

# СТАТЬИ

---

УДК 536.24+621.039.553.34

## ТЕПЛОГИДРАВЛИКА ЩЕЛОЧНОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ (РЕТРОСПЕКТИВНО-ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ВЗГЛЯД)

*Сорокин А.П., Кузина Ю.А. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)  
e-mail: sorokin@ippe.ru*

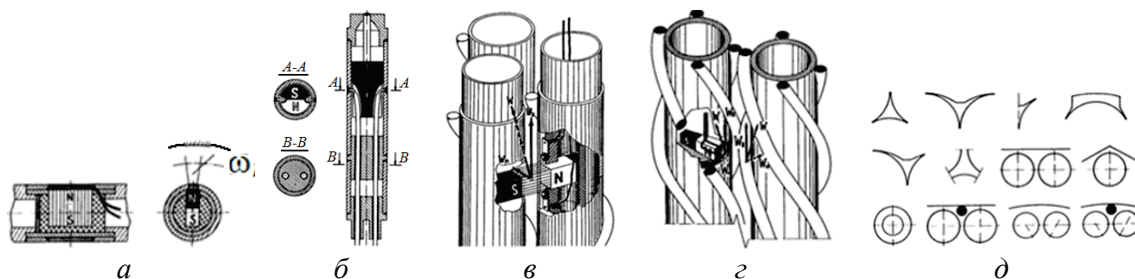
Осенью 1950 г. при рассмотрении предложений А.И. Лейпунского секция НТС Главка Минсредмаша рекомендовала Лаборатории В (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ») сосредоточиться на разработке реакторов с жидкометаллическим охлаждением. 24 мая 1954 г. в ФЭИ был создан теплотехнический отдел, преобразованный затем в теплофизический сектор, который возглавляли В.И. Субботин, в дальнейшем П.Л. Кириллов, А.Д. Ефанов. Научное теплофизическое обоснование разрабатываемых АЭС и ЯЭУ нового типа потребовало создания новых методик, специального оборудования и экспериментальной базы. Созданный в ФЭИ комплекс гидродинамических, жидкометаллических теплогидравлических и технологических стендов обеспечил их выполнение и в настоящее время готов к экспериментальному обоснованию инновационных технических решений проектов ЯЭУ нового поколения [1]. Созданы научные основы их использования в ядерной энергетике, научно обоснованы теплофизические параметры и высокоэффективные технологические процессы, разработаны и практически реализованы аппараты и системы, обеспечившие их успешную эксплуатацию [2].

Реализация стратегии двухкомпонентной ядерной энергетике с замыканием топливного цикла с использованием быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, обеспечение ее конкурентоспособности и сохранение приоритета, которым обладает наша страна по АЭС с быстрыми реакторами с натриевым теплоносителем, требуют продолжения комплекса проблемно-ориентированных исследований по проектам реакторов нового поколения [3, 4].

**Теплогидравлические исследования. Методология исследований.** На всех этапах исследований большое внимание уделялось методикам и технике измерений теплофизических характеристик, включая разработку уникальных датчиков скорости, расхода, давления, уровня, температуры и др. Созданы микротермопары для измерения температуры в защитных чехлах наружным диаметром 0,3—0,8 мм, работающие в интервале 300—1800 °С. Для измерения расхода жидких металлов созданы расходомеры разных конструкций [5]. Позднее были созданы методики электромагнитного измерения локального расхода (скорости) жидкого металла в каналах и пучках стержней, определения характеристик перемешивания теплоносителя в опытах на воздухе с добавкой малой доли газообразных трассеров в виде фреона или пропана [2, 6, 7] (рис. 1).

Большое внимание уделено методам физического моделирования экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена в ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями. Экспериментально доказана возможность моделирования гидродинамики несжимаемых сред, в том числе жидких металлов в опытах с воздухом, теплообмена в жидких металлах Na, Na—K, Li, Hg, Pb, Pb—Bi и др. с помощью моделирующих сред [7, 8]. Указанные методики позволили выполнить эксперименты фундаментального и прикладного характера.

**Гидродинамика каналов и проточных частей оборудования, турбулентный обмен.** Проведены широкие исследования гидродинамики каналов сложной формы, включая пучки стержней, проточные части реакторных установок. Максимальное внимание уделялось измере-



Р и с. 1. Электромагнитные датчики для измерения продольной скорости теплоносителя в гладких стержневых системах (а), интегрального расхода теплоносителя вокруг трубок (б), поперечной скорости в зазоре между оребренными стержнями «ребро по оболочке» (в), продольной и поперечной скорости по периметру оребренных стержней «ребро по ребру» (г), скорости теплоносителя в разных видах каналов (д)

нию скорости теплоносителя, распределению касательного напряжения, турбулентных характеристик и др. [7]. В результате всесторонних и систематических исследований статистических характеристик полей температуры и скорости в турбулентном потоке воды и жидких металлов изучены характеристики пульсаций температуры и скорости, интенсивность пульсаций, корреляционные функции, спектральная плотность и распределение вероятностей. Это позволило глубже понять механизм турбулентного теплообмена и наметить пути к построению физически обоснованной теории турбулентного теплообмена [9, 10]. Обширный экспериментальный материал о турбулентных гидродинамических характеристиках в сборках твэлов получен по совместной программе исследований Института ядерных исследований (Чехословакия) и ФЭИ [11]. Результаты исследований не потеряли актуальность и в настоящее время.

Исследования на гидродинамических моделях быстрых реакторов показали, что потоки теплоносителя из каждой циркуляционной петли занимают в активной зоне свою определенную область, слабо перемешиваясь. В результате большого комплекса исследований гидродинамики коллекторов и проточной части реакторов установлена закономерность распределения жидкости на выходе из раздающих коллекторных систем [12].

**Теплообмен в каналах и пучках твэлов активной зоны.** Наибольшее внимание уделено теплогидравлическим исследованиям высоконапряженного и ответственного узла реакторной установки — активной зоны, подвергающейся воздействию различных факторов в процессе кампании: конструктивных, режимных, технологических, радиационных и эксплуатационных

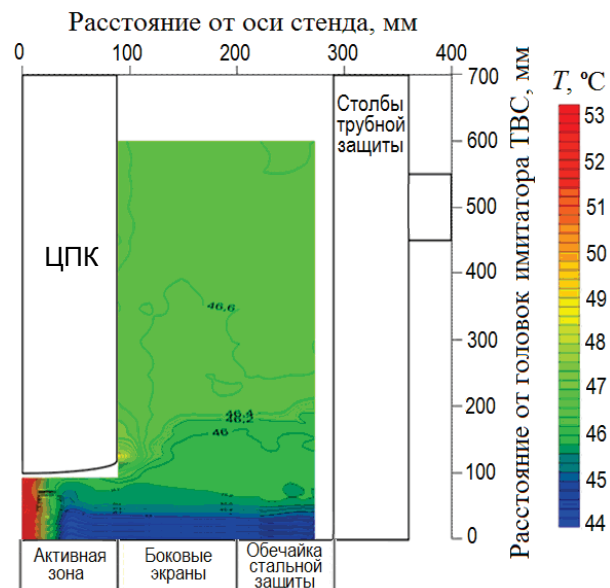
[13]. Было показано, что на границе раздела теплоноситель—поверхность теплообмена термическое (контактное) сопротивление отсутствует, если концентрация примесей в теплоносителе не превышает их растворимость при температуре циркулирующего металла. В этих условиях теплоотдача к жидким металлам Na, Na—K, Li, Hg, Pb—Bi в трубах описывается единой критериальной зависимостью, близкой к формуле Лайона. При насыщении теплоносителя примесями коэффициенты теплоотдачи могут снизиться в 1,5—2 раза, что согласуется с опытами ЭНИН, ЦКТИ, ФЭИ [6].

Экспериментальные и расчетные исследования показали необходимость решения сопряженной задачи теплоотвода от твэлов с учетом их теплофизических свойств. Разработанная теория приближенного теплового подобия твэлов, расположенных в правильных решетках, позволила их моделировать многослойными трубками с электрообогревом изнутри и нашла применение в исследованиях активных зон быстрых реакторов [14]. Получены детальные экспериментальные данные о теплогидравлике полногабаритных моделей активных зон при наличии прогибов твэлов, асимметричных сдвижек и деформаций элементов, перекрытии различных частей активной зоны, наличии встречных потоков [2].

В результате экспериментальных исследований и расчетно-теоретического анализа межканального обмена массой, импульсом и энергией в пучках гладких и оребренных спиральной дистанционирующей проволоочной навивкой твэлов созданы физически обоснованные методы и программы (ТЕМР, МИФ) теплогидравлического расчета формоизмененных ТВС активной зоны [15, 16].

Исследовано влияние на температурный режим ТВС геометрии и материалов твэлов, радиационного распухания и ползучести, выявлены особенности формирования температурного режима активной зоне в процессе эксплуатации (кампании) [17]. Показана эффективность использования разнонаправленных проволоочных навивок, создающих противоположно направленные потоки теплоносителя в поперечных направлениях.

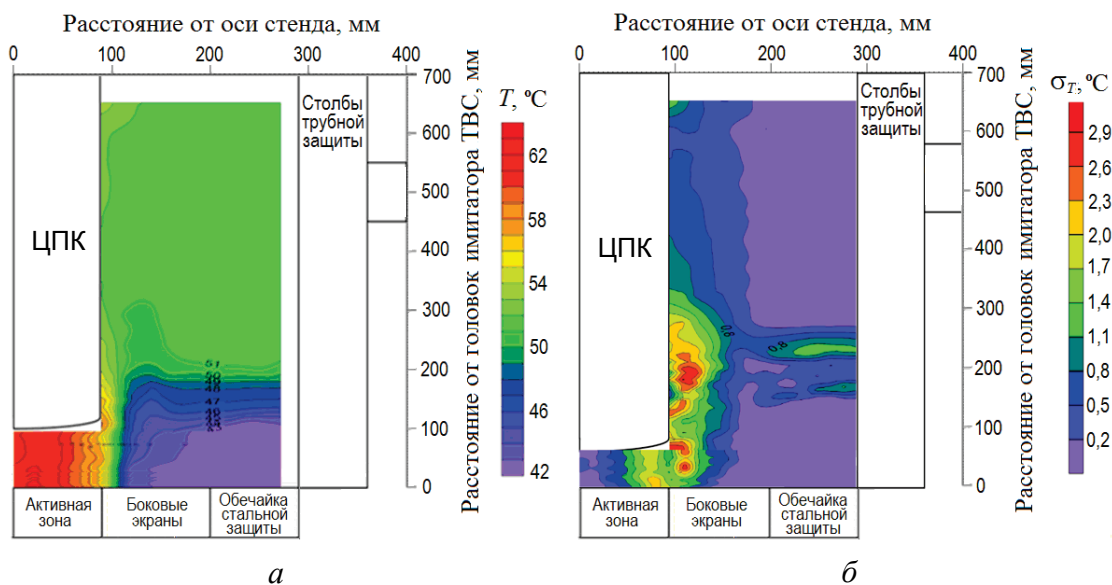
**Внутрикорпусная циркуляция, узлы оборудования.** Экспериментальные исследования на интегральной водяной модели с использованием развитой теории приближенного моделирования полей температуры и структуры движения неізотермического теплоносителя в элементах первого контура реактора для режимов принудительной циркуляции, перехода к режиму расхолаживания и аварийного расхолаживания естественной конвекцией теплоносителя показали существенную и устойчивую температурную стратификацию теплоносителя в периферийной зоне верхней (горячей) камеры над боковыми экранами, в холодной и напорной камерах, элеваторной выгородке, системе охлаждения корпуса, на выходе из промежуточных и аварийных теплообменников в различных режимах их работы (рис. 2, 3) [18]. На границах раздела стратифицированных и рециркуляционных образований зафиксированы большие гра-



Р и с. 3. Усредненная температура по высоте верхней камеры реактора в установившемся режиме расхолаживания естественной конвекции [18]

диенты и пульсации температуры. Полученные результаты могут быть использованы для верификации расчетных кодов и приближенной оценки параметров реакторной установки при пересчете по критериям подобия.

**Теплообменники и парогенераторы.** Исследованы характеристики теплообмена, критические тепловые потоки и устойчивость циркуляции парогенераторов реакторных установок с БН-350, -600, -800 и принципиально нового



Р и с. 2. Распределение усредненной температуры теплоносителя (а) и интенсивности ее пульсаций (б) по высоте верхней камеры, полученное при перемещении подвижных термозондов, в номинальном режиме работы установки [8]

крупномодульного парогенератора перспективного быстрого реактора [19]. С использованием кодов «Протва» и «Угра», созданных на основе развитой теории анизотропного пористого тела для расчета сложных течений в реакторах, теплообменниках и парогенераторах, доказана возможность применения в БН-800 теплообменников с той же поверхностью теплопередачи, что и в БН-600.

**Кипение жидких металлов.** Исследования кипения жидких металлов в большом объеме на установках, оснащенных электронным обогревом, передвижными микротермопарами, рентгеновскими аппаратами для просвечивания, показали наличие режимов с устойчивым и неустойчивым кипением [20]. В дальнейшем при исследовании кипения жидкого металла на моделях ТВС на стенде АР-1 отмечены три режима течения двухфазного потока: пузырьковый, снарядный и дисперсно-кольцевой, являющийся предельным по отношению охлаждения сборки. Обоснована принципиальная возможность длительного охлаждения активной зоны при возникновении кипения в аварийных режимах, в том числе в ТВС с натриевой полостью над зоной энерговыделения, обнаружен эффект влияния шероховатости поверхности твэлов на развитие кипения в пучках твэлов, изучена теплоотдача при кипении жидких металлов, построена картограмма режимов течения двухфазного потока жидких металлов [21].

**Конденсация жидких металлов.** При конденсации металлов с большим поверхностным натяжением тепломассообмен осуществляется через поверхность капли (чисто капельная конденсация). Теоретические расчеты и опыты позволили получить и объяснить механизмы капельной и микропленочно-капельной конденсации, области их существования для различных жидкостей и имевшиеся противоречия [22].

**Систематизация, анализ и обобщение теплофизических данных.** Теплофизические данные быстрых реакторов с щелочными теплоносителями были систематизированы по многим направлениям: поля скорости и температуры в активной зоне, горячей камере, теплообменниках и парогенераторах, гидравлическое сопротивление и теплоотдача в каналах и пучках твэ-

лов для однофазного потока, теплоотдача, структура и карта режимов течения двухфазного потока, кризис теплообмена в сборках, теплофизические свойства теплоносителей и реакторных материалов [23]. Разработаны руководящие технические материалы и справочники [23—25].

**Тепловые трубы.** В результате исследования щелочных металлов (натрий, калий, литий, цезий) как рабочих тел были созданы основы проектирования тепловых труб. Экспериментально установлено, что их эффективная теплопроводность в десятки тысяч раз превышает теплопроводность медных или серебряных теплопроводов. Определены основные ограничения в работе тепловых труб. Так, появление малого количества неконденсирующихся газов в пусковом режиме тепловой трубы или в процессе ее работы приводит к снижению эффективности и даже к срыву циркуляции. Сверхзвуковые скорости течения паров и скачки конденсации в пусковых режимах в трубах приводили к ограничению температурного диапазона их применения [26, 27]. В результате впервые были созданы тепловые трубы с жидкометаллическим теплоносителем для разного применения.

**Петлевые и реакторные исследования.** Петлевые и реакторные исследования были выполнены по инициативе и под руководством В.И. Субботина не только впервые в СССР, но и в мире. При проведении этих работ были испытаны новые конструкции твэлов. С помощью экспериментальных термометрических сборок, оснащенных микродатчиками температуры и расхода, исследованы поля температуры и скорости по радиусу активной зоны и в компенсирующих стержнях реакторов, пульсации температуры оболочки твэлов, расхода жидкого металла в различных точках активной зоны реактора. Их результаты позволили ответить на вопросы о режимах работы отдельных элементов реакторов, надежности и достоверности применяемых расчетных рекомендаций и наметить пути создания новых конструкций твэлов и активных зон.

**Теплофизические аспекты безопасности.** Последствия аварий в быстрых реакторах в значительной степени определяются исходными событиями и динамикой развития аварийных ситуаций [28]. Так, к значительному перегреву теплоносителя и оболочки твэлов могут приве-

сти деформация активной зоны и блокировка части проходного сечения ТВС, возникновение которой обусловлено наличием в потоке оксидов, загрязнением теплоносителя и разрушением твэлов [17, 29, 30]. Стохастический расчет с учетом радиационного формоизменения указывает на значительное повышение температуры оболочки отдельных твэлов (около 60 °С) и увеличение максимальной азимутальной неравномерности температуры до 65 °С в сечении ТВС с максимальным формоизменением (на 100 мм ниже центра активной зоны) по сравнению с номинальным расчетом ТВС без учета деформации твэлов.

Наблюдавшиеся при эксплуатации быстрых реакторов ненормальные ситуации — неконтролируемое загрязнение натриевых систем, зажимание центральной поворотной колонны, ошибки в расчетах гидравлики контуров, нарушение теплогидравлического режима, обусловленного высокой химической активностью теплоносителя при взаимодействии с воздухом и водой, течь натрия в атмосферу, течь воды в натрий в парогенераторах потребовали выполнения большого комплекса расчетно-теоретических и экспериментальных работ. Спектр явлений расширился. Горение сопровождается возрастанием локальной температуры, образованием аэрозолей. При истечении воды в натрий скорость коррозии материала стенки в зоне истечения возрастает во много раз. В результате малая течь саморазвивается, переходит в большую, формируется высокотемпературный факел, который активно воздействует на соседние трубки парогенератора и разрушает их.

В результате исследований развития деградации имитатора ТВС активной зоны быстрых реакторов при термическом взаимодействии урансодержащих имитаторов топлива (высокотемпературное разрушение твэлов) со статическим натрием, термического взаимодействия расплава и его имитаторов с натрием и водой определены кинетические и механические характеристики процесса и их зависимость от температурных, гидродинамических параметров и конструкции системы [31]. Безопасность быстрых реакторов повышается путем совершенствования систем, основанных на пассивном принципе действия [28].

**Закключение.** Опыт освоения позволяет считать, что жидкометаллические теплоносители по праву занимают свою нишу в ядерной энергетике наравне с водным теплоносителем. Однако нельзя считать, что все задачи решены. Задачи теплогидравлических исследований, стоящие на пути создания новых реакторных установок, включают:

разработку методов физического моделирования теплогидравлических, физико-химических и технологических процессов на всех участках гидродинамического тракта реактора (активная зона, промежуточный теплообменник, система аварийного отвода тепла) с учетом нестационарности, например, развития естественной циркуляции при срабатывании аварийной защиты или возникновении кипения в ТВС;

экспериментальное определение базовых констант и замыкающих соотношений по теплоотдаче и полям температуры твэлов для всех условий и режимов работы (деформация геометрии, всплески энерговыделения, статистическое распределение параметров, факторы перегрева и др.), используемых при численной реализации комплекса кодов;

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

создание и обоснование системы верификационных тестов;

разработку верифицированного комплекса кодов, которые учитывают взаимосвязь ядерно-физических, теплогидравлических, физико-химических, термомеханических, массообменных и технологических процессов, происходящих в ядерных энергетических установках, для обоснования их ресурса с учетом всей совокупности процессов и режимов ее эксплуатации;

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

Главная задача работ в обеспечение безопасности быстрых реакторов нового поколения — обеспечение безопасности первого контура, включающего наиболее ответственный узел реактора — активную зону:

обоснование температурного режима активной зоны с учетом случайных отклонений параметров (геометрических, технологических, режимных, погрешностей теплофизических свойств, расчетных констант и др.);

анализ последствий возможных нестандартных режимов (блокировки, аварийного отвода тепла, кипения) и разработка мероприятий, исключающих их переход в тяжелую аварию;

изучение режимов двухфазного потока натрия при возникновении и развитии кипения в ТВС активной зоны в аварийных режимах, динамики распространения области кипения натрия в ТВС с новым техническим решением — натриевой полостью над активной зоной, определение границы устойчивого охлаждения активной зоны;

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

разработка системы обнаружения аномалии в отдельной ТВС или в их группе до разрушения оболочки ТВЭЛов;

анализ с использованием разработанного комплекса кодов тепломассопереноса особенностей гомогенного (водород, тритий) и гетерогенного (примеси с низкой растворимостью — продукты коррозии, углерод, топливо, продукты деления) массопереноса примесей, разработка способов минимизации их накопления в застойных зонах и исключение возникновения аномальных ситуаций. Главная задача — исключение возможности образования мест осаждения примесей в жидкометаллических системах.

Первостепенными задачами при создании перспективного крупноблочного парогенератора являются:

разработка систем автоматической защиты и обоснование теплогидравлических режимов;

анализ теплогидравлических режимов и гидродинамической устойчивости, комплексные испытания систем автоматической защиты парогенераторов на стенде системы автоматической защиты, поставка и монтаж всех систем автоматической защиты;

разработка конструкционного материала и конструкции, обеспечивающей замедление про-

цессов саморазвития и развития течей и оперативный ремонт после течи воды в натрий для повышения безопасности;

совершенствование систем обнаружения течей: концентрационного (электрохимические ячейки), виброакустического и других методов;

разработка методов и технических решений, минимизирующих количество истекающего натрия и его контакт с воздухом, изучение аварийной ситуации «течь перед разрывом».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теплофизическая** стендовая база атомной энергетики России и Казахстана. Саров, ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ», 2016.
2. **LMFR Core and Heat Exchanger Thermohydraulic Design: Former USSR and Present Russian Approaches.** IAEA-TECDOC-1060. Vienna: IAEA, 1999.
3. **Пономарев-Степной Н.Н.** Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе быстрых реакторов и ВВЭР. — Атомная энергия, 2016, т. 120, вып. 4, с. 183—191. // **Ponomarev-Stepnoi N.N.** Two-Component Nuclear Power System with a Closed Nuclear Fuel Cycle Based on BN and VVER Reactors. — Atomic Energy, 2016, v. 120, № 4, p. 233—239.
4. **Васильев Б.А., Васяев А.В., Зверев Д.Л. и др.** Инновационный проект энергоблока БН-1200 как основа эволюционного развития направления БН. — В сб.: IV Межд. научно-технич. конф. «Инновационные проекты и технологии атомной энергетики (МНТК НИКИЭТ-2016)». Москва, АО «НИКИЭТ», 27—30 сентября 2016 г., с. 38—39.
5. **Логинов Н.И.** Электромагнитные преобразователи расхода жидких металлов. М.: Энергоиздат, 1981.
6. **Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др.** Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М.: Атомиздат, 1975.
7. **Гидродинамика и безопасность ядерных энергетических установок.** Сб. трудов ГНЦ РФ — ФЭИ в 3 т. Под ред. А.Д. Ефанова, Б.Н. Габриановича, Н.Н. Давиденко и др. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 1999.
8. **Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Орлов А.И.** Экспериментальное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в реакторах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2019, № 1, с. 226—258.
9. **Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.П. и др.** Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. М.: Атомиздат, 1978.
10. **Булев Н.И.** Пространственная модель турбулентного обмена. М.: Наука, 1999.
11. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Ушаков П.А. и др.** Теплофизическое обоснование температурных режимов

- ТВС быстрых реакторов с учетом факторов перегрева. Гидродинамические характеристики в ТВС быстрых реакторов: Препринт ФЭИ-1816, 1985.
12. **Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н.** Особенности гидродинамики проточных частей коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ. Саров, ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ», 2016.
  13. **Гордеев С.С., Сорокин А.П.** Влияние различных факторов на формирование температурного поля активной зоны реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем в процессе кампании. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2018, № 2, с. 226—258.
  14. **Ушаков П.А.** Приближенное тепловое моделирование цилиндрических тепловыделяющих элементов. — В сб.: Жидкие металлы. М.: Атомиздат, 1967, с. 137—148.
  15. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
  16. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. Расчетные программы и практическое приложение. М.: Энергоатомиздат, 1991.
  17. **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. // **Sorokin A.P., Bogoslovskaya G.P., Trufanov A.A., Denisova N.A.** Investigation of the Effect of Radiation-Induced Shape Change of Fuel Assemblies on the Temperature Regime and Stress-Strain State of Fuel-Element Cladding. — Atomic Energy, 2016, v. 120, № 6, p. 418—425.
  18. **Опанасенко А.Н., Сорокин А.П., Труфанов А.А. и др.** Экспериментальные исследования полей температуры и скорости на интегральной водяной модели. — Там же, 2017, т. 121, вып. 1, с. 21—27. // **Opanasenko A.N., Sorokin A.P., Trufanov A.A. e.a.** Experimental Studies of Coolant Temperature and Velocity on an Integrated Water Model of a Fast Reactor in Different Operating Regimes. — Atomic Energy, 2017, v. 123, № 1, p. 25—33.
  19. **Грабежная В.А., Михеев А.С.** Опыт экспериментального обоснования парогенераторов АЭС с быстрыми реакторами. — Там же, 2015, т. 119, вып. 2, с. 87—94. // **Grabezhnaya V.A., Mikheev A.S.** Experience in Experimental Validation of the Steam Generators Used in NPP with Fast Reactors. — Atomic Energy, 2015, v. 119, № 2, p. 106—116.
  20. **Субботин В.И., Сорокин Д.Н., Овечкин Д.М., Кудрявцев А.П.** Теплообмен при кипении металлов в условиях естественной конвекции. М.: Наука, 1969.
  21. **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. // **Sorokin A.P., Kuzina Yu.A., Ivanov E.F.** Characteristics of Heat Transfer During Boiling of Liquid Metal in the Fuel Assemblies of Fast Reactors in Emergency Regimes. — Atomic Energy, 2019, v. 126, № 2, p. 73—82.
  22. **Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Субботин В.И.** Испарение и конденсация жидких металлов. М.: Атомиздат, 1976.
  23. **Zhukov A.V., Sorokin A.P., Efanov A.D. e.a.** Database and knowledge on thermal hydraulics of fast reactors. — In: Meeting IAEA, TWG—FR/123, 14—18 February 2005. Vienna: IAEA, 2005, p. 457—477.
  24. **Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Жуков А.В. и др.** База экспериментальных данных по теплогидравлике быстрых реакторов для верификации расчетных кодов. — Атомная энергия, 2009, т. 107, вып. 3, с. 128—136. // **Efanov A.D., Sorokin A.P., Zhukov A.V. e.a.** Experimental Database on Fast-Reactor Thermohydraulics for Computational Code Verification. — Atomic Energy, 2009, v. 107, № 3, p. 162—172.
  25. **Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В. и др.** Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 1. М.: ИздАТ, 2010.
  26. **Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В.** Физические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1978.
  27. **Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Чулков Б.А., Ягодкин И.В.** Технологические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1980.
  28. **Сорокин А.П.** Теплогидравлические исследования безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах. — Теплоэнергетика, 2007, № 12, с. 29—36.
  29. **Казачковский О.Д., Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Температурные поля в формоизмененных ТВС быстрых реакторов. — Атомная энергия, 1988, т. 65, вып. 2, с. 89—97. // **Kazachkovskii O.D., Zhukov A.V., Sorokin A.P., Matyukhin N.M.** Temperature Fields in Fast Reactor Fuel Assemblies with Shape Changes. — Atomic Energy, 1988, v. 65, № 2, p. 627—636.
  30. **Кузина Ю.А., Сорокин А.П., Жуков А.В.** Численное моделирование теплогидравлики ТВС реакторов с блокировками. — Там же, 1999, т. 87, вып. 5, с. 342—356. // **Kuzina Yu.A., Sorokin A.P., Zhukov A.V.** Numerical Simulation of the Thermohydraulics of Reactor Fuel Assemblies with Blockages. — Atomic Energy, 1999, v. 87, № 5, Article Number 808.
  31. **Загорюлько Ю.И., Жмурич В.Г., Ганичев Н.С.** Экспериментальные исследования повреждаемости оболочек твэлов в условиях потери расхода теплоносителя через ТВС. — В сб.: Научно-технич. конф. «Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2011)». Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2013, т. 1, с. 33—41.

Поступила в Редакцию 30.04.19