

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В БАКЕ БЫСТРОГО РЕАКТОРА НА ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ SARX В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Д.Г. Зарюгин, С.Г. Калякин, С.Т. Лескин*, А.Н. Опанасенко,
А.П. Сорокин

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, г. Обнинск
* ИАТЭ НИЯУ МИФИ*



Рассмотрены особенности стратифицированных течений на примерах реакторов на быстрых нейтронах и возможности их масштабного моделирования. Представлены некоторые результаты экспериментальных и численных исследований в смесительных камерах и трубопроводах. Указывается на необходимость учета стратификационных явлений при обосновании надежности, безопасности, сроков эксплуатации различных ядерных энергетических установок.

Ключевые слова: быстрый реактор, натрий, теплогидравлика, масштабное моделирование, интегральная модель, камера смешения, трубопроводы, стратификация, аварийное расхолаживание.

Key words: fast reactor, sodium, thermohydraulic, scale modelling, integral model, mixing chamber, pipelines, stratification, decay heat removal.

Задача увеличения длительности эксплуатации и повышения надежности перспективного быстрого реактора БН-1200 с интегральной компоновкой не может быть решена без достоверной информации о теплогидравлических характеристиках в элементах контура циркуляции теплоносителя. Опыт эксплуатации реактора БН-600, результаты специальных реакторных измерений и экспериментальных исследований на моделях выявили температурное расслоение (стратификацию) теплоносителя в элементах бака реактора с большими объемами теплоносителя. Процессы температурной стратификации теплоносителя, не предусмотренные проектной документацией, коренным образом изменяют структуру движения теплоносителя и его температурный режим, приводят к формированию застойных и рециркуляционных образований с большими градиентами и пульсациями температуры на тонких стратифицированных границах раздела изотермических зон. Термическая усталость материала, обусловленная градиентами и пульсациями температуры в стратифицированном потоке, понижает ресурс внутрибакового оборудования.

Расслоение теплоносителя оказывает существенное влияние на ядерно-физические характеристики реактора, физико-химическое взаимодействие между теплоносителем и конструкционными материалами, процессы осаждения окислов в холодных застойных зонах бака. Необходимо обоснование установки штатных датчиков управления и размещения фильтров-ловушек в баке реактора. Современные расчетные коды позволяют получать только осредненную картину распределения температуры в потоке теплоносителя. Пульсационные характеристики температуры на стратифицированных поверхностях раздела, как правило, не определяются расчетами.

Таким образом, ставилась задача исследовать особенности теплогидравлики стратифицированного потока в элементах контура циркуляции быстрого реактора в различных режимах работы, разработать рекомендации по уменьшению температурной неоднородности, интенсификации смешения неоднородного потока, а также подтвердить принятые проектные решения по эффективности пассивной системы аварийного расхолаживания с погружными теплообменниками в верхней камере.

Для исследования теплогидравлических процессов в корпусах быстрых реакторов и верификации соответствующих программ расчета используются интегральные модели, выполненные в определенном масштабе и имитирующие работу основных узлов реальной установки.

В литературе представлен значительный объем исследований на интегральных моделях. Точное моделирование процессов тепломассопереноса на мелкомасштабных моделях с натурным теплоносителем практически нереально из-за невозможности сохранения важнейших критериев подобия – Re , Pe , Fr , а использование крупномасштабных моделей с натурным теплоносителем приводит к весьма высокой стоимости. В связи с этим в известных зарубежных интегральных моделях в качестве теплоносителя применяется вода. Среди них можно назвать такие модели, как RAMONA и NEPTUN, относящиеся к концепции европейского быстрого реактора.

Для экспериментального обоснования системы расхолаживания жидкометаллических быстрых реакторов нового поколения в ГНЦ РФ-ФЭИ создана интегральная модель CAPX с водой в качестве теплоносителя. Модель выполнена по гибкой схеме, позволяющей моделировать режимы, характерные для любых условий (нормальные, переходные, аварийные) и для любых жидкометаллических реакторов.

Проведенный в ГНЦ РФ-ФЭИ и других организациях анализ имеющихся работ по исследованию теплогидравлических процессов аварийного расхолаживания с помощью специальных аварийных теплообменников (АТО) показывает, что строго геометрического и критериального подобия не достигается. В то же время полученные на водоохлаждаемых моделях экспериментальные данные, как показывает практика, позволяют выявить особенности процессов тепломассопереноса в неизотермическом потоке, приближенно переносить результаты исследований на реальные объекты по критериям подобия, а также использовать полученные данные для разработки и верификации расчетных кодов.

Наиболее полно вопросы моделирования аварийного расхолаживания с помощью АТО рассмотрены в работах [1, 2]. В работе [3] показано, что основными критериями подобия являются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} Fr &= w^2 / (g \beta \Delta T L) && \text{– число Фруда;} \\ Eu &= \Delta P / (\rho w^2) && \text{– число Эйлера;} \\ N &= Q / (\rho c w L^2 \Delta T) && \text{– число баланса тепла;} \\ No &= \tau w / L && \text{– число гомохорности.} \end{aligned}$$

Здесь w – характерная скорость; g – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного расширения; ΔT – характерная разность температур (подогрев в АЗ); L – характерный размер; ΔP – перепад давлений; ρ – плотность среды; Q – мощность; c – удельная теплоемкость; τ – время.

Пусть Ri – число Ричардсона, G – расход теплоносителя (индекс «м» означает модель, а индекс «р» – реактор). Тогда, принимая

$$Ri_m / Ri_p = Eu_m / Eu_p = N_m / N_p = No_m / No_p = 1,$$

можно получить масштабные коэффициенты для пересчета с модели на реактор:

$$\Delta T_m / \Delta T_p, w_m / w_p, G_m / G_p, Q_m / Q_p, \tau_m / \tau_p.$$

Значительный перепад температур между выходом теплоносителя из активной зоны и боковыми экранами (сравнимый с подогревом в активной зоне) приводит к существенному влиянию подъемных сил на структуру движения неизотермического теплоносителя в верхней камере и его температурный режим даже в номинальном режиме работы. Поэтому большой объем теплоносителя в периферийной зоне верхней камеры устойчиво стратифицирован. Основными параметрами, характеризующими течение в стратифицированной зоне, являются числа Фруда, Пекле (a – коэффициент температуропроводности) и локальное градиентное число Ричардсона

$Fr = w^2 / [g(\Delta\rho/\rho)L] \approx w^2 / (g\beta\Delta TL)$, $Pe = wL/a$, $Ri = g\beta(\partial t/\partial z) / (\partial w/\partial z)^2$
при условии автомодельности по числу Рейнольдса

$$Re = wL/\nu.$$

Характеристиками степени стратификации являются частота плавучести (частота Вейселя-Брента)

$$N = (g/\rho \cdot \rho/\partial z)^{1/2}$$

и масштаб плавучести

$$L_\Pi = \rho(\partial\rho/\partial z)^{-1}.$$

Масштаб плавучести представляет собой максимальную высоту, на которую может подняться «турбулентный вихрь» относительно равновесного положения в окружающей жидкости. Колебания элементарного вихря относительно равновесного положения приводят к возникновению внутренних волн на поверхностях раздела с частотой $w \leq N$, которые вызывают пульсации температуры на стенках оборудования. В стратифицированном турбулентном потоке максимальный размер вихрей не может превышать масштаб плавучести. В предельном случае, когда $L_\Pi < L_K$ (масштаб Колмогорова $L_K = (\nu^3/\varepsilon)^{0,25}$, ν – коэффициент кинематической вязкости, ε – скорость диссипации энергии), в стратифицированном горизонтальном разделительном слое между изотермическими нижней холодной областью и верхней горячей происходит полное подавление конвективного переноса в вертикальном направлении.

Разработка интегральной водяной модели для моделирования теплогидравлики в баке реактора БН-1200 основана на модернизации существующей интегральной модели САРХ. Высокие технико-экономические показатели разрабатываемой перспективной РУ БН-1200 достигаются за счет повышения мощности основного технологического оборудования, уменьшения его весогабаритных характеристик, применения новых технических решений по оптимизации состава и размещения вспомогательных систем, повышения проектного срока службы энергоблока до 60-ти лет.

Одной из задач исследований на модернизированной модели САРХ, как уже от-

мечалось, является обоснование проектных решений по системе аварийного отвода тепла (САОТ). В систему входят четыре автономных теплообменника, размещенные в верхней зоне бака реактора на периферии, промежуточные натриевые контуры и воздушные теплообменники, соединенные с вытяжной трубой. Новизна такой системы расхолаживания состоит в прямом отводе теплоносителя из АТО трубопроводом с обратным клапаном в напорную камеру.

Другой не менее важной целью работы является исследование особенностей теплогидравлики в неизотермическом объеме бака реактора в различных режимах работы установки. Расчетно-экспериментальные исследования должны иметь комплексный характер, включающий в себя измерения не только осредненных, но и локальных пульсационных характеристик температуры, скорости и их распределений, а расчетные коды в дальнейшем должны включать в себя расчет термических напряжений в материале реакторного оборудования.

Необходимо также отметить, что интегральная модель САРХ будет использована создаваемой ГНЦ РФ-ФЭИ и ИАТЭ НИЯУ МИФИ учебной научно-исследовательской лабораторией для моделирования характерных режимов работы быстрых реакторов с жидкометаллическими теплоносителями и подготовки научных и инженерных кадров.

Технический состав, габаритные и весовые характеристики модели САРХ практически не изменяются. В корпусе модернизированной модели сохраняются сборочное оборудование, устройства и система модели САРХ: центральная колонна, опорные пояса, тепловые экраны, внутрибаковая защита, отражатель, напорная камера с имитаторами вновь разрабатываемых сборок активной зоны, имитаторы главных циркуляционных насосов, промежуточные теплообменники, автономные теплообменники системы аварийного расхолаживания с отводом теплоносителя в напорную камеру. Дополнительно в верхней камере модернизированной модели устанавливаются имитаторы фильтров-ловушек, имитаторы ИК контроля энергетического уровня и подкритического состояния, устройство для перекрывания (открытие, закрытие) отверстий отражателя над верхней плитой напорной камеры. Энерговыведение внутренних нагревателей имитаторов тепловыделяющих сборок увеличивается на ~ 30% при сохранении габаритных размеров имитаторов ТВС за счет увеличения длины нагревателей.

Система измерений и обработки данных разрабатывается на основе использования современных измерительных, вычислительных, коммутационных систем и исполнительных устройств. Автоматизированная система управления теплогидравлическими исследованиями, система КИП должны обеспечивать контроль и измерения параметров модели (температур, скоростей, давлений, расходов, мощностей и т.д.), сбор и оперативную обработку измерительной информации, вывод выбранных параметров (включая графическую информацию) на экран мониторов, передачу информации для дальнейшей обработки, формирование электрических управляющих воздействий на исполнительные устройства, включая подсистемы защиты. Количество измеряемых каналов ~ 400 шт. Гидравлическая принципиальная схема модели САРХ соответствует трехконтурной системе передачи тепла с АТО в первом контуре. Система аварийного отвода тепла от остановленного реактора выполнена также трехконтурной.

Общий вид верхней области модели САРХ, а также некоторых элементов ее оборудования показаны на рис. 1, 2. Компоновка активной зоны экспериментальной модели представлена на рис. 3. Имитаторы ТВС, сборок временного хранилища (ВР) и боковой защиты по высоте выполнены в масштабе 1:5, в поперечном направлении – 1:3, представляют собой шестигранники с размером «по ключ» 20 мм. Ими-

таторы сборок, содержащие электронагреватели, запитываются из полости напорной камеры, сборок защиты – из пространства над верхней плитой напорной камеры. Имитаторы сборок выполнены съемными, извлекаются вниз вместе с напорной камерой, что упрощает их модернизацию. Имитаторы ТВС имеют внутренний и наружный нагреватели с размерами по высоте 230 и 90 мм соответственно. Имитатор сборки ВР по устройству аналогичен имитатору ТВС и отличается от него отсутствием внутреннего нагревателя.

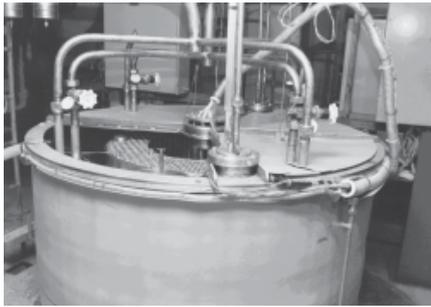


Рис. 1. Общий вид верхней области модели SARX

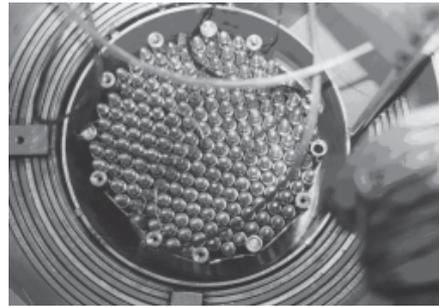


Рис. 2. Вид сверху на имитаторы АЗ модели SARX

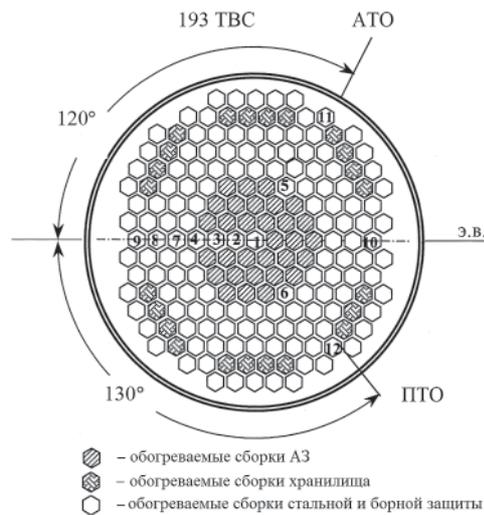


Рис. 3. Компоновка активной зоны

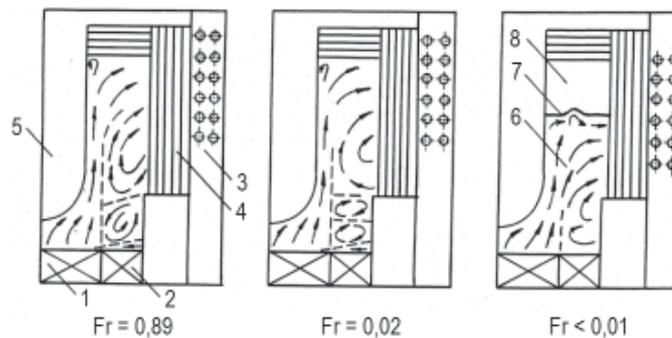


Рис. 4. Характер движения теплоносителя в верхней камере в зависимости от числа Фруда:
 1 – активная зона; 2 – боковые экраны; 3 – ПТО; 4 – стержни защиты; 5 – центральная колонна;
 6 – холодный теплоноситель; 7 – стратифицированная граница раздела; 8 – горячий теплоноситель

Теплообменники ПТО и АТО аналогичны по устройству. Задавая расчетные значения расхода (в режиме расхолаживания с использованием четырех АТО РУ БН-1200) через четыре теплообменника ПТО модели САРХ, можно моделировать расхолаживание с подачей теплоносителя в напорную камеру (клапан ЕЦ модели САРХ при этом открыт). Полученные результаты измерений консервативны по сравнению с реальной установкой.

Кратко рассмотрим некоторые результаты исследований полей температуры и структуры движения теплоносителя в неизотермическом потоке. На рисунке 4 показана характерная картина течения теплоносителя в верхней камере в зависимости от числа Фруда. В устойчиво стратифицированной зоне над боковыми экранами в зависимости от масштаба плавучести $L_{\text{п}}$, который уменьшается с уменьшением числа Фруда, формируются одна или несколько рециркуляционных образований с большими градиентами и пульсациями температуры на границах раздела. При срабатывании быстрой аварийной защиты с резким уменьшением энерговыделения реализуется предельный случай расслоения теплоносителя с полным подавлением конвективного переноса на тонкой стратифицированной границе раздела (в данном случае $L_{\text{п}} < L_{\text{к}}$), охватывающей все сечение верхней камеры. На поверхности раздела между верхним горячим и нижним холодным теплоносителем возникают внутренние волны, которые вызывают пульсации температуры в материале реакторного оборудования.

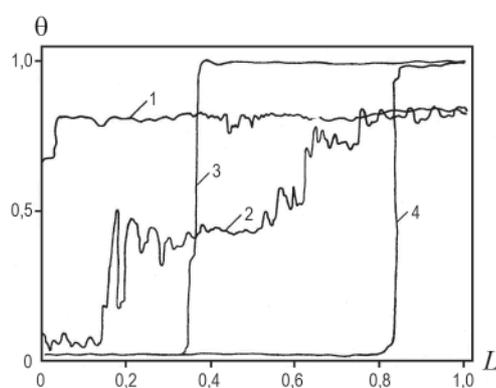


Рис. 5. Безразмерные профили температуры по высоте верхней камеры в номинальном режиме (1 – над активной зоной, 2 – над боковыми экранами) и при срабатывании быстрой аварийной защиты (3 – $Но = 0,4$; 4 – $Но = 15$)

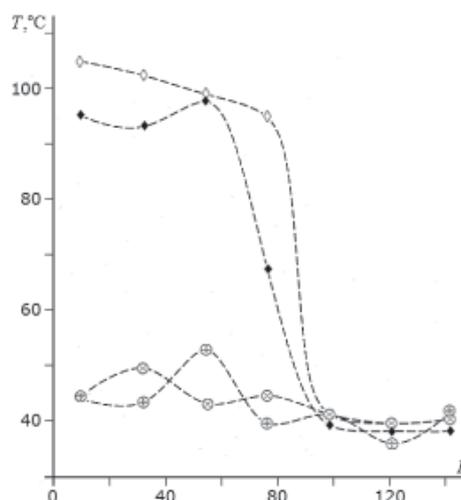


Рис.6. Распределение температуры по радиусу АЗ модели САРХ в режиме ПЦ: \otimes – $T_{\text{вх}}$ ТВЭЛ; \diamond – $T_{\text{вых}}$ ТВЭЛ; \oplus – $T_{\text{вх}}$ МПП; \blacktriangle – $T_{\text{вых}}$ МПП

Безразмерные профили температуры по высоте верхней камеры для различных режимов работы представлены на рис. 5. Число $Но = 1$ соответствует полному замещению объема верхней камеры теплоносителем. Распределение температур по радиусу активной зоны модели САРХ в номинальном режиме работы на входе и выходе внутри имитаторов сборок (ТВЭЛ) и межпакетного пространства (МПП) показано на рис. 6. Перепад температуры между выходом из активной зоны и боковыми экранами примерно соответствует подогреву теплоносителя в АЗ. Наблюдается увеличение температурной неоднородности по высоте верхней камеры при выводе установки на номинальный режим.

Как правило, трубопроводы соединяют элементы контура циркуляции с различ-

ной температурой. Перепад температуры (например, в трубопроводе от АТО к напорной камере РУ БН-1200) при числах $Fr < 2,0$ приведет к температурному расслоению в трубопроводе. Измерения полей температуры по высоте входа и выхода из ПТО, проведенные на реакторе БН-600, показали, что в номинальном режиме работы неоднородность температуры по высоте входа равна $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, по высоте выхода – $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В работе [4] приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований температурной стратификации теплоносителя в горизонтальном канале, в который сбоку подавалась холодная вода с заданным расходом. Горизонтальный канал соединялся с вертикальным каналом, в который сверху подавалась горячая вода с постоянным расходом. Были проанализированы термогидравлические характеристики потока, его устойчивость, рассмотрены условия возникновения температурного расслоения в режимах работы с перепадом температур по отдельным каналам. Для невысоких уровней расхода теплоносителя применялась математическая модель на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса для постоянной плотности при средней температуре. Влияние сил плавучести учитывалось на основе приближения Обербека-Буссинеска.

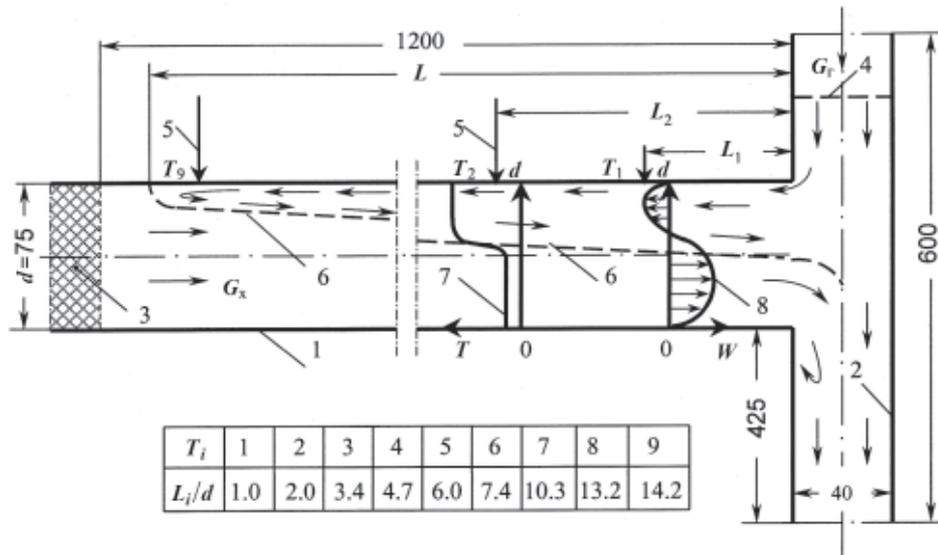


Рис. 7. Схема модели трубопровода и структура движения теплоносителя при $Fr < 2$: 1 – трубопровод; 2 – опускной канал; 3 – пористое тело; 4 – гидравлическая решетка; 5 – подвижные термомпары; 6 – поверхность раздела; 7 – профиль температуры; 8 – профиль скорости (эксперимент)

Численные исследования показали картину (рис. 7, 8) расслоения теплоносителя по температуре (или образования «теплового клина») в горизонтальном канале, соответствующую экспериментальным данным; длина «клина» хорошо согласуется с опытными данными.

Эксперимент показывает наличие характерных пульсаций температуры при пересечении подвижной микротермопарой тонкой стратифицированной границы раздела в трубопроводе. В расчетных исследованиях не удалось получить колебания температур во времени в точках на границе раздела. Прежде всего это связано с тем, что не учитывается зависимость плотности от температуры, т.е. не учитываются локальные градиенты температуры, имеющие наибольшее значение на температурной границе раздела теплоносителя.

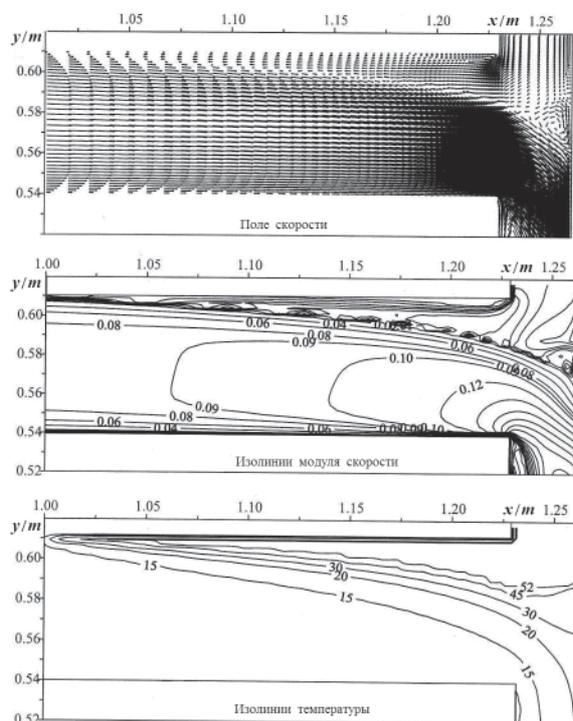


Рис. 8. Расслоение теплоносителя в трубопроводе (расчет)

ВЫВОДЫ

1. Модернизация модели САРХ позволяет исследовать температурное расслоение в элементах контура при принудительной циркуляции на различных уровнях мощности в обоснование проектных решений по аварийному расхолаживанию РУ БН-1200.

2. Наличие существенных пространственных неоднородностей температуры в элементах первого контура быстрого реактора (в верхней камере, в полостях слива теплоносителя из ПТО, в напорной камере, по объему элеваторной выгородки, по высоте охлаждения корпуса и т.д.) приводит к устойчивой температурной стратификации с формированием рециркуляционных и застойных образований в теплоносителе с большими градиентами и пульсациями температуры на границах раздела.

3. Детальное исследование стратификационных явлений, не предусмотренных проектной документацией, необходимо для обоснования безопасности, надежности управления РУ и проектного срока службы энергоблока до 60-ти лет.

4. Расчетно-экспериментальные исследования теплогидравлики неизотермического теплоносителя должны иметь комплексный характер, включая доработку и верификацию трехмерных расчетных программ, учитывающих особенности тепломассопереноса на стратифицированных поверхностях раздела.

5. Модернизированную модель САРХ следует использовать в создаваемой учебной научно-исследовательской лаборатории для подготовки научных и инженерных кадров, изучающих режимы работы быстрых реакторов с жидкометаллическими теплоносителями.

Литература

1. Specialists Meeting of IAEA «Evaluation of Decay Heat Removal by Natural Convection». – February 22–23, 1993. – Oarai Engineering Center. PNC, Japan. IAEA, IWGFR/88. – 1993.
2. Ушаков П.А., Сорокин А.П. Проблемы моделирования на воде аварийного остаточного тепловыделения естественной конвекцией в камерах быстрых реакторов / препринт ФЭИ–2585. – Обнинск, 1997.
3. Eguchi Y., Takeda H., Koga T., Tanaka N., Yamato K. Quantitative Prediction of Natural Circulation in an LMFR with a Similarity Low and Water Test // Nuclear Engineering and Design. – 1997. – V. 178 – P. 295–307.
4. Артемьев В.К., Опанасенко А.Н., Степанов А.В. Расчетно–экспериментальное исследование температурной стратификации теплоносителя в канале. / Труды IV Российской национальной конференции по теплообмену. 2006. – Т. 2. – С. 46–49.

Поступила в редакцию 01.11.2012

with the weight windows generated with the method of characteristics. Technique proposed implements CADIS (Consistent Adjoint Driven Importance Sampling) scheme and includes solving the adjoint multigroup problem with characteristics code MCG3D to generate the space-energy weight windows for the Monte-Carlo calculation. A general structure of the technique for use in design calculation is described. Presented numerical results confirm the high efficiency and accuracy of the proposed hybrid technique. The advantages of using the method of characteristics in the CADIS scheme are discussed.

УДК 519.6:621.039.5

Space-time calculation of transient processes in fast reactors \ Ginkin V.P., Troyanova N.M.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 8 pages, 7 illustrations. References, 4 titles.

Algorithms of 3-D neutron physics simulating for fast transient abnormal conditions in BN-type reactors core were developed in the GVA code. A quasi-static approximation is used for the solution of non-stationary equation of reactor physics. This approach divides the original equation onto the system of two equations: for calculating of the amplitude factor, which is quickly changed during the time and does not depend on spatial coordinates, and form-function, which depends on spatial coordinates and is slightly changed during the time. The results of test simulating in flow rate stop conditions and in self-movement of control rods conditions are demonstrated.

УДК 537.58:539.321.9

The physical phenomenon of emission of electrons in metals under the action of ultrasound \ Trofimov A.I.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 8 pages, 5 tables, 5 illustrations. References, 9 titles.

A theoretical and experimental study of a new physical phenomenon – the emission of electrons in metals under the influence of ultrasound. Shows the analogy mechanisms to increase the internal energy in metals by heating and effect of ultrasound. The substantiation of a possible rise in the emissivity of the emitter thermionic converters.

УДК 621.039.052

Numerical and experimental investigations of thermohydraulic characteristics for fast reactor vessels on integral model SARH in different operation regimes \ Zaryugin D.G., Kalyakin S.G., Leskin S.T., Opanasenko A.N., Sorokin A.P.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 9 pages, 8 illustrations. References, 4 titles.

Features of the stratified flows on examples of reactors on fast neutrons, possibility of their scale modelling are considered. Some results of experimental and numerical researches in mixing chambers and pipelines are presented. It is underlined necessity of the account of the stratification phenomena at a substantiation of reliability, safety, periods of operation for various nuclear power plants.

УДК 621.039.517

Simulation of loop test conditions for the modified SM reactor fuel rods and test results in justification of their performance \ Starkov V.A., Fedoseev V.E., Shishin V.Yu.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 9 pages, 1 table, 9 illustrations. References, 9 titles.

Irradiation conditions were simulated to test pilot modified fuel rods of the SM reactor under middle (10MW/m²) and maximal (up to 15MW/m²) thermal load. Some post-irradiation results are presented. A conclusion was made about the performance of the pilot SM fuel rods with the U content increased by 20%. A comparative analysis of both test conditions and material tests of the SM fuel rods was performed. The material tests results were used as a basis to propose and justify a phenomenological model of fuel rods swelling.

УДК 621.039.519

Tests of experimental low neutron poisoning fuel assemblies in reactor SM \ Klinov A.V., Kalinina N.K., Marikhin N.Yu., Pimenov V.V., Petelin A.L., Starkov V.A., Fedoseev V.E.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 9 pages, 6 tables, 6 illustrations. References, 12 titles.

The paper presents the heat rate distribution, thermal flux density and burnup for three experimental