

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ (ОБЗОР)

© 2025 г. А. П. Сорокин^а, *, Ю. А. Кузина^а, В. Н. Дельнов^а, Н. А. Денисова^а

^аГосударственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, пл. Бондаренко, д. 1, г. Обнинск, Калужская обл., 249033 Россия

*e-mail: alexander.p.sorokin@gmail.com

Поступила в редакцию 25.04.2024 г.

После доработки 19.12.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

Изложены результаты актуальных проблемно-ориентированных исследований теплогидравлических процессов в обоснование характеристик и безопасности реакторов на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением по широкому спектру теплофизических задач, включая гидродинамику и теплообмен в каналах и тепловыделяющих сборках (ТВС) активной зоны, в том числе в условиях формоизменения сборок твэлов в процессе кампании, внутрикорпусную циркуляцию и стратификацию теплоносителя в баке реактора на быстрых нейтронах с интегральной компоновкой оборудования в номинальном режиме с вынужденной конвекцией и естественной конвекцией теплоносителя в режиме аварийного расхолаживания, в промежуточном теплообменнике и крупномодульном парогенераторе. Представлены данные экспериментальных гидродинамических исследований проточных частей реакторных установок, теплообменников и реакторов ядерных энергетических установок. Анализируются закономерности гидродинамических процессов, происходящих в проточных частях коллекторных систем цилиндрического типа в реакторах и теплообменниках, выявленные при проведении экспериментальных исследований на аэродинамическом стенде и гидротопке. Эти закономерности зарегистрированы в качестве научных открытий как неизвестные ранее явления, имеющие отношение к атомной, космической, металлургической и химической областям науки и техники. Результаты расчетных исследований, выполненных с использованием версии поканального кода, реализующей двухжидкостную модель двухфазного потока жидкого металла в приближении равных давлений в паровой и жидкой фазах, воспроизводят развитие режимов течения двухфазного потока, пульсации расхода жидкого металла, полученные в экспериментальных исследованиях, а также демонстрируют противофазные пульсации расхода двухфазного теплоносителя в системе параллельных тепловыделяющих сборок, межканальную неустойчивость, характеризующуюся значительным возрастанием амплитуды пульсаций расхода теплоносителя в параллельных ТВС.

Ключевые слова: быстрый реактор, натрий, теплогидравлика, безопасность, аварийные режимы, эксперимент, численное моделирование, активная зона, бак реактора, турбулентный перенос, стратификация, кипение жидких металлов

DOI: 10.56304/S0040363625700833

Исследование гидродинамики, теплообмена, физико-химических процессов, свойств теплоносителей, прочности конструкций оборудования связано с реализацией в 50-х годах XX в. программы создания ядерных энергетических установок (ЯЭУ) для атомных электростанций, флота и космоса, а также термоядерных и электроядерных установок и нейтронгениерирующих мишеней. Необходимость проведения фундаментальных теплофизических исследований и на их базе прикладных исследований прекрасно понимали академики И.В. Курчатов, А.П. Александров, Д.И. Блохинцев, А.И. Лейпунский.

В 1950 г. были сформулированы требования к теплоносителям реакторов с жидкометаллическим охлаждением, учитывающие их влияние на физические, теплогидравлические, технологические и коррозионные характеристики реакторов, токсичность и стоимость. На их основе в качестве теплоносителей были выбраны:

натрий для АЭС с реакторами на быстрых нейтронах благодаря теплофизическим свойствам и простоте технологических операций при ремонтных работах;

эвтектический сплав свинец-висмут для ЯЭУ, предназначенных для атомных подводных лодок;

эвтектический натрий-калиевый сплав и литий для космических ЯЭУ;

литий для blankets термоядерного реактора.

Через месяц после пуска Первой АЭС (24 июля 1954 г.) по инициативе А.И. Лейпунского в ФЭИ был образован теплофизический отдел, который возглавил будущий академик РАН В.И. Субботин, в дальнейшем — лидер научной школы по теплофизике ЯЭУ в ФЭИ. Основанием для формирования научной школы явилось участие коллектива теплофизиков в создании ЯЭУ различного назначения.

Как теплоноситель в реакторах на быстрых нейтронах [далее быстрые реакторы (БР)] натрий используется начиная с 1958 г. (реактор БР-5/10). К настоящему времени построено более 20 энергоблоков с БР [1–4] общей наработкой свыше 300 реакторо-лет. Прототипы БР мощностью 250–300 МВт (эл.) сооружены в СССР, Франции, Англии, Германии и Японии, полукommerческие БР — в СССР (БН-600, БН-800) и Франции (“Суперфеникс”). Реактор БН-600 устойчиво работает с 1980 г., БН-800 — с 2015 г. Завершается работа над проектом перспективного коммерческого реактора большой мощности БН-1200 [3].

Характеристики и безопасность реакторов на быстрых нейтронах разработаны и научно обоснованы на базе результатов изучения теплогидравлических проблем для широкого диапазона номинальных и переходных режимов, аварийных режимов, связанных с отказом аварийной системы, разрушением элементов контура циркуляции, а также с гипотетически маловероятными авариями [5, 6]. Следует отметить, что многие из этих проблем являются комбинированными и для их решения требуется проведение совместных исследований по теплогидравлике, тепло-массообмену, нейтронной физике и термомеханике. Большое внимание, особенно в последнее время, уделялось разработке методов и программ математического моделирования процессов в корпусе и элементах конструкции быстрых реакторов [7, 8].

Настоящий этап развития атомной энергетики связан с совершенствованием АЭС с целью повысить эффективность и безопасность их работы. На основе последних достижений в ядерной индустрии должны быть созданы значительные резервы безопасности атомных электростанций. Важной задачей является разработка реакторов нового поколения с повышенным уровнем внутренней безопасности [9].

Для дальнейшего развития атомной отрасли России, реализации стратегии двухкомпонентной атомной энергетики с замыканием топливного цикла при использовании реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем [10], обеспечения ее конкурентоспособности и

сохранения приоритета, которым обладает Россия в области АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, необходимо продолжить комплексные проблемно-ориентированные теплогидравлические исследования.

В статье наряду с обобщением результатов исследований гидродинамики и теплообмена в активной зоне реакторов на быстрых нейтронах и коллекторных системах теплообменников и реакторов, выполненных в ГНЦ РФ—ФЭИ, представлены также результаты исследований влияния микроструктуры турбулентности радиационного формоизменения твэлов и стохастических неравномерностей на теплогидравлические характеристики в каналах сложной формы, а также стратификации теплоносителя в камерах смешения в баке реактора на быстрых нейтронах, режимов течения и межканальной неустойчивости при кипении жидкометаллического теплоносителя в системе параллельных ТВС активной зоны, полученные в последнее время.

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

Температурный режим работы тепловыделяющих элементов активной зоны быстрых реакторов определяется большим числом факторов закономерного и статистического характера [11]. Так, радиационное формоизменение шестигранного чехла и оболочек твэлов в процессе кампании приводит к изменению ширины зазоров между твэлами и между твэлами и чехлом ТВС, проходного сечения ячеек, к продольной деформации твэлов и чехла. При этом изменяются температурный режим твэлов и напряженное состояние элементов активной зоны, что может привести к трудностям при перегрузке ТВС.

При конструировании активной зоны необходимо учитывать возможные деформации, например увеличение исходных зазоров между ТВС и твэлами, которое может привести к ухудшению физических и экономических характеристик реактора (глубины выгорания и коэффициента воспроизводства).

Влияние перечисленных факторов имеет, как правило, сложный характер. Неслучайная часть их воздействия на температурное поле ТВС может быть учтена прямым детерминистическим расчетом температурного поля, влияние случайного разброса параметров учитывается статистически.

Методология исследований

На всех этапах исследований большое внимание уделялось методикам и технике измерений, в частности были разработаны уникальные датчи-

ки скорости, расхода, давления, уровня, температуры и др. Были созданы микротермопары наружным диаметром 0.3–0.8 мм для измерения температуры в интервале от 300 до 1800°C, а также расходомеры различных конструкций для определения расходов жидких металлов. В 1970-е годы были разработаны методики и технологии электромагнитного измерения векторов локальных расходов (скоростей) жидкого металла в каналах и пучках стержней [12], определения характеристик перемешивания теплоносителей в опытах с использованием воздуха и добавленного в него малого количества газообразного трассера, например фреона или пропана.

Большое внимание было уделено физическому моделированию экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена в ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями. Была экспериментально доказана возможность моделирования гидродинамики несжимаемых сред, в том числе жидких металлов, в опытах с использованием воздуха, теплообмена в жидких металлах Na, Na–K, Li, Hg, Pb, Pb–Bi с помощью имитирующих сред [13]. На основе таких методик были выполнены эксперименты фундаментального и прикладного характера.

Гидродинамические исследования

Проводились исследования гидродинамики каналов сложной формы, включая пучки стержней, проточные части реакторных установок. Максимальное внимание уделялось измерениям полей скорости, распределению касательных напряжений, турбулентных характеристик. В результате всестороннего и систематического изучения статистических характеристик полей температуры и скорости в турбулентных потоках воздуха и жидких металлов были определены характеристики пульсаций температуры и скорости, интенсивность пульсаций, корреляционные функции, спектральная плотность и распределение вероятностей. Это позволило лучше понять механизм турбулентного теплообмена и наметить пути к построению его физически обоснованной теории [14].

Обширный материал получен по гидродинамическим турбулентным характеристикам ТВС [15]. Результаты измерений, выполнявшихся с помощью воздуха и с использованием трубки Пито, показали, что в распределении касательных напряжений вдоль смоченного периметра ячейки правильной решетки стержней имеется локальный максимум в месте наибольшего расширения канала, который можно объяснить воздействием вторичного вихря.

В деформированной решетке распределение касательных напряжений вдоль смоченных по-

верхностей практически симметрично относительно геометрических осей симметрии проточного сечения, хотя в некоторых областях ТВС наблюдаются аномалии, которые могут быть обусловлены возникновением отдельных вторичных вихрей не только внутри каналов, но и на их границе. Распределение скорости по нормали к смоченному периметру соответствует универсальному закону, 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 [15].

Обнаружены значительные неравномерности распределения скорости по периметру боковых и угловых стержней в моделях ТВС, достигающие 60% средней скорости по периметру стержней (рис. 1). Распределения скорости, определенные электромагнитным методом, совпадают с тако-

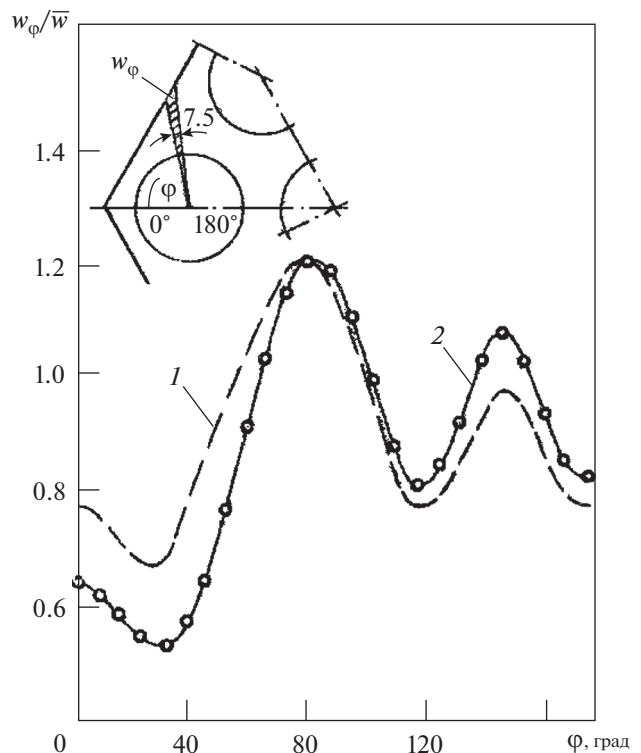


Рис. 1. Распределение относительной скорости теплоносителя $w_\phi/\bar{w}$ по периметру углового стержня в модели ТВС реактора.

1 — электромагнитные измерения; 2 — экспериментальные данные с воздушным теплоносителем с использованием трубки Пито; ϕ — угол по азимуту поверхности стержня; w_ϕ — средняя скорость теплоносителя в секторе по азимуту стержня; $\bar{w}$ — средняя скорость теплоносителя по сечению ТВС

выми, полученными в экспериментах с воздухом с использованием трубки Пито.

Исследования теплообмена

Наибольшее внимание уделялось исследованиям теплообмена в самом высоконапряженном и ответственном узле реакторной установки — активной зоне, подвергающейся в процессе кампании воздействию конструктивных, режимных, технологических, радиационных и эксплуатационных факторов. Впервые приближенное решение задачи в виде $Nu = 7.0 + 0.025 Re^{0.8}$ (здесь Nu , Re — числа Нуссельта и Пекле) о теплообмене жидких металлов при гидродинамически установленном течении в круглых трубах было получено в 1950-х годах Р. Мартинелли и Р. Лайоном. Проведенные исследования теплообмена в трубах показали, что если концентрация примесей в теплоносителе не превышает их растворимости при температурах циркулирующего металла, то на границе раздела теплоноситель — поверхность теплообмена термическое (контактное) сопротивление отсутствует. В этих условиях теплоотдача к жидким металлам Na , $Na-K$, Li , Hg , $Pb-Bi$ в трубах описывается единой обобщающей критериальной зависимостью В.И. Субботина $Nu = 5.0 + 0.025 Re^{0.8}$, близкой к формуле Р. Лайона. При насыщении теплоносителя примесями коэффициенты теплоотдачи могут снизиться в 1.5–2.0 раза, что соответствует опытам, выполненным в ЭНИН, ЦКТИ, ФЭИ [13, 16].

В процессе экспериментальных и расчетных исследований было установлено, что необходимо решить “сопряженную” задачу теплоотвода от твэлов с учетом их теплофизических свойств. Теория приближенного теплового подобия твэлов, расположенных в правильных решетках, которая позволила моделировать твэлы многослойными трубками с электрообогревом изнутри и нашла применение во всех исследованиях активных зон быстрых реакторов, была разработана П.А. Ушаковым [12]. Получены детальные экспериментальные данные по теплогидравлике полногабаритных моделей активных зон при наличии прогибов тепловыделяющих элементов, асимметричных сдвижек и деформаций элементов, при перекрытии различных частей активной зоны, возникновении встречных потоков.

При использовании результатов экспериментальных исследований и расчетно-теоретического анализа межканального обмена массой, импульсом и энергией в пучках гладких твэлов и твэлов со спиральной дистанционирующей проволоочной навивкой разработаны физически обоснованные методы и программы теплогидравлического расчета формоизмененных тепловыде-

ляющих сборок активной зоны реакторов на быстрых нейтронах [17, 18].

Исследовано влияние на температурный режим ТВС формы и материалов твэлов, эффектов радиационного распухания и ползучести, выявлены особенности формирования температурного режима активной зоны в процессе эксплуатации (кампании) для реакторов на быстрых нейтронах [18, 19].

Установлено, что использование разнонаправленных проволоочных навивок для создания противоположно направленных потоков теплоносителя в поперечных направлениях весьма эффективно. На рис. 2 показано, как изменяется подогрев теплоносителя по рядам ячеек модельных ТВС при разных направлениях градиента энерговыделения (Δq) и различных способах винтового проволоочного дистанционирования имитаторов твэлов [20]. Наибольший эффект выравнивания наблюдается при разнонаправленном по рядам твэлов винтовом проволоочном дистанционировании.

ГИДРОДИНАМИКА ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ РАЗДАТОЧНЫХ КОЛЛЕКТОРНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛООБМЕННИКОВ И РЕАКТОРОВ

На аэродинамическом стенде и гидрлотке был проведен комплекс экспериментальных исследований гидродинамики проточных частей осесимметричных плоских и цилиндрических раздающих коллекторных систем (РКС) с различными условиями подвода и отвода жидкости [21].

Раздающая коллекторная система с центральным подводом и боковым отводом жидкости

На гидрлотке был определен характер течения воды в проточной части раздающей коллекторной системы плоского типа с центральным подводом и боковым отводом воды (рис. 3), которая имеет следующие параметры:

$\tilde{H}$ — относительная высота коллектора РКС (максимальное осевое расстояние между плоскостью входных частей системы пластин и эллиптическим днищем);

$\tilde{h}$ — относительная высота входа в коллектор (максимальное осевое расстояние между плоскостью торцевой части центрального канала и эллиптическим днищем);

$\tilde{a}$ — относительный вылет центрального подводящего канала из системы пластин;

Re_1 — число Рейнольдса в центральном подводящем канале.

Характер течения жидкости в коллекторе зависит от соотношения размеров РКС и ее конструкции.

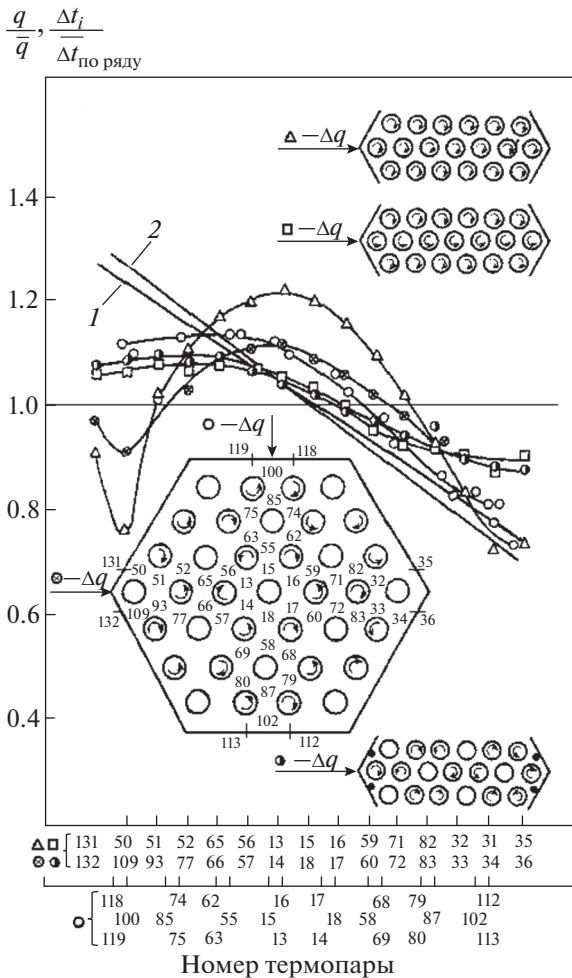


Рис. 2. Изменение относительного подогрева теплоносителя $\Delta t_i/\Delta t_{\text{по ряду}}$ (символы) и энерговыделения $q/\bar{q}$ (линии) по рядам ячеек модельных ТВС (без вытеснителей и с вытеснителями) при разных направлениях градиента энерговыделения Δq и различных способах винтового дистанционирования имитаторов твэлов.

Направление градиента энерговыделения: 1 — по диагонали чехла; 2 — между гранями чехла (символы соответствуют вариантам оребрения, представленным на схемах); Δt_i — подогрев в канале i ; Δt — средний подогрев теплоносителя в ТВС; $q, \bar{q}$ — плотность и среднее значение плотности теплового потока

При определении относительных размеров коллектора в качестве масштабного фактора используется ширина проточной части центрального канала. Особенностью течения воды в коллекторе является наличие двух осесимметричных относительно его продольной оси вихревых зон, образующихся на входе в систему пластин у центрального канала (см. рис. 3). При $\tilde{H} = 0.4$ и $\tilde{a} = 0$ вихревые зоны располагаются непосредственно под систе-

мой пластин, вытягиваются вдоль них и занимают примерно 20% высоты коллектора. При увеличении $\tilde{H}$ от 0.4 до 1.0 вихревые зоны смещаются от системы пластин в сторону днища и принимают круглую форму, а их площадь растет. Дальнейшее увеличение $\tilde{H}$ до 1.29 не влияет на параметры вихревых зон. В РКС при $\tilde{a} > 0$ и любом значении $\tilde{H}$ вихревые зоны располагаются на наружных стенках центрального канала и примыкают к системе пластин. При увеличении $\tilde{H}$ и $\tilde{a} = \text{idem}$ форма и местоположение вихревых зон практически не изменяются. При увеличении $\tilde{H}$ за счет повышения $\tilde{a}$ и $\tilde{h} = \text{idem}$ вихревые зоны вытягиваются вдоль наружных частей боковых стенок центрального канала и изменяют свою форму.

Схемы течения жидкости в РКС цилиндрического типа

В проточной части РКС цилиндрического типа течение жидкости имеет сложный характер и определяется, главным образом, соотношением размеров РКС и ее конструкцией, режимом течения жидкости и коэффициентом гидравлического сопротивления проточной части выходного элемента. Схемы течения жидкости в проточной части РКС такого типа (рис. 4) получены с учетом результатов различных экспериментальных работ [21].

Раздающая коллекторная система с боковым подводом и центральным отводом жидкости

На гидротесте было исследовано течение воды в проточной части РКС плоского типа с боковым подводом и центральным отводом воды (рис. 5). Характер течения жидкости в коллекторе определяется соотношением размеров РКС и ее конструкцией [21]. Такая РКС имеет следующие параметры:

$\tilde{a}$ — относительное смещение входной части системы пластин от торцевой части стенок выходного канала;

$\tilde{\delta}$ — относительная толщина стенки выходного канала;

$\tilde{H}$ — относительная высота коллектора (в качестве масштабного фактора используется ширина бокового канала);

φ — угол скоса торцевой части стенки выходного канала;

$\tilde{s}$ — относительная суммарная ширина каналов системы пластин;

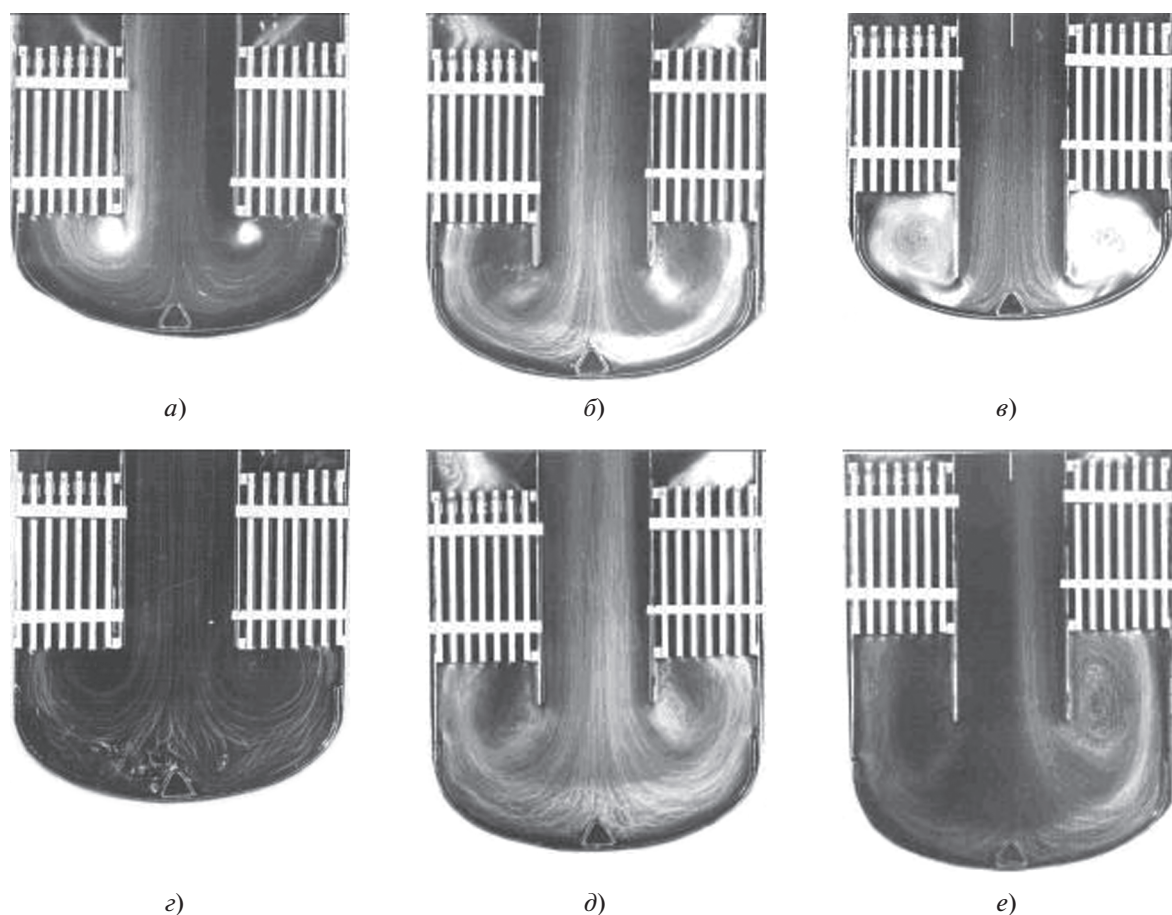


Рис. 3. Характер течения воды в проточной части РКС плоского типа с центральным подводом жидкости в коллектор с днищем эллиптического профиля.

$\tilde{H}$: $a - 0.97$; $b - 1.29$; $c - 1.348$; $d - 1.67$; $e - 2.04$; $\tilde{h}$: $a, c - 0.97$; $b, d, e - 1.29$; $d - 0.41$; $\tilde{a}$: $a, b - 0$; $c, d, e - 0.38$; $d, e - 0.75$; Re_1 : $a - 4.13 \times 10^4$; $b, c - 3.89 \times 10^4$; $c - 4.62 \times 10^4$; $d - 3.68 \times 10^4$; $e - 4.02 \times 10^4$

$\tilde{H}_1^0$ — относительная глубина потока воды во входном боковом канале (в качестве масштабного фактора используется ширина выходного канала);

Re — число Рейнольдса в канале системы пластин.

Схемы течения жидкости в проточной части РКС цилиндрического типа

В проточной части РКС цилиндрического типа течение жидкости имеет сложный характер, который определяется, главным образом, соотношением размеров и конструкцией РКС, режимом течения жидкости и коэффициентом гидравлического сопротивления решетки. Схемы течения жидкости в проточной части РКС такого типа получены с учетом результатов экспериментальных работ [21]. Особенности течения жидкости проявляются прежде всего на входном, основном и выходном участках проточной части рассматриваемой РКС (рис. 6).

В результате исследований были установлены и зарегистрированы в качестве научных открытий ученых из ГНЦ РФ—ФЭИ В.Н. Дельнова, Б.Н. Габриановича и Ю.С. Юрьева неизвестные ранее закономерности и явления, имеющие отношение к атомной, космической, металлургической и химической областям науки и техники [22, 23]. Было обнаружено, что на выходе жидкости из проточных частей раздающих коллекторных систем образуются осесимметричные зоны, характеристики которых зависят от конструктивных и технологических особенностей коллекторной системы: мест подвода жидкости, траектории движения, параметров струи, гидравлического сопротивления и др. [22]. Также было открыто неизвестное ранее явление возникновения гидродинамической идентичности в раздающих коллекторных системах, заключающееся в подобии гидродинамических параметров проточных частей осесимметричных раздающих коллекторных систем, например ядерных энергетических

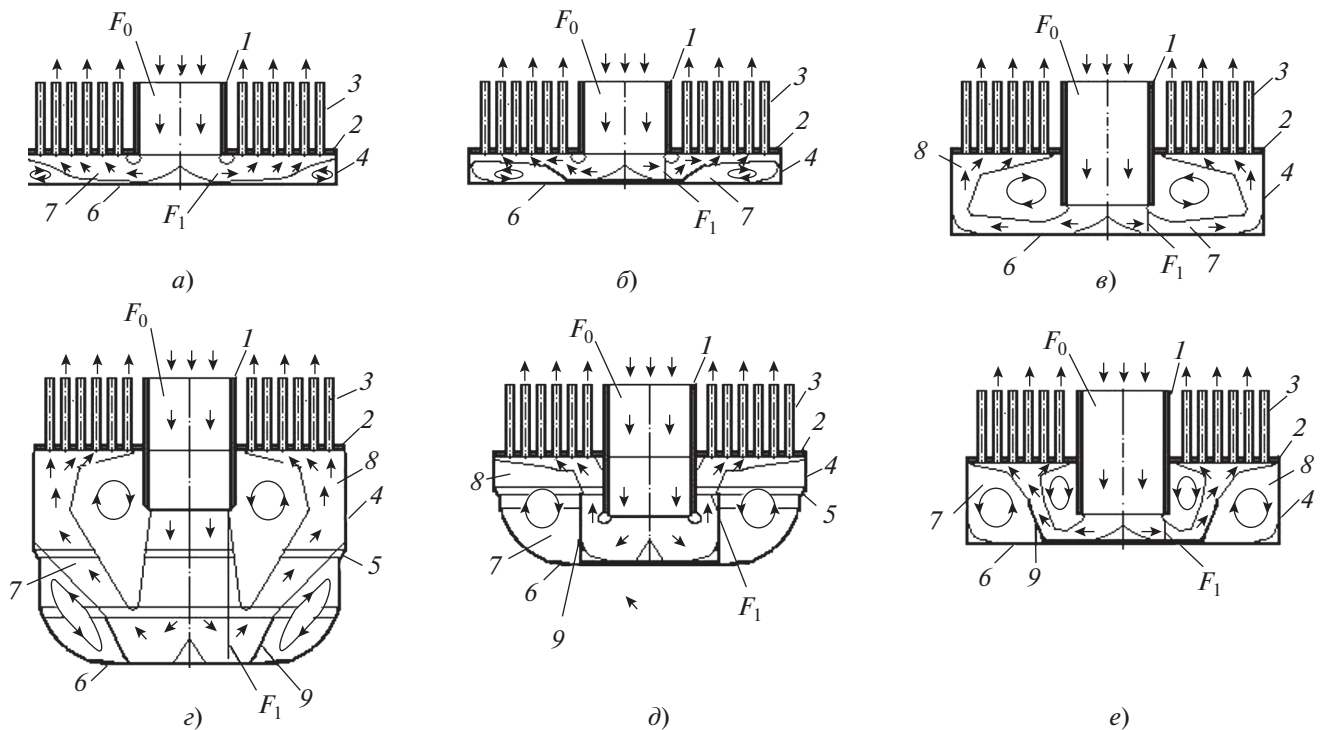


Рис. 4. Типичные конструкции и схемы течения жидкости в осесимметричных РКС цилиндрического типа с центральным подводом жидкости в коллектор.

a, б – сверхзатесненные РКС без вылета центральной трубы соответственно при отсутствии и наличии распределителя; *в* – затесненная РКС с вылетом центральной трубы и коллектором с затесненным входным участком; *г* – затесненная РКС с распределителем, вылетом центральной трубы и коллектором со свободным входным участком; *д, е* – затесненные РКС с распределителем, вылетом центральной трубы и коллектором соответственно с затесненным и свободным входным участком; 1 – центральная труба; 2 – трубная доска; 3 – трубка пучка; 4 – корпус; 5 – ступень; 6 – днище; 7 – коллектор; 8 – боковой кольцевой канал; 9 – распределитель; F_0 – площадь проходного сечения центральной трубы; F_1 – минимальная площадь проходного сечения между различными элементами проточной части коллектора

установок и теплообменников, с различными условиями подвода и отвода протекающей в системах жидкости [23].

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

С целым рядом серьезных проблем ученые столкнулись при разработке теории моделирования процессов естественной циркуляции в натриевом циркуляционном контуре и ТВС активной зоны, создании верификационных тестов, разработке и верификации теплогидравлических кодов для обоснования новых технических решений системы аварийного расхолаживания (САРХ), оптимизации конструкции и параметров САРХ (теплогидравлическое проектирование).

Особенностью контура циркуляции теплоносителя в быстром реакторе является сложное сочетание последовательно и параллельно соединенных элементов с различной ориентацией в

поле тяжести, геометрические характеристики проходных сечений которых резко изменяются по направлению движения. Для моделирования теплогидравлических процессов в обоснование САРХ быстрых реакторов созданы крупномасштабные стенды – “Рамона”, “Нептун” и “Илона”.

Проведенные исследования показали, что моделирование теплогидравлики в баке быстрого реактора может быть выполнено на мелкомасштабных водяных моделях [24]. Экспериментальная установка, расположенная на стенде В-200 в ФЭИ, включала в себя интегральную трехконтурную модель быстрого реактора в масштабе 1 : 10 (рис. 7, *a*). В модели II контур, так же как и I контур, представляет собой замкнутую циркуляционную систему с насосом, заполненную дистиллятом и предназначенную для обеспечения теплоотвода от модельных промежуточных и автономных теплообменников.

Чтобы избежать трудностей строгого критерияльного моделирования, процессы теплоотдачи в активной зоне и теплообменниках имитировались равномерным объемным тепловыделением с

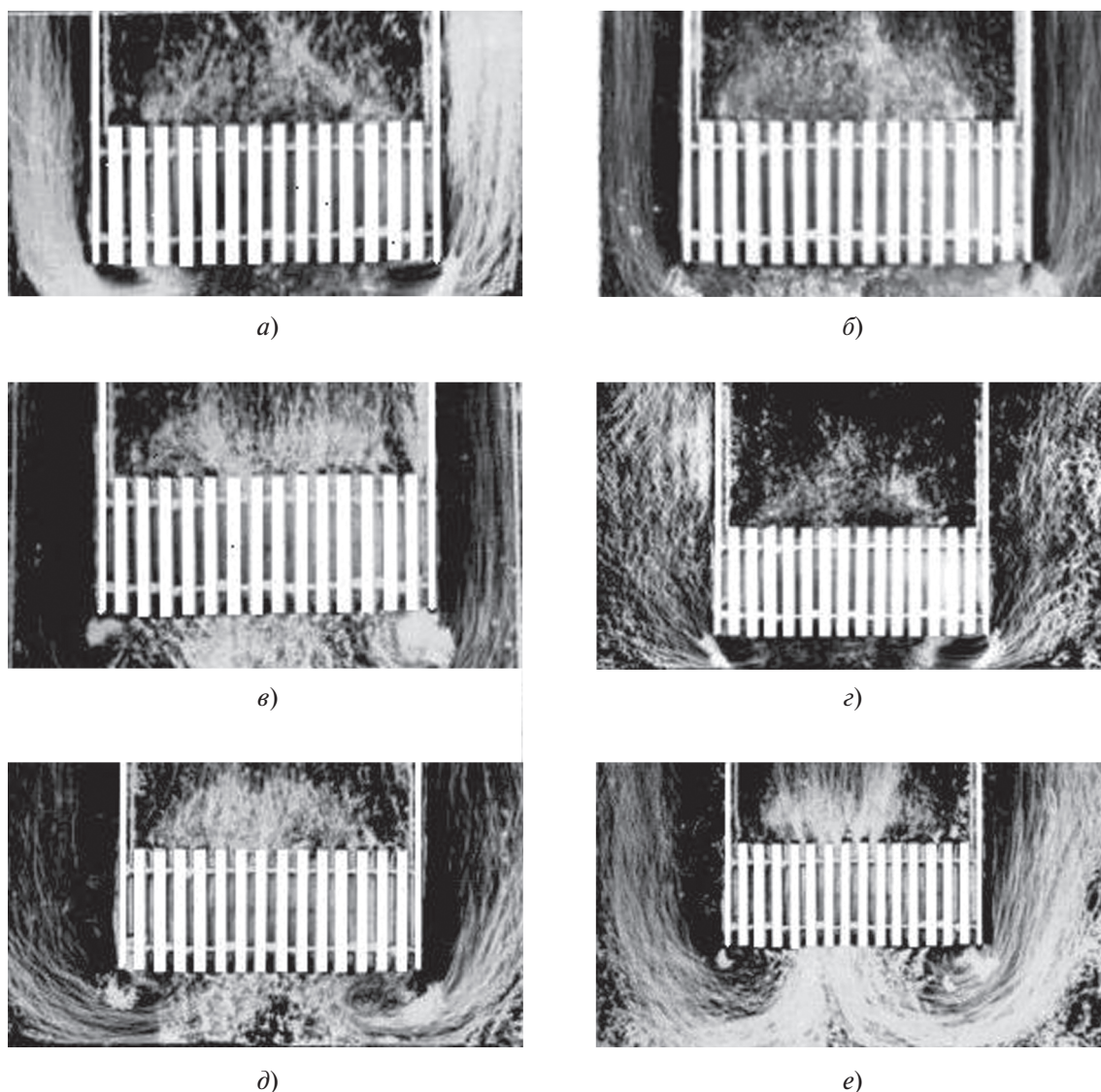


Рис. 5. Характер течения воды в РКС плоского типа с симметричными боковыми подводами воды в коллектор при $\tilde{a} = 0$, $\tilde{\delta} = 0.011$, $\varphi = 90^\circ$, $\tilde{H}_1^0 = 0.31$, $Re = (1.6-2.1) \times 10^3$.
 $\tilde{H}$: а, д – 0.5; б, е – 1.0; в – 2.0; з – 0.25; $\tilde{s}$: а, з – 4.0; б, в, д – 2.0; е – 1.0

сохранением значений коэффициентов сопротивления для модели и реактора, что позволило исключить критерии подобия, связанные с влиянием теплоотдачи и теплоемкости системы в переходном режиме.

В режиме вынужденной конвекции моделирование осуществляли по числам Fr и Re при использовании воды в качестве моделирующей жидкости. Теплоноситель в баке реактора всегда неизотермичен вследствие неравномерности энерговыделения, перепада температуры между узлами контура циркуляции, особенностей теплоотдачи в переходных и аварийных режимах. Действие термогравитационных сил приводит к коренному изменению структуры движения теп-

лоносителя по сравнению с изотермическим потоком. При переходных и аварийных режимах работы происходит температурное расслоение потока, прежде всего в элементах контура с большими объемами, которое характеризуется возникновением застойных и рециркуляционных образований со значительными градиентами температуры на стратифицированных границах раздела.

Критериями, определяющими подобие течений в устойчиво стратифицированных зонах теплоносителя, являются числа Fr , Re и локальное градиентное число Ричардсона $Ri = g\beta(\partial t/\partial z)/(\partial w/\partial z)^2$ (здесь g – ускорение свободного падения; β – ко-

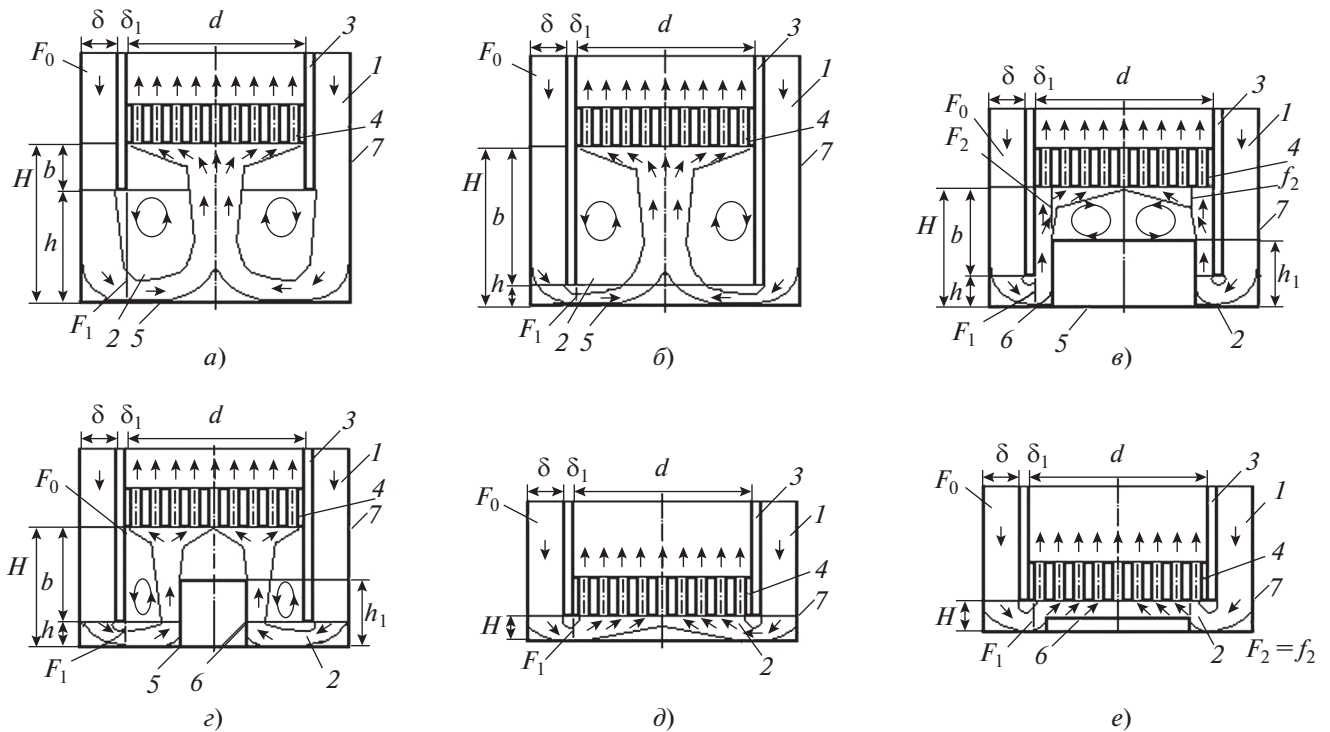


Рис. 6. Типичные конструкции и схемы течения жидкости в проточных частях осесимметричных РКС цилиндрического типа с боковым подводом жидкости в коллектор.

a, б – затесненные РКС со смещенной решеткой в обечайке и свободным и затесненным входными участками, соответственно; *в, г* – затесненные РКС с затесненным входным участком, смещенной решеткой в обечайке и вставками относительно большого и малого диаметров соответственно; *д, е* – сверхзатесненные РКС с коллектором, затесненным входным участком, без смещения решетки в обечайке, с отсутствием и наличием вставок соответственно; 1 – кольцевой канал; 2 – коллектор; 3 – обечайка; 4 – решетка; 5 – днище; 6 – вставка; 7 – корпус; F_0 – площадь проходного сечения кольцевого канала; H – высота коллектора; b – смещение решетки от торцевой части обечайки; h – высота входа в коллектор; F_1 – площадь проходного сечения входной части коллектора; d – внутренний диаметр обечайки; δ – ширина кольцевого канала; δ_1 – толщина обечайки; F_2 – минимальная площадь проходного сечения между различными элементами проточной части коллектора; f_2 – площадь поперечного сечения жидкости между различными элементами проточной части коллектора; h_1 – высота вставки

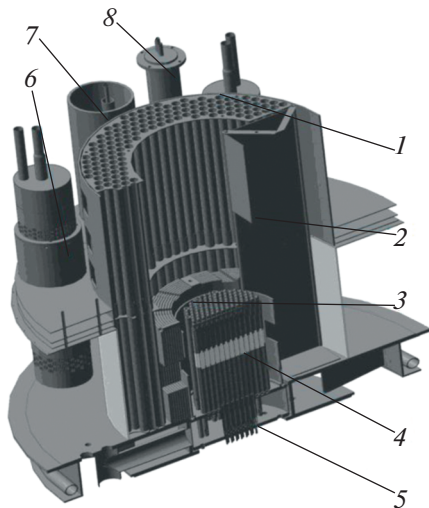
эффицент объемного расширения; z – вертикальная координата; w – скорость теплоносителя). Характеристики устойчиво стратифицированного течения теплоносителя являются частота Вейселя – Брента $N^2 = (g/\rho)(\partial\rho/\partial z)$ (здесь ρ – плотность среды) и масштаб плавучести $l_f = \rho(\partial\rho/\partial z)^{-1}$ (f – от англ. flotation). В устойчиво стратифицированном турбулентном потоке максимальный размер вихрей не может превышать масштаб плавучести. Поэтому крупномасштабные вихри, большие, чем масштаб плавучести, подавляются и растекаются вдоль стратифицированной области раздела в виде внутренних волн, которые создают пульсации температуры в материале стенок оборудования с частотой $f \leq N$. В предельном случае, например при быстром срабатывании аварийной защиты, когда $l_f < l_k$ [здесь $l_k = (v^3/\epsilon)^{0.25}$ – масштаб Колмогорова; v – кинематический коэффициент вязкости; ϵ – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности], происходит полное по-

давление конвективного переноса через поверхность раздела между холодной и горячей областями потока.

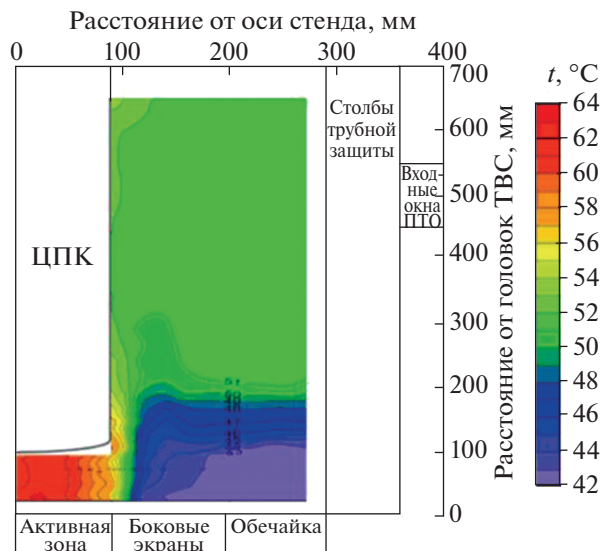
В вязкой жидкости моделирование по числам Фруда и Ричардсона невозможно выполнить с сохранением числа Рейнольдса. Исследования при $Re > 10^4$ показали, что при равенстве значений числа Фруда, рассчитанных по параметрам экспериментальной модели Fr_m и реактора Fr_p , размеры застойных и рециркуляционных образований не меняются, поэтому точное моделирование по числам Re не требуется.

Приближенное моделирование режима естественной конвекции обеспечивалось по числу Эйлера $Eu = \Delta p/(\rho w^2)$ (здесь Δp – разность давлений в двух характерных точках потока).

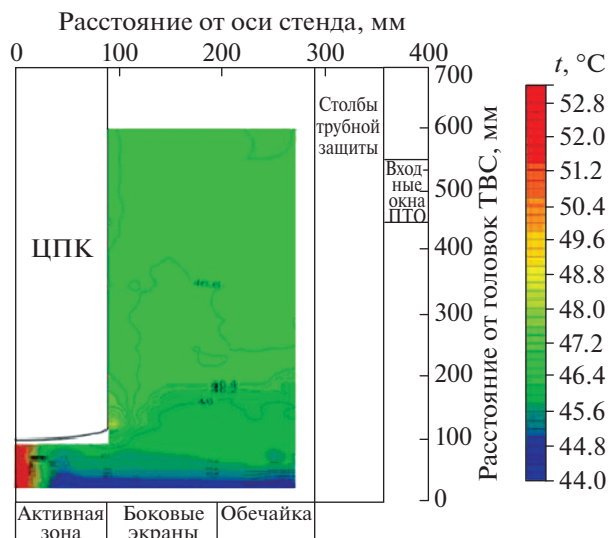
Теплогидравлические исследования I контура быстрого реактора с жидкометаллическим теплоносителем на водяной модели для режимов принудительной циркуляции, перехода к режиму



а)



б)



в)

расхолаживания и аварийного расхолаживания естественной конвекцией теплоносителя показали, что под воздействием термогравитационных сил 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 происходят температурное расслоение с возникновением застойных и рециркуляционных образований, изменение характера течения и температурного режима (см. рис. 7, б).

При этом возникшие на границах раздела стратифицированных и рециркуляционных образований волны вызывают пульсации температуры на стенках реакторного оборудования и, в конечном итоге, приводят к термической усталости конструкционных материалов и снижению сроков эксплуатации реакторного оборудования [25]. Режим установившейся естественной конвекции характеризуется значительно меньшими градиентами температуры в вертикальном направлении над боковыми экранами (см. рис. 7, в).

Таким образом, в быстрых реакторах должны использоваться технические решения, позволяющие исключить внешние натриевые САРХ, упростить конструкцию быстрого реактора и удешевить его.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ТВС АКТИВНОЙ ЗОНЫ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Результаты экспериментальных теплогидравлических исследований при естественной конвекции натрия в 37 элементных модельных ТВС активной зоны (рис. 8) свидетельствуют о сложном характере циркуляции теплоносителя (с рециркуляцией) [26]. Естественная конвекция проявляется в области малых скоростей ($Re \leq 10$, $Re \leq 2000$), способствует перемешиванию жидкости между каналами и выравниванию неравномерности подогрева теплоносителя в поперечном сечении ТВС и снижает азимутальную

Рис. 7. Экспериментальная водяная модель I контура быстрого реактора с интегральной компоновкой оборудования (а), усредненная температура теплоносителя t в верхней камере при перемещении подвижных термозондов по высоте в номинальном режиме (б) и установившемся режиме расхолаживания естественной конвекцией (в).

1, 6 – промежуточный теплообменник; 2 – элеваторная выгородка; 3 – элементы внутрибаковой защиты; 4 – активная зона (имитаторы ТВС); 5 – напорная камера; 7 – имитатор главного циркуляционного насоса ГЦН-1; 8 – автономный теплообменник; ЦПК – центральная поворотная колонна; ПТО – промежуточный теплообменник

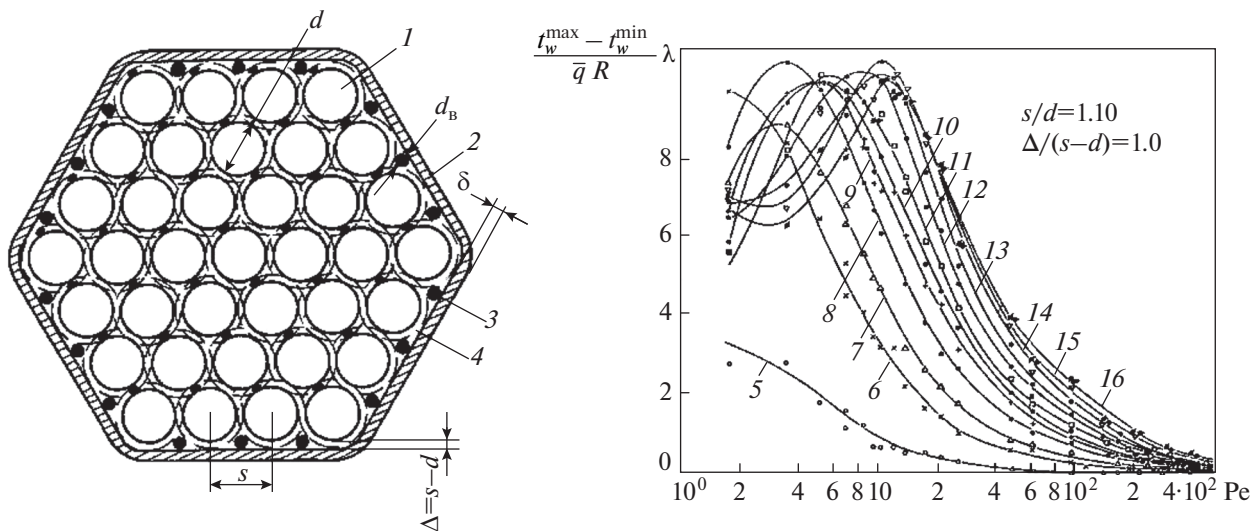


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований на модели ТВС (а) безразмерной максимальной азимутальной неравномерности температуры боковых элементов (б). d – наружный диаметр твэла; d_B – диаметр вытеснителя; δ_1 – толщина обечайки; s – шаг решетки; Δ – зазор между периферийными твэлами и обечайкой; 1 – твэл; 2 – обечайка; 3 – вытеснитель; 4 – проволоочная навивка; l – длина участка обогрева; d_g – гидравлический диаметр канала; l/d_g : 5 – 0.86; 6 – 14.6; 7 – 28.3; 8 – 42.0; 9 – 55.7; 10 – 69.5; 11 – 83.0; 12 – 97.0; 13 – 110.0; 14 – 124.0; 15 – 138.0; 16 – 152

неравномерность температуры поверхности твэлов $\frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{\bar{q}R} \lambda$ [здесь $t_w^{\max}$, $t_w^{\min}$ – максимальная и минимальная температуры поверхности твэлов (w – от англ. wall); R – радиус твэлов; λ – коэффициент теплопроводности оболочки пристенных твэлов в ТВС]. Естественная конвекция проявляется в ТВС при $s/d < 1.3$ в большей степени в пучках гладких твэлов, нежели в пучках твэлов с проволоочной навивкой. Введение вытеснителей в периферийные каналы ТВС не вносит принципиальных изменений в характер температурного поля в ней по сравнению с ТВС без вытеснителей.

Моделирование теплогидравлики активной зоны

Результаты теплогидравлических расчетов ТВС по коду МИФ [17] для модельной ТВС с неравномерным энерговыделением в поперечном сечении удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [27], полученными при использовании натриевого теплоносителя (рис. 9). Однако сопоставление результатов экспериментов [27] с расчетами по кодам COBRA-IV [28], COTEC [29] и SUPERENERGY [30] указывает на их существенное различие.

Теплогидравлика в различных моделях ТВС

Наиболее вероятные распределения температуры твэлов, теплоносителя, неравномерности

температуры, полученные при реализации статистической модели ТВС для реактора БН-600 с использованием метода Монте-Карло (осредненные характеристики по 50 вариантам расчета ТВС), расположены в промежутке между соответствующими распределениями температуры для предельных случаев конструкции ТВС – раздвинутого пучка (касание периферийных твэлов с проволоочной лентой чехла ТВС) и плотно сжатого или так называемого компактного пучка (соприкосновение одних внутренних твэлов с проволоочной навивкой с другими) [17]. При этом дисперсии характеристик температурного поля имеют небольшое значение, что объясняется выравнивающим воздействием температурного поля под влиянием межканального обмена в ТВС.

Изложенные материалы исследований указывают на то, что одними из наиболее значительных факторов, определяющих формирование температурного поля твэлов и чехлов ТВС в процессе кампании, являются исходное распределение геометрических параметров ТВС и их перераспределение в результате механического взаимодействия элементов и радиационного формоизменения конструкционных материалов ТВС.

Существенно большее влияние на распределение температуры в ТВС оказывает установка дистанционирующей ленты на периферийных твэлах, чем проволоочная навивка или введение вытеснителей в периферийные ячейки ТВС.

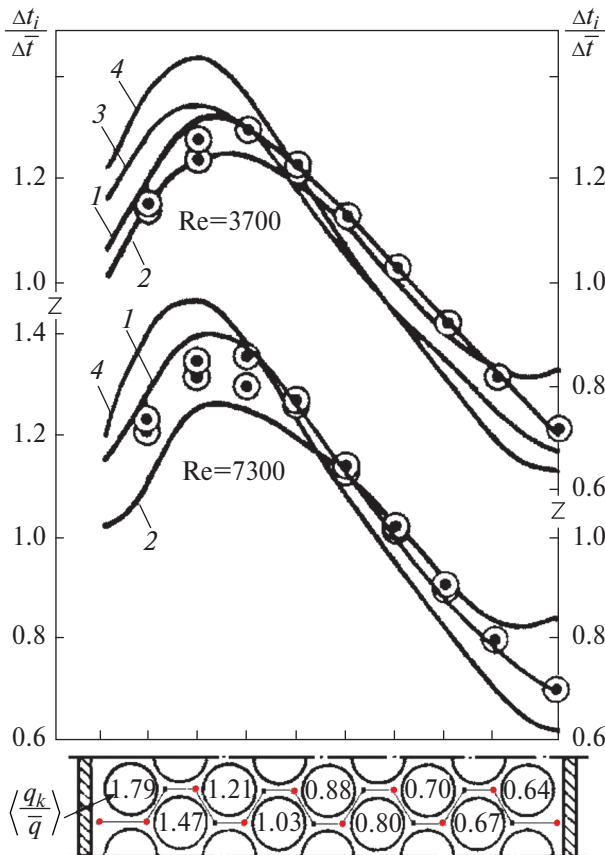


Рис. 9. Результаты расчетов по различным кодам и экспериментальные данные по распределению относительного подогрева натриевого теплоносителя в поперечном сечении на выходе из модельной ТВС с неравномерным энерговыделением по ее сечению при $s/d = 1.08$, $d = 13$ мм, $j = 100$ мм, $l = 1170$ мм. Расчет по коду: 1 – МИФ [17]; 2 – COBRA-IV [28]; 3 – SUPERENERGY [30]; 4 – COTEC [29]; точками обозначены экспериментальные данные [27]; q_k – плотность теплового потока k -го твэла; j – шаг провололочной навивки

Термомеханика ТВС активной зоны

Расчеты, выполненные по термомеханическому коду СДТ-МИФ для ТВС зоны большого обогащения топлива реактора БН-600 при выгорании 7% тяжелых атомов, что соответствует дозе около 60 смещений на атом (сна), показали [31], что для дозы свыше 42 сна изменение площади каналов по высоте ТВС имеет сложный характер. Различия в значениях максимальной температуры оболочек твэлов в начале первой и в конце двенадцатой микрокампании составляет 10–15°C, максимальная азимутальная неравномерность температуры твэлов изменяется в тех же пределах.

Неравномерность температуры по периметру твэла, деформированного из-за стесненных условий, возникающих при плотной упаковке в чехле, вызывает дополнительные температурные напряжения. Эти напряжения могут превышать напряже-

ния от других составляющих нагрузки (внутреннего давления, перепада температуры по оболочке). Еще одной причиной возникновения дополнительных напряжений в условиях неравномерного температурного поля является неравномерное распухание материала оболочек.

Теплогидравлика ТВС

при значительной деформации пучка твэлов и блокировке части проходного сечения ТВС

Значительная деформация пучка твэлов в ТВС активной зоны может привести к большому перегреву теплоносителя и оболочки твэлов, что демонстрируется на примере проведенного авторами расчета температурного режима ТВС, отработавшей кампанию, извлеченной из активной зоны реактора Phenix и залитой сплавом Вуда [32] (рис. 10, а). Под воздействием радиационного распухания чехла, пучка и отдельных твэлов происходит деформация (формоизменение) ТВС: изгиб и скручивание пучка твэлов, смещение пучка внутри чехла, расстановка твэлов случайным образом с образованием в отдельных случаях плотно упакованных ячеек, соприкосновение боковых твэлов с чехлом ТВС. Выполненные по коду МИФ расчетные исследования показали [33], что наблюдаются значительная неравномерность температуры теплоносителя (подогрева натрия в каналах) по сечению ТВС, а соответственно, и различие в температуре оболочки твэлов (рис. 10, б), существенные азимутальные неравномерности температуры по периметру твэлов (рис. 10, в).

КИПЕНИЕ ЖИДКИХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ И ПУЧКАХ ТВЭЛОВ

С помощью исследований кипения жидких металлов в большом объеме на установках, оснащенных электронным обогревом, передвижными микротермопарами, рентгеновскими аппаратами для просвечивания, была доказана принципиальная возможность устойчивого и неустойчивого кипения [34].

При исследованиях кипения жидкого металла на моделях ТВС были определены три режима течения двухфазного потока жидких металлов в пучках твэлов: пузырьковый, снарядный и дисперсно-кольцевой. Последний является предельным по отношению к охлаждению сборки. Была продемонстрирована 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 [35, 36].

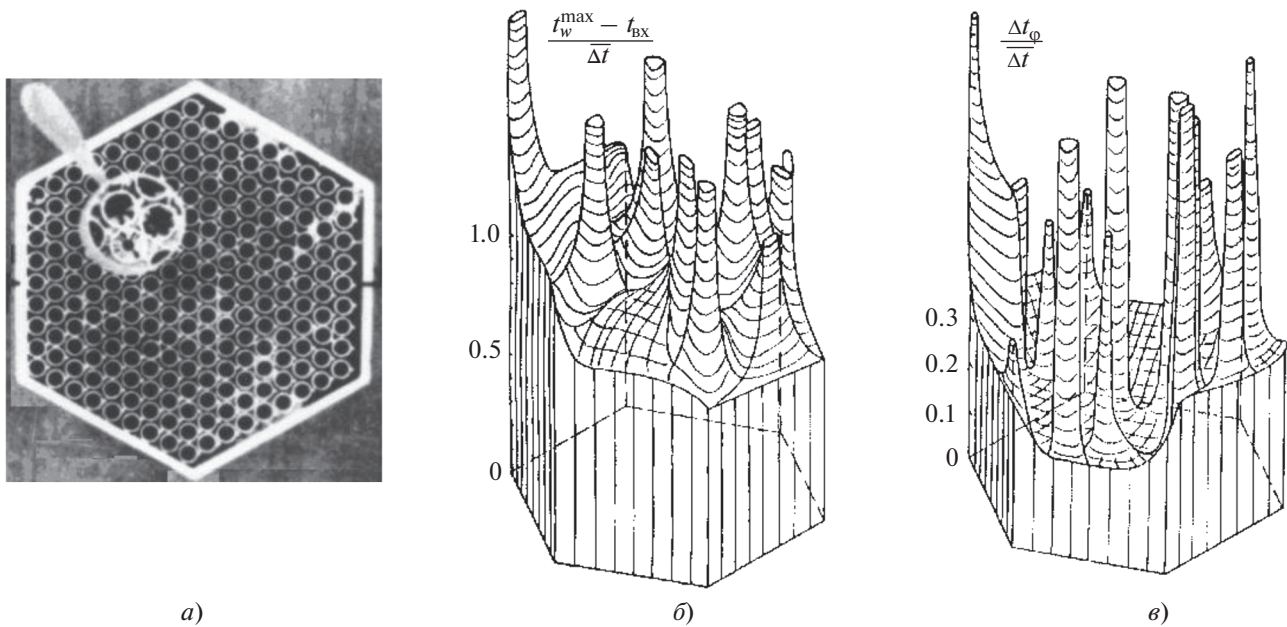


Рис. 10. Фотографическое изображение поперечного сечения тепловыделяющей сборки реактора Phenix, расположенной по центру, по длине активной зоны реактора (а) и картограммы распределения максимальной температуры оболочки твэлов (б) и максимальной неравномерности температуры твэлов (в) в поперечном сечении ТВС реактора в конце кампании.

$t_{\text{вх}}$ — температура теплоносителя на входе в ТВС; $\Delta t_{\text{ф}}$ — азимутальная неравномерность температуры по периметру твэла

Результаты расчетных исследований кипения натрия в режиме нестационарной естественной конвекции применительно к режимам аварийного расхолаживания реакторов БН-600 и БН-800 (рис. 11), выполненных по разработанному каналному теплогидравлическому коду SAT [37], реализующему двухжидкостную модель двухфазного потока жидкого металла с разделением фаз с развитой авторами системой замыкающих соотношений, воспроизводят изменения температуры, эволюцию режимов течения однофазного потока (пузырькового, снарядного), пульсации расхода жидкого металла, полученные в экспериментальных исследованиях. Кроме того, они демонстрируют противофазные пульсации расхода теплоносителя в параллельных ТВС, межканальную неустойчивость, характеризующуюся значительным возрастанием амплитуды пульсаций расхода теплоносителя в параллельных ТВС по сравнению с одиночными сборками, периодическим падением расхода теплоносителя в ТВС практически до нуля и возможным ее осушением — возникновение кризиса теплообмена.

Для исключения развития аварийной ситуации, связанной с нарушением нормальной эксплуатации при одновременном прекращении энергоснабжения всех главных циркуляционных насосов и отказе системы аварийного останова реактора (авария ULOF), предложено конструктивное решение, заключающееся в расположении над активной зоной реактора натриевой по-

лости. При сравнении результатов расчетов и экспериментов было установлено, что имеется возможность отвода тепла кипящим теплоносителем в модельной ТВС с натриевой полостью при тепловых нагрузках 10–15% и расходе натрия около 5% номинальных значений [38].

ВЫВОДЫ

1. Для обоснования характеристик и безопасности реакторов на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением потребовалось проведение теплогидравлических исследований в стационарных и динамических режимах, включая разработку принципов моделирования, создание экспериментальных моделей для выполнения этих исследований, создание системы верификационных тестов, совершенствование и верификацию теплогидравлических расчетных кодов. Теплогидравлические исследования гипотетических (запроектных) аварий должны быть продолжены.

2. Многие задачи обоснования безопасности быстрых реакторов являются комплексными. Для их решения требуется всестороннее изучение нейтронно-физических, теплогидравлических, тепломассообменных и термомеханических процессов как в активной зоне, так и в теплотехническом оборудовании (теплообменники, парогенераторы, устройства очистки теплоносителей от примесей).

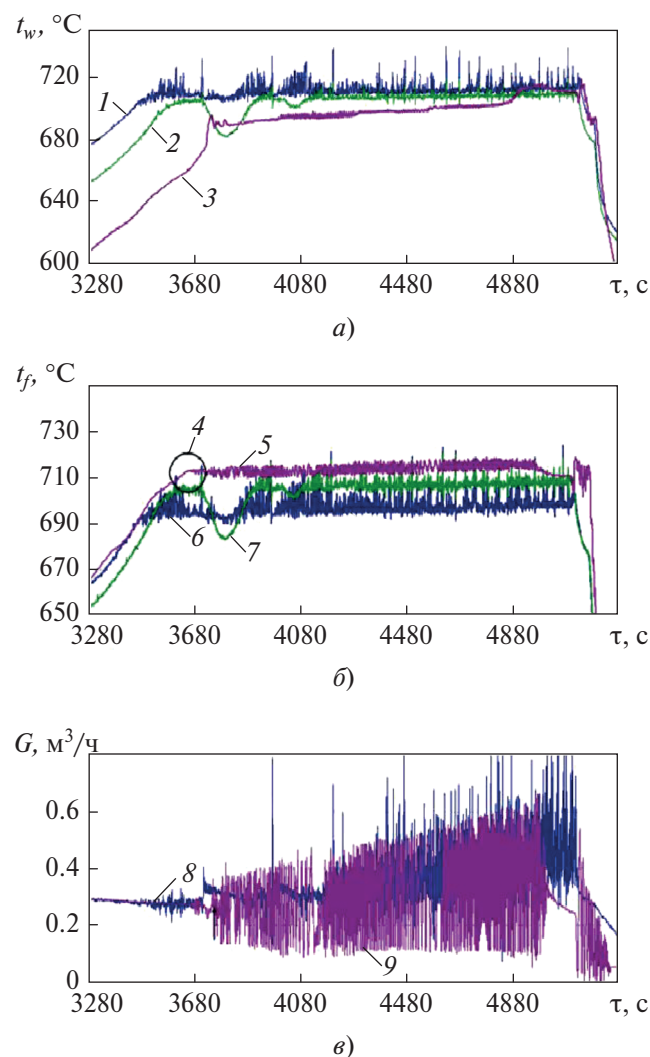


Рис. 11. Расчетные и экспериментальные распределения во времени τ температуры поверхности стенки имитаторов твэлов t_w (а), температуры теплоносителя (жидкости) t_f (f – от англ. fluid) (б) и расхода теплоносителя G (в) в левой ТВС при параллельной работе тепловыделяющих сборок с одинаковым энерговыделением.

1, 2, 6, 7 – показания термпар T_1 , T_{17} , T_5 , T_{11} ; 3, 5 – расчетные значения температур стенки и теплоносителя; 4 – расчетное начало кипения; 8 – расход теплоносителя в эксперименте; 9 – расчетное значение расхода теплоносителя

3. Моделирование теплогидравлических процессов – это основа для разработки методов и средств диагностики и контроля параметров ЯЭУ, создания средств аварийной защиты, в том числе и пассивной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Liquid metal cooled reactors: Experience in design and operation.** IAEA-TCDOC-1569. Vienna: IAEA, 2007.

2. **Поплавский В.М.** Состояние и тенденции развития технологии быстрых реакторов // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2011. № 1. С. 5–15.
3. **Вызовы и стимулы развития натриевых быстрых реакторов в современных условиях** / Д.А. Клинов, А.В. Гулевич, В.С. Каграманян, В.М. Декуссар, В.И. Усанов // Атомная энергия. 2018. Т. 125. Вып. 3. С. 131–136.
4. **Нигматулин Б.И.** Атомная энергетика мира и России. Состояние и развитие. 1970–2018–2040 (2045) гг. М.: Издательский дом МЭИ, 2019.
5. **Кузина Ю.А., Сорокин А.П.** Теплофизика щелочных жидких металлов. Ч. 1: Теплогидравлика и безопасность (ретроспективно-перспективный взгляд) // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2019. № 3. С. 210–232. <https://vant.ippe.ru/year2019/3/thermal-physics-hydrodynamics/1765-19.html>
6. **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 // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2022. № 2. С. 49–61.
7. **Использование жидких металлов в ядерной, термоядерной энергетике и других инновационных технологиях** / В.И. Рачков, М.Н. Арнольдов, А.Д. Ефанов, С.Г. Калякин, Ф.А. Козлов, Н.И. Логинов, Ю.И. Орлов, А.П. Сорокин // Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 20–30. <https://doi.org/10.1134/S0040363614050087>
8. **Комплексные исследования актуальных проблем теплофизики быстрых реакторов** / Ю.А. Кузина, А.П. Сорокин, В.В. Алексеев, В.А. Грабежная, Ю.И. Загоруйко, А.А. Камаев, Ю.И. Орлов // Избранные труды АО “ГНЦ РФ – ФЭИ” / отв. ред. А.А. Говердовский. Обнинск, 2021. С. 256–272.
9. **Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200** / В.И. Рачков, В.М. Поплавский, А.М. Цибуля, Ю.Е. Багдасаров, Б.А. Васильев, Ю.Л. Каманин, С.Л. Осипов, Н.Г. Кузавков, Б.Н. Ершов, Р.Н. Аширметов // Атомная энергия. 2010. Т. 108. Вып. 4. С. 201–205.
10. **Пономарев-Степной Н.Н.** Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым топливным циклом на основе БН ВВЭР // Атомная энергия. 2016. Т. 120. Вып. 4. С. 183–191.
11. **Моделирование формирования температурного поля активной зоны реакторов на быстрых нейтронах с учетом стохастического отклонения параметров с использованием метода Монте-Карло** / А.П. Сорокин, Ю.А. Кузина, Л.Л. Беренский, Н.А. Денисова, Б.Б. Тихомиров // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2022. № 1. С. 125–143. <https://vant.ippe.ru/year2022/1/thermal-physics-hydrodynamics/2122-12.html>
12. **Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета)** / В.И. Субботин, М.Х. Ибрагимов, П.А. Ушаков, В.П. Бобков, А.В. Жуков, Ю.С. Юрьев. М.: Атомиздат, 1975.
13. **Сорокин А.П., Кузина Ю.А.** Физическое моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями // Теплоэнергетика. 2019. № 8. С. 5–16. <https://doi.org/10.1134/S0040363619080095>

14. **Структура** турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах / М.Х. Ибрагимов, В.И. Субботин, В.П. Бобков, Г.И. Сабелев, Г.С. Таранов. М.: Атомиздат, 1978.
15. **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.
16. **Рачков В.И., Сорокин А.П., Жуков А.В.** Теплогидравлические исследования жидкометаллических теплоносителей в ядерных энергетических установках // ТВТ. 2017. Т. 56. № 1. С. 121–136.
17. **Методика** расчета температурных режимов твэлов в ТВС с учетом межканального перемешивания теплоносителя и случайного отклонения параметров / С.С. Гордеев, А.П. Сорокин, Б.Б. Тихомиров, А.А. Труфанов, Н.А. Денисова // Атомная энергия. 2017. Т. 122. Вып. 1. С. 17–25.
18. **Гордеев С.С., Сорокин А.П.** Влияние формоизменения на формирование температурного режима активной зоны реакторов на быстрых нейтронах в процессе кампании // Атомная энергия. 2019. Т. 126. Вып. 2. С. 63–69.
19. **Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Денисова Н.А.** Гидродинамика и теплообмен в ТВС активной зоны быстрых реакторов со спиральными проволочными навивками на твэлах // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2022. № 1. С. 189–209. <https://vant.ippe.ru/year2022/1/thermal-physics-hydrodynamics/2127-17.html>.
20. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов (расчетные программы и практическое приложение). М.: Энергоатомиздат, 1991.
21. **Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н.** Особенности гидродинамики проточных частей коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2016.
22. **Диплом** на открытие МААНОИИ № 518. Закономерность распределения жидкости на выходе из проточных частей раздающих коллекторных систем / В.Н. Дельнов, Б.Н. Габрианович, Ю.С. Юрьев. Заявка на открытие № 670 от 17.04.2019. Приоритет открытия 26.11.2012.
23. **Диплом** на открытие МААНОИИ № 524. Явление возникновения гидродинамической идентичности в раздающих коллекторных системах / В.Н. Дельнов. Заявка на открытие № А-678 от 25.02.2021. Приоритет открытия 2018.
24. **Ushakov P.A., Sorokin A.P.** Modeling problems of emergency natural convection heat removal in the upper plenum of LMR using water // Proc. of the 8th Intern. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-8). Baltimore, USA, 2–6 April 2000. ICONE–8078.
25. **Реактор** на быстрых нейтронах: экспериментальные исследования теплогидравлических процессов в различных режимах работы / А.Н. Опанасенко, А.П. Сорокин, Д.Г. Зарюгин, А.А. Труфанов // Теплоэнергетика. 2017. № 5. С. 24–34. <https://doi.org/10.1134/S0040363617050058>
26. **Кузина Ю.А., Сорокин А.П., Денисова Н.А.** Экспериментальное моделирование теплообмена в тепловыделяющих сборках быстрых реакторов в аварийных режимах в условиях естественной конвекции // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2021. № 4. С. 106–120.
27. **Markley R.A., Engel F.C.** LMFBR blanket assembly heat transfer and hydraulic test data evaluation. Thermodynamics of FBR fuel subassemblies under nominal and non-nominal operating conditions: Summary Report, Vienna, 1979.
28. **Wheeler C.L.** COBRA-IV-I: A interim version of COBRA for thermal. Hydraulic analysis of rod bundle fuel elements and cores, BNWL-1962. Washington: Battelle-Pacific Northwest Laboratory. Richland, Washington, USA, 1976.
29. **Comprehensive** assessment of the ispra BWR and PWR subchannel experiments and code analysis with different two-phase model and solution schemes / L. Wolf, K. Fisher, H. Herkenrath, W. Hufschmidt // Nucl. Eng. Des. 1987. V. 100. P. 329–350.
30. **Novendstern E.H.** Mixing model for wire-wrap fuel assemblies // Trans. Am. Nucl. Soc. 1972. V. 15. No. 2. P. 866.
31. **Исследования** влияния радиационного формоизменения ТВС на температурный режим и напряженно-деформированное состояние оболочки твэлов / А.А. Труфанов, А.П. Сорокин, Г.П. Богословская, Н.А. Денисова // Атомная энергия. 2016. Т. 120. Вып. 6. С. 341–346.
32. **LMFR core thermohydraulic: Status and Prospects.** IAEA-TECDOC-1157. Vienna: IAEA, 2000.
33. **Теплогидравлические** аспекты глубокого выгорания ядерного топлива в быстрых реакторах / А.Д. Ефанов, А.П. Сорокин, А.В. Жуков, Г.П. Богословская, Г.А. Сорокин // Атомная энергия. 2003. Т. 95. Вып. 3. С. 186–193.
34. **Теплообмен** при кипении металлов в условиях естественной конвекции / В.И. Субботин, Д.Н. Сорокин, Д.М. Овечкин, А.П. Кудрявцев. М.: Наука, 1969.
35. **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.
36. **Исследование** кипения щелочного теплоносителя в ТВС быстрых реакторов в аварийных режимах с естественной конвекцией / А.П. Сорокин, Н.А. Денисова, Ю.А. Кузина, Г.А. Сорокин // Атомная энергия. 2024. Т. 136. Вып. 5–6. С. 212–221.
37. **Experimental** and numerical study of liquid metal boiling in a system of parallel bundles under natural circulation conditions / G.A. Sorokin, H. Ninokata, A.P. Sorokin, H. Endo, Eu.F. Ivanov // J. Nucl. Sci. Technol. 2006. V. 43. No. 6. P. 623–634.
38. **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. <https://vant.ippe.ru/year2018/3/thermal-physics-hydrodynamics/1548-17.html>

Studies of Thermohydraulic Processes to Substantiate the Safety Characteristics of Fast Reactors (Review)

A. P. Sorokin^{a, *}, Yu. A. Kuzina^a, V. N. Delnov^a, and N. A. Denisova^a

^a *Leypunsky Institute of Physics and Power Engineering (IPPE), Obninsk, Kaluga oblast, 249033 Russia*

^{*}*e-mail: alexander.p.sorokin@gmail.com*

Abstract—The article presents the results of current problem-oriented studies of thermal-hydraulic processes to substantiate the characteristics and safety of sodium-cooled fast neutron reactors across a wide range of thermophysical problems, including hydrodynamics and heat exchange in channels and fuel assemblies (FA) of the core, including under conditions of fuel element assemblies' deformation during the campaign, intravessel circulation and coolant stratification in the tank of a fast neutron reactor with an integral equipment layout in the nominal mode with forced convection and natural convection of the coolant in the emergency cooldown mode, in the intermediate heat exchanger, and in the large-modular steam generator. The data of experimental hydrodynamic studies of flow parts of reactor installations, heat exchangers, and reactors of nuclear power plants are presented. The article analyzes the patterns of hydrodynamic processes occurring in the flow sections of cylindrical collector systems in reactors and heat exchangers identified during experimental studies on an aerodynamic stand and a hydraulic flume. These patterns are registered as scientific discoveries as previously unknown patterns and phenomena related to the atomic, space, metallurgical, and chemical fields of science and technology. The results of the computational studies performed using the version of the channel-by-channel code implementing a two-fluid model of a two-phase flow of liquid metal in the approximation of equal pressures in the vapor and liquid phases reproduce the development of the flow regimes of a two-phase flow, the pulsations of the liquid metal flow obtained in experimental studies, and also demonstrate antiphase pulsations of the flow of a two-phase coolant in a system of parallel fuel assemblies and interchannel instability characterized by a significant increase in the amplitude of the pulsations of the coolant flow in parallel FA.

Keywords: fast reactor, sodium, thermal hydraulics, safety, emergency modes, experiment, numerical modeling, core, reactor tank, turbulent transfer, stratification, boiling of liquid metals