УДК 536.24+621.039.553.34 DOI: 10.26583/npe.2024.2.04

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТОРАХ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Кузина Ю.А., Сорокин А.П.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Представлены результаты исследований процессов гидродинамики и теплообмена в реакторах на быстрых нейтронах. Анализируются данные по турбулентному переносу импульса в пучках стержней. Показано, что интенсификация турбулентного переноса импульса в каналах пучков стержней обусловлена крупномасштабным турбулентным переносом импульса (вторичными токами). Объясняется интенсификация межканального турбулентного обмена в тесных решетках стержней. Получена зависимость для коэффициентов неподобия вынужденного проволочной навивкой межканального конвективного обмена массой, импульсом и энергией в пучках стержней. Изложены методики и результаты численного моделирования статистических характеристик теплогидравлики в тепловыделяющих сборках твэлов с использованием метода Монте-Карло, а также термомеханического анализа сборок твэлов в процессе кампании. Изложены результаты моделирования на водяной модели полей температуры и структуры движения теплоносителя в первом контуре реактора в различных режимах. Выявлена устойчивая температурная стратификация теплоносителя в периферийной зоне верхней камеры реактора над боковыми экранами. Показано, что процесс кипения щелочных жидких металлов в тепловыделяющих сборках твэлов характеризуется устойчивыми и пульсационными режимами, кризисом теплообмена. Показано согласие результатов экспериментального и численного моделирований. Построена картограмма режимов течения двухфазного потока щелочных жидких металлов в сборках твэлов. Анализируются влияние шероховатости поверхности твэлов на процесс кипения и теплоотдача при кипении жидких металлов. Показано длительное охлаждение тепловыделяющей сборки с «натриевой полостью» над активной зоной реактора в аварийных режимах с кипением жидких металлов. Сформулированы задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, сборки твэлов, гидродинамика, теплообмен, эксперимент, расчетное моделирование, турбулентный перенос, стратификация, режимы кипения, шероховатость.

© Кузина Ю.А., Сорокин А.П., 2024

Для цитирования: *Кузина Ю.А., Сорокин А.П.* Актуальные вопросы моделирования теплогидравлических процессов в реакторах на быстрых нейтронах. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 2. – С. 41 – 58. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.04

ВВЕДЕНИЕ

Процессы гидродинамики, массо- и теплообмена и свойства теплоносителей оказывают значительное влияние на нейтронно-физические характеристики реактора, процессы коррозии, надежность и безопасность реакторной установки. Недооценка теплофизических проблем отражается на решении этих актуальных задач.

Теплофизическое обоснование разрабатываемых АЭС и ЯЭУ потребовало создания соответствующей экспериментальной базы, разработки специального оборудования и новых методов экспериментального и расчетного моделирования протекающих процессов [1–3].

Успехи, достигнутые в результате освоения жидкометаллических теплоносителей, позволили предложить жидкометаллическую технологию в различных технических приложениях: натрий – на АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, натрий и натрий-калий – в металлургической и химической промышленности; натрий-калий, цезий, литий – в установках космического назначения; литий – в реакторах синтеза – термоядерных реакторах и т.д. [4].

Для дальнейшего развития атомной энергетики России, реализации стратегии двухкомпонентной атомной энергетики с замыканием топливного цикла с использованием реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем [5], обеспечения ее конкурентоспособности и сохранения приоритета Россия в области АЭС с реакторами на быстрых нейтронах необходимо продолжение комплекса проблемно-ориентированных исследований прежде всего по инновационным проектам энергетических реакторов на быстрых нейтронах БН-ГТ и БН-ВТ.

Анализ опыта создания и эксплуатации ЯЭУ с жидкометаллическим охлаждением показывает, что для улучшения их характеристик, повышения безопасности необходимо глубокое понимание фундаментальных закономерностей процессов гидродинамики и теплообмена, определяющих физико-химические и массообменные процессы в контурах ЯЭУ. В этой связи актуально изучение процессов турбулентного массо- и теплообмена в каналах, элементах конструкции и баке реактора для номинальных, переходных и аварийных режимов, включая аварийное расхолаживание и возникновение и развитие кипения натрия в активной зоне реактора.

В работе обсуждаются результаты актуальных с точки зрения авторов проблемно-ориентированных исследований теплогидравлики быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением, сформулированы задачи дальнейших исследований.

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛАХ И СТЕРЖНЕВЫХ СБОРКАХ АКТИВНОЙ ЗОНЫ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

При планировании экспериментальных исследований, обобщении их результатов применялся анализ подобия и следующие из него критерии и асимптотические решения [3].

На всех этапах проводимых исследований большое внимание уделялось методикам и технике измерений, включая разработку уникальных датчиков скорости, расхода, давления, уровня, температуры и др. Для измерения расходов жидких металлов созданы расходомеры различных конструкций. Позднее были созданы методики и техника электромаг-

нитного измерения векторов локальных расходов (скоростей) жидкого металла в каналах и пучках стержней [6]. Созданы микротермопары для измерения температуры в защитных чехлах с наружным диаметром 0,3–0,8 мм, работающие в интервале температур от 300 до 1800°C.

ГИДРОДИНАМИКА СТЕРЖНЕВЫХ СБОРОК С ГЛАДКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ТЕПЛООБМЕНА

Высокая теплопроводность и слабая зависимость теплофизических характеристик жидких металлов от температуры приводят к слабой зависимости профиля температуры в потоке жидкости от величины теплового потока. Вследствие этого тепловой поток слабо влияет на гидравлическое сопротивление при течении жидких металлов. Данные для шероховатых труб также не имели каких-либо особенностей течения жидких металлов. Таким образом, результаты проведенного анализа позволяют проводить моделирование гидродинамики жидких металлов на воде и газах [3]. Определяющим критерием моделирования гидродинамических процессов в каналах является критерий Re.

Широкие исследования проведены по гидродинамике каналов сложной формы, включая пучки стержней, проточные части реакторных установок. Максимальное внимание уделялось измерениям полей скорости, распределению касательных напряжений, турбулентных характеристик. Это позволило глубже понять механизм турбулентного теплообмена и наметить пути к построению физически обоснованной теории турбулентного теплообмена [7].

Полученные обширные экспериментальные данные по турбулентным гидродинамическим характеристикам в сборках твэлов показывают [8], что в распределении касательных напряжений вдоль смоченного периметра ячейки в правильной решетке стержней наблюдается локальный максимум в месте наибольшего расширения канала, который можно объяснить воздействием вторичного вихря.

В деформированной решетке 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 [8].

Проведенный анализ показал, что данные различных авторов по распределению коэффициентов радиальной турбулентной диффузии и азимутальной турбулентной диффузии по нормали к стенке в рамках моделирования турбулентного движения несжимаемой жидкости в приближении уравнений Рейнольдса в треугольных решетках стержней существенно различаются (рис. 1, 2). Приведенные на рисунках 1, 2 данные соответствуют следующим ссылкам на источники литературы: 1 – Ниязинг [9]; 2 – Мантлик [10]; 3 – Мильбауэр [11]; 4 – Ян и Цзян [12]; 5 – Неелен [13]; 6 – Шимицу [14]; 7 – Ибрагимов [7]; 8 – эксперимент [8]; 9 – труба по Рейхарду [15]; 10 – эксперимент Кьелстрема [16]; 11 – Рем [17]. Значения коэффициентов анизотропии переноса импульса в азимутальном и радиальном направлениях, рассчитанные по зависимостям разных авторов, различаются также на порядок и более (рис. 3).

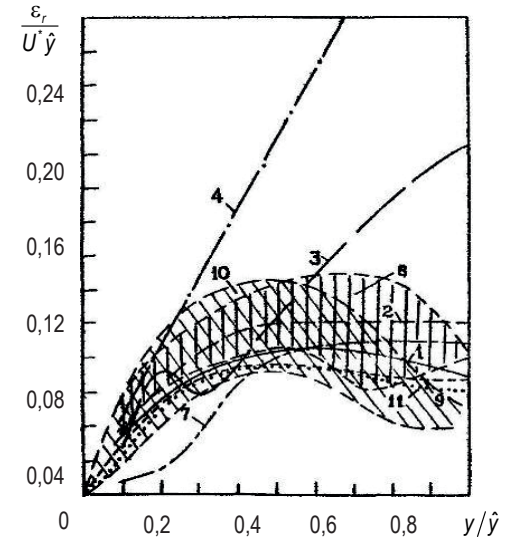

Рис. 1. Распределение коэффициента радиальной турбулентной диффузии по нормали к стенке по данным разных авторов

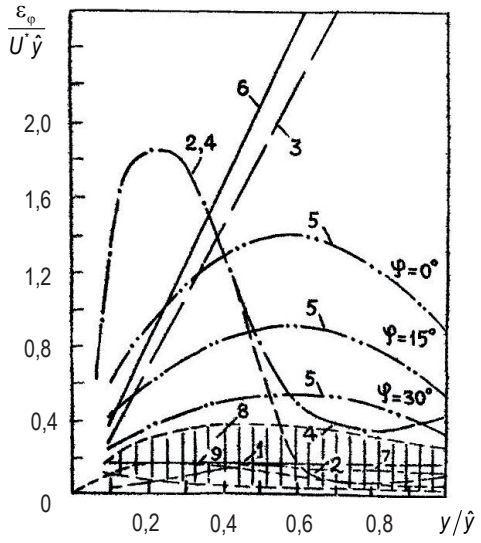

Рис. 2. Распределение коэффициента азимутальной турбулентной диффузии по нормали к стенке по данным разных авторов

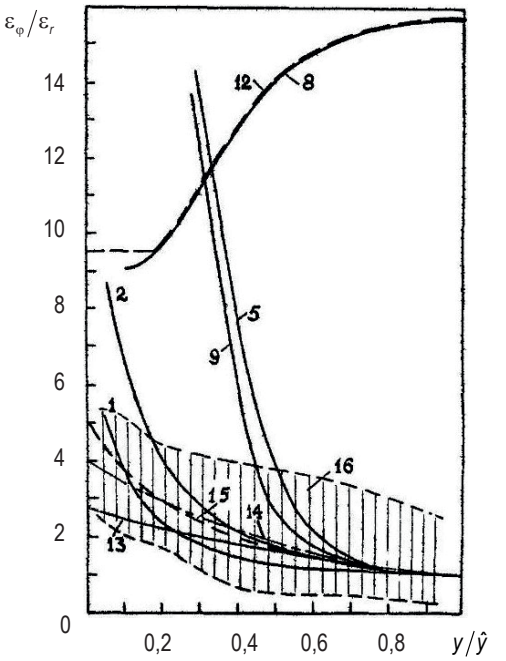

Рис. 3. Сравнение зависимостей разных авторов для коэффициента анизотропии турбулентного переноса импульса в треугольных решетках стержней: 1, 2, 5 – Силе [14]; 3 – Слагтер [18]; 9 – Ян и Цзян [12]; 12 – Мильбауэр [11]; 13 – Мантлик [10]; 14 – Ибрагимов [7]; 15 – труба по Рейхарду [15]; 16 – эксперимент [8]

Особенностью структуры турбулентности в каналах сложной формы является наряду с мелкомасштабной турбулентной диффузией наличие крупномасштабного турбулентного переноса (крупномасштабные турбулентные вихри или так называемые вторичные токи).

Вторичные токи возникают, во-первых, вследствие неустановившегося течения на начальном участке каналов, во-вторых, порождаются вследствие неоднородности турбулентности в пристенной области каналов. Они возникают в каналах с несимметричным поперечным сечением, таких как каналы в стержневой сборке. Для полностью развитого потока они имеют форму замкнутых вихрей.

Результаты проведенного анализа указывают на необходимость совершенствования моделирования турбулентного переноса импульса в пучках стержней, что требует точных надежных экспериментальных данных по структуре и характеристикам турбулентного переноса импульса.

Крупномасштабный перенос импульса осуществляется молями, движущимися из областей с высокой скоростью в область

с низкой скоростью (и наоборот). При движении крупномасштабных молей происходит их разрушение и образование мелкомасштабных молей, которые увеличивают кинетическую энергию турбулентных пульсаций. Диссипация энергии крупномасштабных вихрей полностью идет на увеличение кинетической энергии мелкомасштабной турбулентности.

Используем для описания интенсивности вторичных токов соотношение, развитое из эмпирической аппроксимации Ниязинга [19], а для оценки диссипации кинетической энергии крупномасштабных вихрей – формулу Булеева Н.И. [20], полученную в результате решения уравнения движения моля при его взаимодействии с окружающей средой. После выполнения необходимых преобразований получаем, что приращение кинетической энергии турбулентных пульсаций по нормали от поверхности стержней описывается формулой

$$\Delta K^{+} = \frac{\Delta K}{\left(u^{*}\right)^{2}} = \frac{1{,}2}{\sqrt{\lambda/8}} \frac{\dfrac{d}{d\varphi}\sqrt{\tau_w^{+}}}{\left(\dfrac{d}{d\varphi}\sqrt{\tau_w^{+}}\right)^{\max}} \left[\left(\tau_w^{+}\right)^{\max} - \left(\tau_w^{+}\right)^{\min}\right] \times \tag{1}$$

$$\times \left\{ \left| \frac{d}{d\varphi}\sqrt{\tau_w^{+}}\, f\left(r\varphi\right) \right| + \left| \left[\left(\frac{d}{d\varphi}\sqrt{\tau_w^{+}}\right)^{\max} - \left(\frac{d}{d\varphi}\sqrt{\tau_w^{+}}\right)^{\min} \right] f\left(r\varphi\right) \right| \right\},$$

$$f\left(r\varphi\right) = \frac{1 - e^{-\alpha r\varphi}}{\alpha r\varphi}, \tag{2}$$

$$\alpha r\varphi \sim \frac{2}{\mathrm{Re}} \frac{\left(d_{\text{Г}}/d\right)\left(r\varphi/\alpha\right)}{r_{\text{М}}^{2}}, \tag{3}$$

где K – кинетическая энергия турбулентных пульсаций скорости; u – скорость теплоносителя; λ – коэффициент гидравлического сопротивления канала; τ_w – касательное напряжение на поверхности стержня; φ – азимутальная координата, Re – число Рейнольдса; d – диаметр стержня; $d_{\text{Г}}$ – гидравлический диаметр канала; $r_{\text{м}}$ – радиус молей.

Сравнение расчетов по формулам (1) – (3) с экспериментальными данными для бокового канала без вытеснителей показывает [8], что расчетное значение кинетической энергии турбулентности вблизи стенки выше, чем в эксперименте, в ядре потока – ниже, чем в эксперименте (рис. 4а). Аналогичные данные получены для случая деформации пучка (рис. 4б).

Значение коэффициента азимутальной турбулентной диффузии импульса вследствие крупномасштабного переноса импульса находится по следующей формуле

$$\varepsilon_{\varphi}^{+} = \frac{\varepsilon_{\varphi}}{u^{*}\hat{y}} = -\frac{\overline{w'u'}}{\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u}{\partial\varphi}\dfrac{u^{*}\hat{y}}{y + d/2}} = \frac{1{,}2\sqrt{\lambda/8}\left[\left(\tau^{*}\right)^{\max} - \left(\tau^{*}\right)^{\min}\right]\sqrt{\dfrac{2}{3}\Delta K^{+}}}{\dfrac{\hat{y}}{r}\left(\dfrac{\partial}{\partial\varphi}\sqrt{\tau^{+}}\right)^{\max}}. \tag{4}$$

Значение $\left(\varepsilon_{\varphi}^{+}\right)^{\max}$ для бокового канала составляет ~ 0,32, для деформированного канала ~ 1.

Обработка данных гидродинамических исследований, выполненная для периферийной области ТВС при смещении периферийного твэла по периметру чехла или при групповом смещении твэлов во внутреннюю область пучка, показала, что интенсивность межканального турбулентного обмена импульсом в тесных решетках выше, чем в раздвинутых [8].

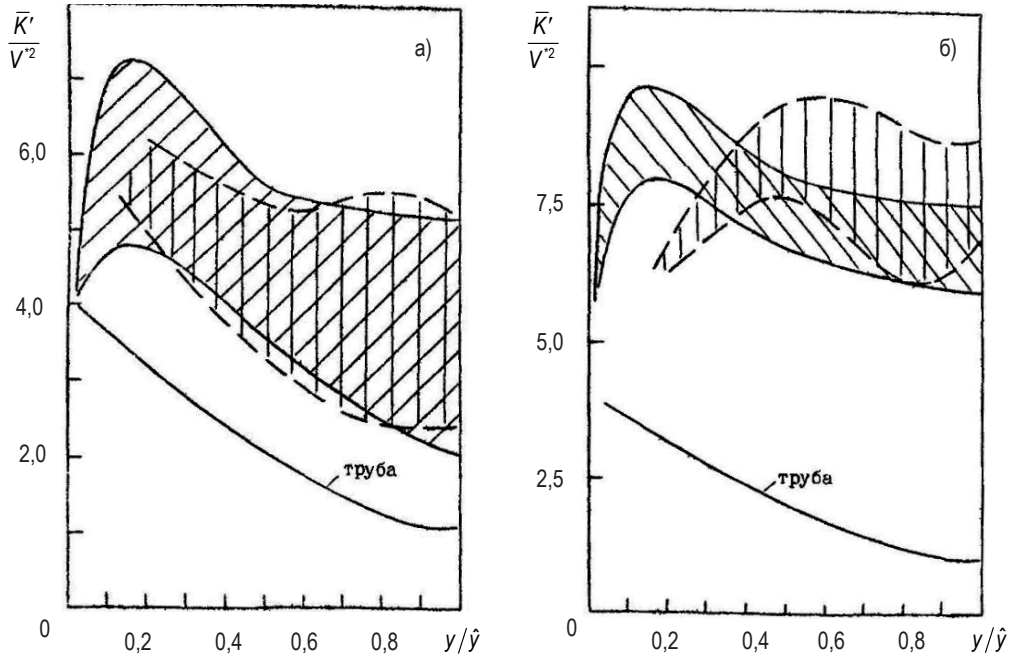

Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных значений кинетической энергии турбулентных пульсаций в области бокового канала, прилежащей к угловому каналу а) и в области бокового канала, прилежащей к деформированному каналу б): IIIIII – эксперимент; *IIIIII* – расчет

Эмпирическая зависимость для коэффициента межканального турбулентного обмена импульсом имеет вид [26]

$$\mu^{w} = \frac{0{,}0293 - 0{,}051\left(s/d - 1\right)}{\left[\left(2\sqrt{3}/\pi\right)\left(s/d\right)^{2} - 1\right]\mathrm{Re}^{0{,}1}\,d}, \text{ 1/м} \qquad (5)$$

$$1{,}035 \le s/d \le 1{,}25; \quad 6{,}5\cdot 10^{4} \le \mathrm{Re} \le 18{,}1\cdot 10^{4},$$

где s – шаг решетки твэлов.

Анализ экспериментальных данных по межканальному турбулентному обмену в сборках твэлов, дистанционируемых решетками [21], показывает, что приближенно можно использовать зависимости для сборок гладких стержней.

Результаты численного моделирования полей скорости и температуры в модельной ТВС с применением коммерческих трехмерных CFD-кодов указывают [22], что использованные специалистами из разных стран трехмерные коды России (Д.А. Афремов, В.П. Смирнов, Д.А. Яшников, код BRS-TVS.R), Японии (Х. Охшима, коды SPIRAL, AQUA), Испании (А. Пена, Г.А. Эстебан, код FLUENT), Нидерландов (Й. Карлссон, Х. Вайдер, код STAR-CD), Республики Корея (К. Сах, коды MATRA, CFX) весьма приближенно описывают представленные экспериментальные данные. Используемые в кодах модели турбулентного переноса, к сожалению, не учитывают в достаточной степени анизотропию турбулентного переноса, а также крупномасштабный турбулентный перенос.

ГИДРОДИНАМИКА ОРЕБРЕННЫХ ПРОВОЛОЧНОЙ НАВИВКОЙ СТЕРЖНЕВЫХ СБОРОК

Результаты экспериментальных исследований в пучке с дистанционирующей проволочной навивкой типа «ребро по оболочке» указывают на существенное влияние на поле скорости в каналах пучка стержней закрутки потока теплоносителя дистанционирующей навивкой.

Результаты экспериментальных исследований показали, что имеет место неэквивалентность между межканальным конвективным переносом субстанции (импульса и тепла) и массы. Величина коэффициента неэквивалентности между переносом субстанции и массы является функцией геометрии сборки, режимных параметров, переносных свойств теплоносителя и характера изменения субстанции по длине каналов сборки. Значение осредненного коэффициента неэквивалентности между переносом тепла и массы изменяется от 0,6 до единицы, увеличивается с ростом параметра h/d и уменьшается с уменьшением Re, Pr, s/d [23].

Результаты анализа и обобщения данных по гидравлическому сопротивлению в сборках с треугольной решеткой гладких и оребренных проволочной навивкой стержней типа «ребро по оболочке», представленные в работе [24], описываются формулой

$$\lambda_P = \frac{0{,}210}{\mathrm{Re}^{0{,}25}}\left\{1+\frac{124}{\left(h/d\right)^{1{,}65}}\left[1{,}78+1{,}485\left(s/d-1\right)\right]\left(s/d-1\right)\right\}, \qquad (6)$$

$$1{,}0 \le s/d \le 1{,}5;\ 10^4 \le \mathrm{Re} \le 2\times10^5;\ 8{,}0 \le h/d \le 50,$$

где h – шаг дистанционирующей проволочной навивки на твэлах.

Формула (6) проста по структуре, дает предельный переход к формуле для гладких стержней в случае их плотной упаковки ($s/d = 1{,}0$) и согласуется с экспериментальными данными с точностью $\pm$ 15%.

ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛАХ И ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ЖИДКИМИ МЕТАЛЛАМИ

В результате экспериментального исследования полей температуры в потоках жидкометаллических теплоносителей, распределения температуры и тепловых потоков по периметру сложных каналов, влияния содержания примесей на теплогидравлические характеристики была доказана возможность предсказанного теорией интенсивного теплосъема жидкометаллическими теплоносителями.

Обобщение экспериментального материала выявило механизм теплообмена на теплоотдающей поверхности в жидких металлах – если концентрация примесей в теплоносителе не превышает их растворимость при температуре циркулирующего жидкого металла, контактное термическое сопротивление на границе раздела теплоноситель – поверхность теплообмена отсутствует.

Наиболее надежные данные по теплообмену в жидком металле в трубах, исключающие влияние контактного термического сопротивления, были получены по распределению температуры в потоке жидкого металла [3, 25]. Таким образом, было показано, что в этих условиях теплоотдача к жидким металлам Pb, Pb-Bi, Hg, Na, Na-K, Li и др. описывается единой критериальной зависимостью, близкой к полученной по формуле Лайона [3].

Полученные на основании экспериментов и расчетов обобщения, рекомендации и формулы для определения коэффициентов теплоотдачи и неравномерностей температуры

при теплосъеме жидкими металлами в правильных решетках твэлов учитывают теплофизические свойства твэлов через критерий их теплового подобия [3]. В итоге многочисленных экспериментальных и расчетных исследований получены обширные данные по теплоотдаче и полям температуры твэлов для различных неноминальных условий и режимов работы активной зоны быстрых реакторов (изменение геометрии, всплески энерговыделения, статистическое распределение параметров, факторы перегрева и т.д.) [26].

На основании проведенных исследований развиты расчетные модели для всех механизмов межканального обмена (конвективного, молекулярного, турбулентного, за счет теплопроводности твэла). Получены обобщающие зависимости для характеристик межканального обмена, позволившие замкнуть систему уравнений поканального теплогидравлического анализа сборок твэлов [23].

С использованием данных многолетних экспериментальных исследований создан код МИФ поканального теплогидравлического расчета ТВС, используемый для проектных и эксплуатационных расчетов активной зоны реакторов на быстрых нейтронах [27]. Для каждой из ТВС возможно выполнение номинального (по средним параметрам пучка) или статистического (по распределенным параметрам) расчета теплогидравлических характеристик. При статистическом расчете ТВС выполняется последовательный многократный расчет температурного поля различных вариантов с распределенными случайным образом с использованием метода Монте-Карло проходными сечениями каналов и энерговыделением твэлов, а также статистическая обработка результатов – нахождение математического ожидания и дисперсии максимальной температуры оболочек твэлов, подогрева теплоносителя в каналах и неравномерности температуры по периметру твэлов [28].

Расчеты, выполненные по термомеханическому коду СДТ-МИФ для ТВС зоны большого обогащения топлива реактора типа БН-600 при выгорании 7% тяжелых атомов, что соответствует дозе около 60 сна, показали, что для дозы свыше 42 сна изменение площади ячеек по высоте ТВС носит сложный характер [29]. Различие максимальной температуры оболочек твэлов в начале первой и в конце двенадцатой микрокампаний лежит в пределах 10–15°С, максимальная азимутальная неравномерность температуры твэлов изменяется в тех же пределах.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния оболочек твэлов для геометрии ТВС реактора типа БН-600 показали, что максимальные значения напряжений имеют место в сечении с максимальным формоизменением [30]. В начале кампании максимальные осевые сжимающие напряжения 18 кг/мм^2 соответствуют пику температуры, наибольшие растягивающие напряжения составляют 14 кг/мм^2. 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.

ТЕПЛОГИДРАВЛИКА В БАКЕ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С ИНТЕГРАЛЬНОЙ КОМПОНОВКОЙ ОБОРУДОВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Первый контур циркуляции теплоносителя (баковая конструкция) реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем является сложным сочетанием последовательно и параллельно соединенных элементов с различной ориентацией в поле тяжести, геометрические характеристики проходных сечений которых резко меняются по ходу движения.

Погрешности моделирования теплогидравлики на фрагментарных секторных моделях с изотермическим потоком во многом связаны с неучетом пространственных трехмерных эффектов и температурной неоднородности потока. Теплоноситель всегда неизотермичен из-за неравномерности энерговыделения, перепада температуры между узлами контура циркуляции, особенностей теплосъема в переходных и аварийных режимах работы.

Проведение теплогидравлических исследований при использовании крупномасштабных моделей с натурным теплоносителем приводит к высокой стоимости экспериментальных установок. Проведенные авторами исследования показали, что точное моделирование гидродинамики и теплообмена на мелкомасштабных моделях с натурным теплоносителем (жидким металлом) невозможно из-за одновременного несоблюдения важнейших критериев подобия – чисел Рейнольдса ($\mathrm{Re} = wl/\nu$), Пекле ($\mathrm{Pe} = wl/a$), Фруда ($\mathrm{Fr} = w^2/g\beta\Delta Tl$) [19]. При числе $\mathrm{Re} > 10^4$ размеры застойных и рециркуляционных образований при равных значениях числа Фруда для модели и реактора ($\mathrm{Fr}_м = \mathrm{Fr}_р$) не изменяются. Таким образом, моделирования по числу Рейнольдса не требуется. В данном случае моделирование режимов принудительной циркуляции осуществлялось по числам Фруда и Пекле. Приближенное моделирование режимов естественной циркуляции обеспечивалось по числу Эйлера $\mathrm{Eu} = \Delta P/\rho W^2$.

Исходя из этого экспериментальные исследования выполнены на стенде В-200 в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» на водяной модели САРХ быстрого реактора с интегральной компоновкой оборудования в масштабе ~ 1:10 (рис. 5) [31].

Пространственные распределения с азимутальной неоднородностью температуры в верхней камере исследовались тремя подвижными термозондами (ПЗ), установленными под углом ~ 150° с 15-ю горизонтально расположенными термопарами в каждом (рис. 6).

Результаты экспериментов показывают, что воздействие термогравитационных сил приводит к температурному расслоению с возникновением застойных и рециркуляционных образований, перестройке характера течения и температурного режима (рис. 7 а, б). На стратифицированных границах раздела возникают внутренние волны, которые вызывают пульсации температуры на стенках реакторного оборудования. Это приводит к тер-

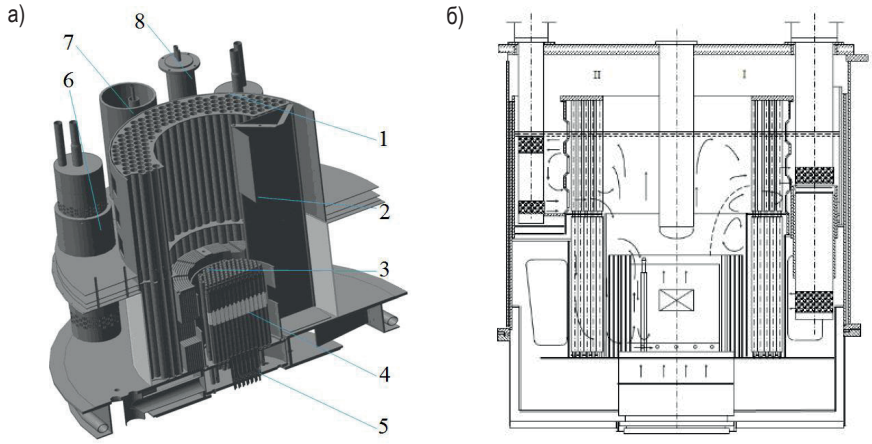

Рис. 5. Основные элементы первого контура водяной модели на стенде В-200 (а); схема циркуляции теплоносителя в экспериментальной модели САОТ (I – номинальный режим; II – режим ЕЦ) (б): 1, 6 – промежуточные теплообменники (ПТО); 2 – элеваторная выгородка; 3 – элементы внутрибаковой защиты; 4 – активная зона (имитаторы ТВС); 5 – напорная камера; 7 – имитатор ГЦН-1; 8 – аварийный теплообменник (АТО)

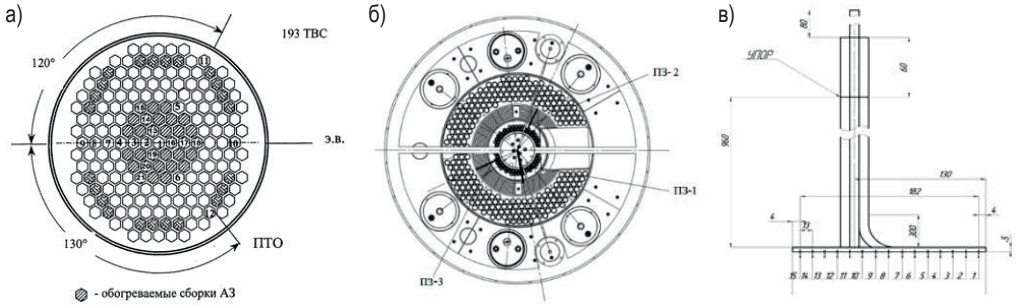

Рис. 6. Картограмма имитаторов сборок активной зоны (а); схема расположения подвижных термозондов (ПЗ) (б); расположение термопар на ПЗ (в)

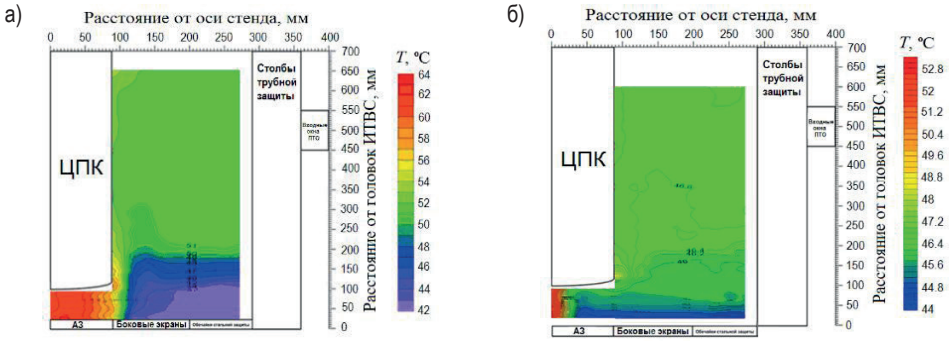

Рис. 7. Поля осредненной температуры по высоте верхней камеры, полученные при перемещении подвижных термозондов ПЗ-1 и ПЗ-2 в номинальном режиме (а), и камеры в установившемся режиме расхолаживания естественной конвекцией (б)

мической усталости конструкционных материалов и снижению сроков эксплуатации реакторного оборудования. Установившийся режим естественной циркуляции характеризуется значительно меньшими значениями градиента температуры в вертикальном направлении над боковыми экранами (рис. 7б).

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ

Кипение жидких металлов в стесненных каналах ТВС является сложным и динамичным высокотемпературным процессом (температура насыщения натрия при атмосферном давлении 883°С). Динамика образования паровой фазы может быть взрывной особенно с учетом возможного перегрева жидкого металла относительно температуры насыщения при вскипании.

Исследования кипения жидкого металла, выполненные в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», на моделях ТВС показали три режима течения двухфазного потока жидких металлов в пучках твэлов: пузырьковый, снарядный и дисперсно-кольцевой, являющийся предельным по отношению к охлаждению сборки. Режим устойчивого пузырькового кипения в модельных ТВС отмечается лишь в ограниченной области тепловых потоков, его переход в режим неустойчивого пульсационного снарядного кипения определяется разными факторами [32].

В сборках с гладкими поверхностями теплообмена развитие неустойчивого (снарядного) режима с резкими колебаниями расхода теплоносителя и перегрева стенки имитато-

ров может сразу привести к кризису теплообмена; запас до кризиса, по существу, отсутствует. Для сборок с технической шероховатостью поверхности благодаря появлению на поверхности теплообмена пленки жидкости наблюдается переход от неустойчивого снарядного к устойчивому дисперсно-кольцевому режиму [32].

Границы перехода от пузырькового к снарядному, дисперсно-кольцевому и дисперсному режимам течения двухфазного потока жидкого металла в пучках твэлов аппроксимируются простыми зависимостями. Следует отметить, что картограмма режимов течения двухфазного потока жидких металлов, представленная на рис. 8, существенно отличается от соответствующей картограммы для воды.

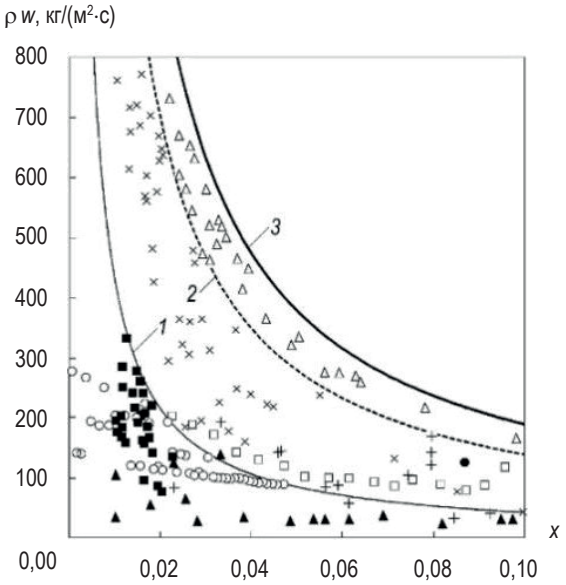

Рис. 8. Картограмма режимов течения двухфазного потока жидкометаллических теплоносителей при кипении: 1 – граница пузырькового и снарядного режимов течения; 2 – граница снарядного и дисперсно-кольцевого режимов течения; 3 – граница перехода к закризисному теплообмену; ▲, +, ● – первый стабильный режим, пульсационный и второй стабильный режимы кипения натрия соответственно по данным Ямагучи [33]; ■, ×, Δ – данные АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» по кипению натрий-калиевого сплава пузырьковый, снарядный и дисперсно-кольцевой режимы соответственно; данные АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» по кипению натрия ○, □ – пузырьковый и снарядный режимы соответственно

Экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении натрия и калия в большом объеме и каналах, а также натрий-калиевого сплава в семистержневом пучке в критериальном виде (рис. 9) описываются зависимостью числа Нуссельта (Nu) от числа Пекле (Pe) и комплекса (K_p):

$$\mathrm{Nu} = 8{,}7 \cdot 10^4 \mathrm{Pe}^{0{,}7} K_p^{0{,}7}, \tag{7}$$

где $\mathrm{Nu} = \dfrac{\alpha}{\lambda'}\sqrt{\dfrac{\sigma}{g\left(\rho' - \rho''\right)}}$ – число Нуссельта; $\mathrm{Pe} = \dfrac{q\,c\,\rho'}{r\,\rho''\,\lambda'}\sqrt{\dfrac{\sigma}{g\left(\rho' - \rho''\right)}}$ – число Пекле;

$K_p = \dfrac{p}{\sqrt{\sigma\, g\left(\rho' - \rho''\right)}}$.

Таким образом, показана возможность переноса данных по теплообмену при кипении, полученных на натрий-калиевом теплоносителе, на натрий.

Результаты расчетных исследований для системы одиночных и параллельных ТВС, выполненных по модернизированной версии поканального кода SABENA [34], реализующей двухжидкостную модель двухфазного потока жидкого металла в приближении равных давлений в паровой и жидкой фазах, воспроизводят ход температуры, развитие режимов течения двухфазного потока, пульсации расхода, полученные в экспериментах, а также демонстрируют противофазные пульсации расхода теплоносителя в параллельных ТВС, межканальную неустойчивость, характеризующуюся значительным возрастанием амплитуды пульсаций расхода теплоносителя в параллельных ТВС по сравнению с одиночными

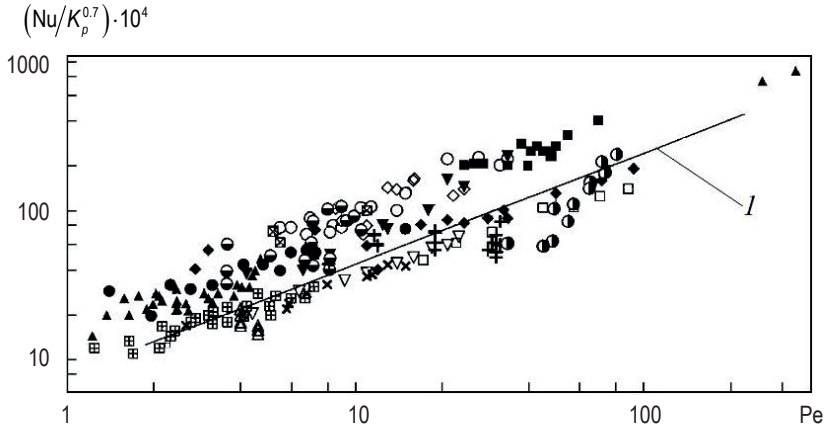

Рис. 9. Экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении жидких металлов в большом объеме, щелях, трубах и семистержневом пучке: ⊞, ●, ×, ▽, □ – кипение калия в большом объеме при p = 0,12; 0,11; 0,07; 0,04 и 0,004 МПа соответственно; ▲, ◒ – кипение натрия в большом объеме при p = 0,1 и 0,0472 МПа; ◊, ▼ – кипение натрия в большом объеме при p = 0,026 и 0,01 МПа; ◆ – кипение натрия в большом объеме при нормальных условиях; ■ – кипение натрия, щель d = 2 мм; ○ – кипение натрия, щель d = 4 мм; ⊠ – кипение натрия, щель d = 6 мм; △, ✚ – кипение калия, труба d = 22 и 8,3 мм; ◑ – кипение натрий-калиевого сплава в семистержневом пучке; 1 – зависимость, рассчитанная по формуле (7)

ТВС, периодическим падением расхода теплоносителя в ТВС практически до нуля и возможным осушением ТВС – возникновение кризиса теплообмена.

Сравнение результатов расчетов и экспериментов показало возможность отвода тепла кипящим теплоносителем в модельной ТВС с «натриевой полостью», расположенной над активной зоной реактора для исключения развития аварийной ситуации с нарушением нормальной эксплуатации (авария ULOF) [32], при тепловых нагрузках 10–15 % и уровне расхода натрия около 5% от номинальных значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Задачи дальнейших теплогидравлических исследований включают в себя

• разработку методов физического моделирования теплогидравлических процессов на всех участках гидродинамического тракта реактора (АЗ, ПТО, САОТ) с учетом нестационарности, например, развитие естественной циркуляции при возникновении кипения натрия в ТВС;

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

• экспериментальное определение базовых констант и замыкающих соотношений по теплообмену и температурным полям для всех условий и режимов работы (деформация

геометрии, всплески энерговыделения, статистическое распределение параметров и т.д.) с учетом факторов перегрева, используемых при численной реализации комплекса кодов;

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

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

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

• изучение режимов двухфазного потока натрия, динамики распространения области кипения натрия в аварийных режимах в реальной ТВС с «натриевой полостью» над активной зоной реакторов на быстрых нейтронах, определение границы устойчивого охлаждения активной зоны;

• создание и обоснование системы верификационных тестов;

• разработку 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 эксплуатации.

Литература

1. Теплофизическая стендовая база атомной энергетики России и Казахстана /*Под ред. В.А. Першукова, А.В. Архангельского, О.Е. Кононова, А.П. Сорокина.* – Саров: ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2016. – 160 с.

2. *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 год» /Под общей редакцией А.П. Сорокина, А.А. Труфанова, Т.Н. Верещагиной. – Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ. – 2015. – С. 24 – 51.

3. *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

4. *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

5. *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://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t120-4_2016/p183/ (дата доступа 15.03.2024).

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. – 406 с.

7. *Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.П., Сабелев Г.И., Таранов Г.С.* Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. – М.: Атомиздат, 1978. – 296 с.

8. *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. DOI: https://doi.org/10.55176/2414-1038-2021-2-139-166

9. *Nijsing R., Eifler W.* Temperature Fields in Liquid-Metal-Cooled Rod Assemblies. // Progress in Heat and Mass Transfer. – 1971. – Vol. 7. – PP. 115 – 149.

10. *Жуков А.В., Сорокин А.П., Ушаков П.А., Матюхин Н.М., Тихомиров Б.Б., Титов П.А., Михин В.И., Мантлик Ф., Гейна Я., Восагло Л., Червенка Я.* Гидродинамические характеристики в ТВС быстрых реакторов: Препринт ФЭИ-1816, Обнинск, 1986. – 68 с.

11. *Mühlbauer P. et al.* Finite Element Analysis of Turbulent Flow on Infinite Rod Bundles // Fourth Int. Top. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, NURETH-4, Karlsruhe, 1989. – Vol. 2. – PP. 1307 – 1312.

12. *Ян А., Цзян С.* Турбулентный перенос тепла и количества движения в бесконечной решетке стержней. // Теплопередача. – 1988. – № 2. – С. 36 – 43.

13. *Neelen N.* Modeling of Transport of Momentum in Parallel Turbulent Flow through a Rod Bundle // Dr-Ing, Thesis, TU Braunschweig, Germany, 1986.

14. *Shimizu T., Hinokata H., Shishido H.* Distributed Parameter Analysis for the Prediction on the Pine 5tructure of Flow and Temperature Fields in Wire-Wrapped Fuel Pin Bundle Geometrics // Nuclear Engineering and Design. – 1990. – Vol. 120. – No. 2 – 3. – PP. 369 – 383. https://doi.org/10.1016/0029-5493(90)90387-D

15. *Reichardt H.* Vollständige Darstellung der Turbulenten Geschwindigkeitsvertelung in Glatten Leitungen. // Z. Hath. and Mech. – 1951. – Vol. 31.– Iss.7.– PP. 208 – 219. DOI: https://doi.org/10.1002/zamm.19510310704

16. *Kjellstrom B.* Studies of Turbulent Plow Parallel to Rod Bundles of Triangular Array. // Aktiebolaget Atomenergi. – 1974. – Report AE-487, 191 p. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/05/148/5148715.pdf (accessed Mar.15, 2024).

17. *Ramm H., Johannsen K.* Prediction of Local and Integral Turbulent Transport Properties for Liquid-Metal Heat Transfer in Equilateral Triangular Rod Arrays // Journal of Heat Transfer. – 1975. – Vol. 97. – Ser. C. – No. 2. – PP. 238 – 245. DOI: https://doi.org/10.1115/1.3450347.

18. *Launder B.E., Spalding D.B.* The Numerical Computation of Turbulent Flows // Computation Methods App. Mech. Engrg. – 1974. – Vol. 3. – Iss. 2. – PP. 269 – 289. DOI: https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2

19. *Nijsing R. et al.* Temperature Fields in Liquid-Metal Cooled Rod Assemblies / Report on the International Heat Transfer Seminar, Trogir, Yugoslavia, 1971, EU/C-1C791/71.

20. *Булеев Н.И., Зинина Г.А.* Корректировка исходных гипотез трехмерной модели турбулентного обмена // ВАНТ. Сер.: Физика и техника ядерных реакторов. – 1981. – Вып. 2(24). – С. 26 – 35.

21. *Rowe D.S., Chapman C.C.* Measurement of Turbulent Velocity, Intensity and Scale in Rod Bundle Plow Channels Containing a Grid Spacer. // BNWL–1737, Washington. 1973.

22. *Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П.* Анализ бенчмарк-эксперимента по гидравлике и теплообмену в сборке имитаторов твэлов с жидкометаллическим охлаждением. // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99. – Вып. 5. – С. 336 – 348. Электронный ресурс: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t99-5_2005/p336 (дата доступа 15.03.2024).

23. *Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Сорокин Г.А., Денисова Н.А.* Моделирование процессов тепло- и массообмена в ТВС быстрых реакторов в рамках поканального метода расчета. Обобщенные характеристики обмена для однофазных потоков жидких металлов. // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – № 2. – С. 104 – 130. DOI: https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-2-104-130

24. *Жуков А.В., Сорокин А.П., Титов П.А., Ушаков П.А.* Анализ гидравлического сопротивления пучков твэлов быстрых реакторов. // Атомная энергия. – 1986. – Т.60. – Вып. 5. – С. 317 – 321. Электронный ресурс: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t60-5_1986/p317/ (дата доступа 15.03.2024).

25. *Кириллов П.Л.* Теплообмен в турбулентном потоке. Ч.2. Распределение скорости и температуры. // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122. – Вып. 4. – С. 192–203. Электронный ресурс: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t122-4_2017/p192/ (дата доступа 15.03.2024).

26. *Bogoslovkaya 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 Russia Approaches. IAEA–TEC-DOC–1060. – Vienna, IAEA, 1999. – 305 p.

27. *Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.* Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов (расчетные программы и практическое приложение). Серия: Физика и техника ядерных реакторов. – Вып. 38. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 225 с.

28. *Гордеев С.С., Сорокин А.П., Тихомиров Б.Б., Труфанов А.А., Денисова Н.А.* Методика расчета температурных режимов твэлов в ТВС с учетом межканального перемешивания теплоносителя и случайного отклонения параметров. // ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы. – 2016. – Вып. 4. – С. 116 – 130. Электронный ресурс: http://vant.ippe.ru/archiv/year2016.html (дата доступа 15.03.2024).

29. *Кузина Ю.А., Сорокин А.П., Денисова Н.А.* Экспериментальные и расчетные исследования гидродинамики и теплообмена в турбулентных потоках жидких металлов в ТВС быстрых реакторов. // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2023. – № 2. – С. 132 – 145. Электронный ресурс: https://vant.ippe.ru/year2023/2/thermal-physics-hydrodynamics/2328-10.html (дата доступа 15.03.2024).

30. *Сорокин А.П., Богословская Г.П., Труфанов А.А., Денисова Н.А.* Исследования влияния радиационного формоизменения ТВС на температурный режим и напряженно-деформированное состояние оболочки твэлов. // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120. – Вып. 6. – С. 341 – 346. Электронный ресурс: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t120-6_2016/p341/ (дата доступа 15.03.2024).

31. *Опанасенко А.Н., Сорокин А.П., Зарюгин Д.Г., Труфанов А.А.* Реактор на быстрых нейтронах: экспериментальные исследования теплогидравлических процессов в различных режимах работы. // Теплоэнергетика. – 2017. – № 5. – С. 1 – 10. DOI: https://doi.org/10.1134/S0040363617050058

32. *Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Иванов Е.Ф.* Особенности теплообмена при кипении жидкого металла в ТВС быстрых реакторов. // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126. – Вып. 2. – С. 69 – 76. Электронный ресурс: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t126-2_2019/p69/ (дата доступа 15.03.2024).

33. *Yamaguchi K.* Flow Pattern and Dryout under Sodium Boiling Conditions. // Nuclear Engineering and Design. – 1987. – Vol. 99. – No. 3. – PP. 247 – 263. DOI: https://doi.org/10.1016/0029-5493(87)90125-7

34. *Sorokin G.A., Ninokata H., Sorokin A.P., Endo H., Ivanov Eu.F.* Numerical Study of Liquid Metal Boiling in the System of Parallel Bundles under Natural Circulation. // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2006. – Vol. 43. – No. 6. – PP. 623 – 634. DOI: https://doi.org/10.1080/18811248.2006.9711142

Поступила в редакцию 29.03.2024

Авторы

Кузина Юлия Альбертовна, начальник отделения ядерной энергетики, к.т.н.,
E-mail: ukyzina@ippe.ru

Сорокин Александр Павлович, главный научный сотрудник, д.т.н.,
E-mail: apsorokin@ippe.ru

UDC 536.24+621.039.553.34

Actual Problems of Thermal-Hydraulic Modelling in Fast Neutron Reactors

Kuzina Yu.A., Sorokin A.P.

IPPE JSC,
1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

The results of studies of hydrodynamics and heat transfer processes in fast neutron reactors are presented. Data on turbulent momentum transfer in rod bundles are analyzed. It is shown that

the intensification of turbulent momentum transfer in the rod bundle channels is due to large-scale turbulent momentum transfer (secondary currents). The intensification of interchannel turbulent exchange in close lattices of rods is explained. A dependence is obtained for the dissimilarity coefficients of interchannel convective exchange forced by wire winding in bundles of rods. The methods and results of numerical modelling of thermal hydraulics using the Monte Carlo method, thermomechanical analysis of the temperature field in fuel rod assemblies during the campaign are presented.The results of modelling on a water model of temperature fields and the structure of coolant movement in the primary circuit of the reactor in various regimes are presented. A stable temperature stratification of the coolant was revealed in the peripheral zone of the upper chamber of the reactor above the side screens. It is shown that the process of boiling liquid metals in fuel assemblies has a complex structure, characterized by stable and pulsating regimes and a heat transfer crisis. The agreement between the results of experimental and numerical modelling is shown. A cartogram of the flow regimes of a two-phase flow of liquid metals in fuel rod assemblies has been constructed. The influence of the surface roughness of fuel elements on the boiling process and heat transfer during boiling of liquid metals is analyzed. Long-term cooling of a fuel assembly with a «sodium cavity» above the reactor core in accident regimes with boiling of liquid metals is shown. The objectives of further research are formulated.

Keywords: fast reactor, reactor tank, fuel rod assemblies, hydrodynamics, heat transfer, experiment, computational modelling, turbulent transfer, interchannel exchange, coolant temperature stratification, boiling regimes, roughness, two-fluid model.

For citation: Kuzina Yu.A., Sorokin A.P. Actual Problems of Thermal-Hydraulic Modelling in Fast Neutron Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika.* 2024, no. 2, pp. 41 – 58;
DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.04 (in Russian).

References

1. *Thermophysical bench base of the nuclear power industry in Russia and Kazakhstan* (Ed. Pershukov V.A., Arkhangelsky A.V., Kononov O.E., Sorokin A.P.). Sarov, Federal State Unitary Enterprise «RFNC – VNIIEF», 2016, 160 p.

2. Efanov A.D., Kozlov F.A., Rachkov V.I., Sorokin A.P., Chernonog V.L. *Scientific school of the State Scientific Center of the Russian Federation – IPPE «Heat and mass transfer, physical chemistry and technology of heat carriers in power systems»*. Scientific and technical collection «Results of scientific and technical activities of the Institute of Nuclear Reactors and Thermal Physics for 2014» under the general editorship of A.P. Sorokin, A.A. Trufanov, T.N. Vereshchagina. Obninsk, IPPE JSC, 2015, pp. 24 – 51.

3. Sorokin A.P, Kuzina Yu.A. Physical modeling of hydrodynamic and heat transfer process in NPP with liquid metal cooling. *Thermal Engineering.* 2019, vol. 66, pp. 533 – 542. DOI: https://doi.org/10.1134/S0040601519080093

4. 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. Use of liquid metals in nuclear and thermonuclear engineering, and in other innovative technologies. *Thermal Engineering.* 2014, vol. 61, pp. 337 – 347. DOI: https://doi.org/10.1134/S0040601514050085

5. Ponomarev-Stepnoy N.N. Two-component nuclear power system with a closed nuclear fuel cycle based on BN and VVER. *Atomic Energy.* 2016, vol. 120, iss. 4, pp. 233 – 239. DOI: https://doi.org/10.1007/s10512-016-0123-x

6. Subbotin V.I., Ibragimov M.Kh., Ushakov P.A., Bobkov V.P., Zhukov A.V., Yuriev Yu.S. *Hydrodynamics and heat transfer in nuclear power plants (bases of calculation).* Moscow. Atomizdat, 1975, 406 p.

7. Ibragimov M.Kh., Subbotin V.I., Bobkov V.P., Sabelev G.I., Taranov G.S. *The structure of turbulent flow and the mechanism of heat transfer in channels.* Moscow. Atomizdat, 1978, 296 p.

8. Sorokin A.P., Kuzina Yu.A., Denisova N.A. Hydrodynamics of turbulent flows in fuel assemblies of fast reactors (velocity field and turbulence microstructure). *Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Nuclear Reactor Constants.* 2021, no. 2, pp. 139 – 166. DOI: https://doi.org/10.55176/2414-1038-2021-2-139-166 (in Russian).

9. Nijsing R., Eifler W. Temperature Fields in Liquid-Metal-Cooled Rod Assemblies. *Progress in Heat and Mass Transfer.* 1971, vol. 7, pp. 115 – 149.

10. *Zhukov A.V., Sorokin A.P., Ushakov P.A., Matyukhin N.M., Tikhomirov B.B., Titov P.A., Mikhin V.I., Mantlik F., Geina Y., Vosaglo L., Chervenka Ya.* Hydrodynamic characteristics in fuel assemblies of fast reactors. Preprint FEI-1816, Obninsk, 1986, 68 p. (in Russian).

11. Mühlbauer P. et al. Finite Element Analysis of Turbulent Flow on Infinite Rod Bundles. *Fourth Int. Top. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, NURETH-4.* Karlsruhe, 1989, vol. 2, pp. 1307 – 1312.

12. Yang A., Jiang S. Turbulent transfer of heat and momentum in an infinite lattice of rods. *Heat transfer.* 1988, no. 2, pp. 36 – 43.

13. Neelen N. *Modeling of Transport of Momentum in Parallel Turbulent Flow through a Rod Bundle.* Dr-Ing, Thesis, TU Braunschweig, Germany, 1986.

14. Shimizu T., Hinokata H., Shishido H. Distributed Parameter Analysis for the Prediction on the Pine Structure of Flow and Temperature Fields in Wire-Wrapped Fuel Pin Bundle Geometrics. *Nuclear Engineering and Design.* 1990, vol. 120, iss. 2 – 3, pp. 369 – 383. DIO: https://doi.org/10.1016/0029-5493(90)90387-D

15. Reichardt H. Vollständige Darstellung der Turbulenten Geschwindigkeitsvertelung in Glatten Leitungen. *Z. Hath. and Mech*. 1951, vol. 31, iss.7, pp. 208 – 219. DOI: https://doi.org/10.1002/zamm.19510310704

16. Kjellstrom B. *Studies of Turbulent Flow Parallel to Rod Bundles of Triangular Array.* Aktiebolaget Atomenergi. 1974, Report AE-487, 191 p. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/05/148/5148715.pdf (accessed Mar.15, 2024).

17. Ramm H., Johannsen K. Prediction of Local and Integral Turbulent Transport Properties for Liquid-Metal Heat Transfer in Equilateral Triangular Rod Arrays. *Journal of Heat Transfer*. 1975, vol. 97, ser. C, no 2, pp. 238 – 245. DOI: https://doi.org/10.1115/1.3450347

18. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computation Methods App. Mech. Engrg.* 1974, vol. 3, iss. 2, pp. 269 – 289. https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2

19. Nijsing R. et al. Temperature Fields in Liquid-Metal Cooled Rod Assemblies. *Report on the International Heat Transfer Seminar.* Trogir, Yugoslavia, 1971, EU/C-1C791/71.

20. Buleev N.I., Zinina G.A. Correction of the initial hypotheses of the three-dimensional model of turbulent exchange. *Questions of Atomic Science and Technology. Ser.: Physics and technology of nuclear reactors.* 1981, iss. 2 (24), pp. 26 – 35 (in Russian).

21. Rowe D.S., Chapman C.C. Measurement of Turbulent Velocity, Intensity and Scale in Rod Bundle Plow Channels Containing a Grid Spacer. BNWL–1737, Washington, 1973.

22. Zhukov A.V., Kuzina Yu.A., Sorokin A.P. Analysis of the benchmark experiment on hydraulics and heat transfer in the assembly of fuel rod simulators with liquid metal cooling. *Atomic Energy*. 2005, vol. 99, iss. 5, pp. 770 – 781. DOI: https://doi.org/10.1007/s10512-006-0015-6

23. Sorokin A.P., Kuzina Yu.A., Sorokin G.A., Denisova N.A. Modeling of heat and mass transfer processes in fuel assemblies of fast reactors within the framework of the channel-by-channel calculation method. Generalized exchange characteristics for single-phase flows of liquid metals. *Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Nuclear Reactor Constants.* 2020, no. 2, pp. 104 – 130. DOI: https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-2-104-130 (in Russian).

24. Zhukov A.V., Sorokin A.P., Titov P.A., Ushakov P.A. Analysis of the hydraulic resistance of fast reactor fuel rod bundles. *Atomic Energy*. 1986, vol. 60, iss. 5, pp. 317 – 321. Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t60-5_1986/p317/ (accessed Mar.15, 2024) (in Russian).

25. Kirillov P.L. Heat transfer in turbulent flow. Part 2. Velocity and Temperature Distribution. *Atomic Energy*. 2017, vol. 122, iss. 4. pp. 230 – 242. DOI: https://doi.org/10.1007/s10512-017-0261-9

26. Bogoslovkaya 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 Russia Approaches. IAEA–TEC-DOC–1060. Vienna, IAEA, 1999, 305 p.

27. Zhukov A.V., Sorokin A.P., Matyukhin N.M. *Interchannel exchange in fuel assemblies of fast reactors (calculation programs and practical application). Series: Physics and technology of nuclear reactors. Iss. 38.* Moscow. Energoatomizdat, 1991, 225 p. (in Russian).

28. Gordeev S.S., Sorokin A.P., Tikhomirov B.B., Trufanov A.A., Denisova N.A. Method of calculation of temperature regimes for fuel elements in the fuel subassembly into account inter-channel mixing of the coolant and random deviation of the parameters. *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Nuclear Reactor Constants.* 2016, iss 4, pp. 116 – 130. Available at: http://vant.ippe.ru/archiv/year2016.html (accessed Mar.15, 2024) (in Russian).

29. Kuzina Yu.A., Sorokin A.P., Denisova N.A. Experimental and calculation investigations of hydrodynamics and heat exchange in liquid metal turbulent flows in fast reactor fuel assemblies. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Reactor Constants,* 2023, no. 2, pp. 132 – 145. Available at: https://vant.ippe.ru/year2023/2/thermal-physics-hydrodynamics/2328-10.html (accessed Mar.15, 2024) (in Russian).

30. Sorokin A.P., Bogoslovskaya G.P., Trufanov A.A., Denisova N.A. Investigation of the effect of FA radiation deformation on the temperature regime and the stress-strain state of the fuel cladding. *Atomic Energy*. 2016, vol. 120, iss. 6, pp. 418 – 425. DOI: https://doi.org/10.1007/s10512-016-0151-6

31. Opanasenko A.N., Sorokin A.P., Zaryugin D.G., Trufanov A.A. Fast Reactor: an Experimental Study of Thermohydraulic Processes in Different Operating Regimes. *Thermal Engineering.* 2017, vol. 64, no. 5, pp. 336 – 344. DOI: https://doi.org/10.1134/S0040601517050056

32. Sorokin A.P., Kuzina Yu.A., Ivanov E.F. Peculiarities of heat transfer during liquid metal boiling in fuel assemblies of fast reactors. *Atomic Energy.* 2019, vol. 126, iss. 2, pp. 73–82. DOI: https://doi.org/10.1007/s10512-019-00518-0

33. Yamaguchi K. Flow Pattern and Dryout under Sodium Boiling Conditions. *Nuclear Engineering and Design.* 1987, vol. 99, no. 3, pp. 247 – 263. DOI: https://doi.org/10.1016/0029-5493(87)90125-7

34. Sorokin G.A., Ninokata H., Sorokin A.P., Endo H., Ivanov Eu.F. Numerical Study of Liquid Metal Boiling in the System of Parallel Bundles under Natural Circulation. *Journal of Nuclear Science and Technology.* 2006, vol. 43, no. 6, pp. 623 – 634. DOI: https://doi.org/10.1080/18811248.2006.9711142

Authors

Yulia A. Kuzina, Head of the Nuclear Power Department, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: ukyzina@ippe.ru
Alexander P. Sorokin, Chief Researcher, Dr. Sci. (Engineering),
E-mail: apsorokin@ippe.ru