-2-139-166>.
6. Рачков В.И., Сорокин А.П., Жуков А.В. Теплогидравлические исследования жидкометаллических теплоносителей в ядерных энергетических установках. // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56. – № 1. – С. 121-136. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364418010143>.
7. Сорокин А.П., Кузина Ю.А. Физическое моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями. // Теплоэнергетика. – 2019. – № 8. – С. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040363619080095>.
8. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов (расчетные программы и практическое приложение). – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.

9. *Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н.* Особенности гидродинамики проточных частей коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ. – Саров: ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2016. – 216 с.

10. *Дельнов В.Н., Габрианович Б.Н., Юрьев Ю.С.* Заявка на открытие: № 670 от 17.04.2019. Приоритет открытия: 26.11.2012. Диплом на открытие МААНОиИ № 518. Закономерность распределения жидкости на выходе из проточных частей раздающих коллекторных систем.

11. *Дельнов В.Н.* Заявка на открытие: № А-678 от 25.02.2021. Приоритет открытия: 2018. Диплом на открытие МААНОиИ № 524. Явление возникновения гидродинамической идентичности в раздающих коллекторных системах.

12. *Опанасенко А.Н., Сорокин А.П., Труфанов А.А., Денисова Н.А., Свиридов Е.В., Разуванов Н.Г., Загорский В.Г., Беляев И.А.* Экспериментальные исследования температуры и скорости теплоносителя на интегральной водяной модели быстрого реактора в разных режимах работы. // Атомная энергия. – 2017. – Т. 123. – Вып. 1. – С. 21-27. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/550/529> (дата доступа 05.12.2021).

13. *Грабежная В.А., Михеев А.С.* Опыт экспериментального обоснования парогенераторов АЭС с быстрыми реакторами. // Атомная энергия. – 2015. – Т. 119. – Вып. 2. – С. 87-94. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/765/744> (дата доступа 05.12.2021).

14. *Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Иванов Е.Ф.* Особенности теплообмена при кипении жидкого металла в аварийных режимах в ТВС быстрых реакторов. // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126. – Вып. 2. – С. 69-78. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2527/2828> (дата доступа 05.12.2021).

15. *Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Иванов Е.Ф.* Теплообмен при кипении жидкометаллических теплоносителей в ТВС быстрых реакторов в аварийных режимах. // ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы. – 2018. – № 3. – С. 176-194. Электронный ресурс: <https://vant.ippe.ru/year2018/3/thermal-physics-hydrodynamics/1548-17.html> либо <https://vant.ippe.ru/en/year2018/3/thermal-physics-hydrodynamics/1527-17.html> (английская версия) (дата доступа 05.12.2021).

16. *Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Кузина Ю.А., Денисова Н.А., Низовцев А.А., Привезенцев В.В., Сорокин Г.А.* Экспериментальные и расчетные исследования теплообмена и устойчивости циркуляции при кипении жидких металлов в аварийных режимах в сборках реакторов на быстрых нейтронах. // Теплоэнергетика. – 2021. – № 10. – С. 24-36. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040363621090095>.

17. *Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С.* Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 1. – М.: ИздАТ, 2010. – 770 с.

Поступила в редакцию 08.12.2021 г.

Авторы

Кузина Юлия Альбертовна, начальник отделения, кандидат техн. наук

E-mail: ukyzina@ippe.ru

Сорокин Александр Павлович, главный научный сотрудник, доктор техн. наук

E-mail: sorokin@ippe.ru

Дельнов Валерий Николаевич, начальник отдела, доктор техн. наук,

E-mail: delnov@ippe.ru,

Денисова Наталья Александровна, ведущий инженер,

E-mail: ndenisova@ippe.ru

Сорокин Георгий Александрович, доцент, кандидат техн. наук

E-mail: alexander.p.sorokin@gmail.com

THERMOPHYSICAL STUDIES OF ALKALINE LIQUID METAL COOLANTSKuzina Yu.A. *, Sorokin A.P. *, Delnov V.N. *, Denisova N.A. *, Sorokin G.A. **

* IPPE JSC

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

** National Research University MIPT

9 Institutsky lane, 141700 Dolgoprudny, Moscow Reg., Russia

ABSTRACT

As a result of the alkaline liquid-metal coolants development: sodium, eutectic alloys of sodium-potassium, lithium, cesium, together with the industry institutes, the Academy of Sciences and design bureaus carrying out the development of nuclear power plants, the scientific basis for their application in nuclear energy were development, the thermohydraulic parameters and highly efficient technologies were scientific substantiated. The main research areas were: a hydrodynamics and heat transfer in the core and equipment of fast reactor, in flow parts of collector systems of heat exchangers and reactors; a boiling and condensation processes, a analysis and generalization of thermophysical data, a creation of a database, a heat pipes, a thermal physics of thermionic converters, high temperature nuclear power plants for space purposes and thermonuclear installations. The tasks of further research arising from the need to improve safety, efficiency, environmental friendliness, reliability and prolongation of the resource of operating and created nuclear power plants are formulated, the solution of which is relevant for the development of liquid-metal technology. The use of liquid alkali metals is promising in high-temperature nuclear power plants for technological and space purposes and in thermonuclear installations, where they can be not only a heat carrier, but also a medium that reproduces tritium.

Key words: alkali liquid metals, fast reactors, thermonuclear reactors, experiment, design codes, databases, thermal hydraulics, safety, core, reactor vessel, steam generator, emergency situations, velocity, pressure, temperature.

REFERENCES

1. Efanov A.D., Kozlov F.A., Rachkov V.I., Sorokin A.P., Chernonog V.L. Scientific School of the SSC RF – IPPE «Heat and Mass Transfer, Physical Chemistry and Technology of Coolants in Power Systems». In Scientific and Technical Collection «*Results of Scientific and Technical Activities of the Institute of Nuclear Reactors and Thermal Physics in 2014*». Ed. A.P. Sorokin, A.A. Trufanova, T.N. Vereshchagina. Obninsk. SSC RF – IPPE Publ., 2015, pp. 24-51 (in Russian).
2. *Thermophysical Stand Base of the Nuclear Power Industry in Russia and Kazakhstan*. Ed. Pershukov V.A., Arkhangelsky A.V., Kononov O.E., Sorokin A.P. Sarov. RFYaTs – VNIIEF Publ., 2016, 160 p. (in Russian).
3. Rachkov V.I., Arnol'dov M.N., Efanov A.D., Kalyakin S.G., Kozlov F.A., Loginov N.I., Orlov Y.I., Sorokin A.P. Using of Liquid Metals in Nuclear and Thermonuclear Engineering and in other Innovative Technologies. *Teploenergetika*. 2014, v. 61, no. 5, pp. 337-347; DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601514050085> (in Russian).
4. Ponomarev-Stepnoi N.N. Two-Component Nuclear Power System with a Closed Nuclear Fuel Cycle Based on BN and VVER Reactors. *Atomic Energy*. 2016, v. 120, iss. 4, pp. 233-239; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0123-x>.
5. Sorokin A.P., Kuzina Yu.A., Denisova N.A. Hydrodynamics of Turbulent Flow in a Fast Reactor Fuel Assemblies (Velocity Field and Microstructure of Turbulence). *VANT. Ser. Yaderno-Reaktornye Konstany*. 2021, iss. 2, pp. 139-166. Available at: <https://vant.ippe.ru/en/year2021/2/thermal-physics-hydrodynamics/2020-10.html> (accessed Dec. 05, 2021); DOI: <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2021-2-139-166> (in Russian).
6. Rachkov V.I., Sorokin A.P., Zhukov A.V. Thermal Hydraulic Studies of Liquid Metal Coolants in Nuclear Power Plants. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2018, v. 56, no. 1,

- pp. 121-136; DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X18010145> (in Russian).
7. Sorokin A.P., Kuzina Yu.A. Physical Modeling of Hydrodynamic and Heat Transfer Process in NPP with Liquid Metal Cooling. *Teploenergetika*. 2019, no. 8, pp. 1-9; DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040363619080095> (in Russian).
8. Zhukov A.V., Sorokin A.P., Matyukhin N.M. *Interchannel Exchange in Fuel Assemblies of Fast Reactors (Calculation Programs and Practical Application)*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1991, 224 p. (in Russian).
9. Gabriyanovich B.N., Delnov V.N. *Features of Hydrodynamics of Flow Parts of Collector Systems of Heat Exchangers and Reactors of Nuclear Power Plants*. Sarov. RFYaTs – VNIIEF Publ., 2016, 216 p. (in Russian).
10. Delnov V.N., Gabriyanovich B.N., Yuriev Yu.S. Application for Discovery: No. 70 from 17.04.2019. Discovery Priority: 26.11.2012. Diploma for the Discovery of MAANOiI No. 518. *Regularity of Liquid Distribution at the Outlet from the Flow Parts of Distributing Collector Systems* (in Russian).
11. Delnov V.N. Application for Discovery: No. A-678 from 25.02.2021. Discovery Priority: 2018. Diploma for the Discovery of MAANOiI No. 524. *The Phenomenon of the Emergence of Hydrodynamic Identity in Distributing Collector Systems* (in Russian).
12. Opanasenko A.N., Sorokin A.P., Trufanov A.A., Denisova N.A., Sviridov E.V., Razuванov N.G., Zagorsky V.G., Belyaev I.A. Experimental Studies of Coolant Temperature and Velocity on an Integrated Water Model of a Fast Reactor in Different Operating Modes. *Atomic Energy*. 2017, v. 123, iss. 1, pp. 21-27. Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/550/529> (accessed Dec. 05, 2021).
13. Grabezhnaya, V.A., Mikheev, A.S. Experience in Experimental Validation of the Steam Generators Used in NPP with Fast Reactors. *Atomic Energy*. 2015, v. 119, iss. 2, pp. 106-116; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-015-0036-0>.
14. Sorokin A.P., Kuzina Yu.A. & Ivanov E.F. Characteristics of Heat Transfer During Boiling of Liquid Metal in the Fuel Assemblies of Fast Reactors in Emergency Regimes. *Atomic Energy*. 2019, v. 126, iss. 2, pp. 73-82; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00518-0>.
15. Sorokin A.P., Kuzina Yu.A., Ivanov E.F. Heat Transfer During Boiling of Liquid Metal Coolants in Fuel Assemblies of Fast Reactors in Emergency Modes. *VANT. Ser. Yaderno-Reaktornye Konstany*. 2018, iss. 3, pp. 176-194. Available at: <https://vant.ippe.ru/year2018/3/thermal-physics-hydrodynamics/1548-17.html> (in Russian) or <https://vant.ippe.ru/en/year2018/3/thermal-physics-hydrodynamics/1527-17.html> (English version) (accessed Dec. 05, 2021).
16. Sorokin A.P., Ivanov E.F., Kuzina Yu.A., Denisova N.A., Nizovtsev A.A., Privezentsev V.V., Sorokin G.A. Experimental and Numerical Investigations into Heat Exchange and Stability of Circulation during Liquid Metals' Boiling in Assemblies of Fast Neutron Reactors in Accident Regimes. *Teploenergetika*. 2021, v. 68, no. 10, pp. 752-762; DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601521090093> (in Russian).
17. Kirillov P.L., Bobkov V.P., Zhukov A.V., Yuriev Yu.S. *Handbook of Thermohydraulic Calculations in Nuclear Power Engineering*. V. 1. Moscow. IzdAT Publ., 2010, 770 p. (in Russian).

Authors

Kuzina Yulia Albertovna, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: ukyzina@ippe.ru

Sorokin Alexandr Pavlovich, Chief Researcher, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: sorokin@ippe.ru

Delnov Valery Nikolaevich, Head of Department, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: delnov@ippe.ru

Denisova Nataliya Aleksandrovna, Leading Engineer

E-mail: ndenisova@ippe.ru

Sorokin Georgy Alexandrovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: alexander.p.sorokin@gmail.com