

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБОСНОВАНИЕ ВСТРОЕННОЙ В БАК РЕАКТОРА СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ НАТРИЯ

**С.Г. Калякин, А.П. Сорокин, Ф.А. Козлов, В.В. Алексеев,
С.И. Щербаков**

ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского».

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



На основании требования повышения безопасности реакторов на быстрых нейтронах было принято решение о размещении всех систем с радиоактивным натрием, включая систему очистки натрия, в баке реактора. Ввиду отсутствия отечественного прототипа встроенной в бак реактора холодной ловушки потребовался большой объем работ в обоснование ее конструкции. Представлены результаты расчетных исследований с использованием кодов МАСКА и TURBOFLOW различных версий встроенной в бак реактора холодной ловушки с натриевым и аргоновым охлаждением реактора на быстрых нейтронах. Сделан вывод о предпочтении варианта ловушки с натриевым охлаждением, позволяющим получить более экономичное использование объема внутри ловушки. При этом обеспечивается наиболее равномерное распределение отложений на стенках по высоте ловушки и змеевика, что позволяет накапливать в ловушке 500 кг и более оксида натрия. Даны рекомендации по улучшению конструкции холодной ловушки для увеличения ее производительности и емкости по примесям. Полученные расчетные данные позволяют сделать вывод о том, что для улучшения охлаждения загрязненного натрия в холодной ловушке и снижения зависимости ее характеристик от величины накопленных отложений целесообразно выбирать диаметр змеевика на 20 – 30 см меньше внутреннего диаметра полости холодной ловушки.

Ключевые слова: натрий, холодная ловушка, температура, концентрация, водород, модель, распределение отложений, массоперенос, расчетный код.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития атомной энергетики с учетом необходимости повышения безопасности, экономичности и экологичности требования ко всем системам ядерного реактора повышаются. В этой связи по первому контуру принято решение о размещении всех систем с радиоактивным натрием в баке реактора. Поэтому габариты системы очистки первого контура ограничены. Следовательно, положительный опыт, полученный ранее, когда холодные ловушки (ХЛ) размещались вне бака реактора, не может быть использован в полной мере [1].

Из-за отсутствия отечественного прототипа встроенной в бак реактора ХЛ требуется большой объем расчетных, экспериментальных и конструкторских работ в обоснование ее конструкции. Были разработаны первые версии ловушек и получены соответствующие расчетные данные по массопереносу внутри ловушки с использованием различных кодов.

© С.Г. Калякин, А.П. Сорокин, Ф.А. Козлов, В.В. Алексеев, С.И. Щербаков, 2014

Усовершенствование встроенных в бак реактора холодных ловушек связано с выбором хладагента. Это может быть жидкометаллический теплоноситель (ЖМТ), теплофизически и коррозионно пригодный, имеющий твердое агрегатное состояние при комнатной температуре и плавление при температуре не выше 100 °С. Кроме того, этот хладагент не должен влиять на работу реактора при его случайном поступлении в натрий первого контура.

На основании результатов расчетов для различных версий промышленных ХЛ (с натриевым и аргоновым охлаждением) предложено уточнение технических решений с учетом мер по увеличению производительности и емкости холодных ловушек по примесям. Исходя из проведенного анализа сделан вывод о предпочтении варианта ловушки с натриевым охлаждением. Даны рекомендации по улучшению конструкции ХЛ с целью увеличения ее производительности и емкости по примесям.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сравнительный анализ систем холодной очистки показывает, что для ХЛ вне бака реактора необходимо иметь боксы для ловушек и обогреваемые трубопроводы для натрия. В то же время для встроенных ХЛ необходимо наличие шахт для хранения отработавших ловушек и системы их регенерации или перезарядки, а также обеспечение дублирования системы охлаждения. Предлагался также вариант комбинированной системы, которая включала бы одну крупногабаритную стационарную ХЛ и две заменяемые ХЛ ограниченной емкости.

Разработка встроенной в бак реактора ХЛ базируется на достигнутых ранее результатах исследований в этой области [2]. Была обоснована оригинальная конструкция отечественной ХЛ, характеристики которой по емкости превосходили характеристики лучших зарубежных образцов. Эта конструкция ловушки состоит из трех последовательно включенных зон: неизотермического отстойника, зоны окончательного охлаждения и изотермического фильтра. Рекомендуемое соотношение зон ХЛ по объему в процентах:

- объем фильтра ловушки – 32 – 28;
- зона окончательного охлаждения – 35 – 37;
- охлаждаемый отстойник – 33 – 35.

Эти соотношения применимы для ловушек, у которых L/D не более шести (L – высота внутренней полости ловушки, D – внутренний диаметр).

Результаты испытаний экспериментальных ловушек показывают, что емкость ловушек при накоплении в них только оксида натрия составляет 25 – 27 об.%, т.е. четвертая часть исходного объема чистой ловушки заполнена примесями. При накоплении в них как окиси натрия, так и продуктов взаимодействия натрия с водой (Na_2O , NaH , NaOH) их емкость ниже примерно в два раза.

Встроенная в бак реактора система очистки натрия должна

- обеспечивать требуемую чистоту теплоносителя в условиях длительной эксплуатации АЭС на номинальных параметрах; при этом учитываются источники примесей как в условиях работы установки на номинальных параметрах, так и при аварийном загрязнении теплоносителя;

- иметь необходимую емкость по примесям, которые поступают в теплоноситель первого контура с учетом всех режимов ее эксплуатации (включая аварийное загрязнение); допускается замена элементов системы очистки в течение ресурса установки, количество замен определяется техническим заданием на АЭС (желательно, чтобы число замен было минимальным);

- иметь производительность, гарантирующую очистку теплоносителя от примесей при ППР, перегрузках топлива, аварийных загрязнениях за время, заданное техническим

заданием на установку.

Наряду с очевидными преимуществами имеются следующие недостатки встроенной системы очистки (ВСО), которые не характерны для невстроенной системы очистки:

- низкая производительность ВСО из-за существенно ограниченного объема ХЛ и, как следствие, расхода натрия через нее, поэтому значительное увеличение времени очистки натрия до требуемого уровня его чистоты;

- необходимость многократной замены ХЛ для обеспечения работы установки из-за недостаточной емкости ВСО по примесям вследствие жестких ограничений на размеры и количество ХЛ;

- наличие сложной системы охлаждения и необходимость постоянного поддержания ловушки в режиме охлаждения; неработающая ХЛ должна поддерживаться при температуре 120 – 150°C, так как длительное пребывание отсеченной ХЛ при температуре окружающего ее натрия ($t_{\text{Na}} \geq 410^\circ\text{C}$) приведет к усиленной коррозии элементов внутри ХЛ;

- возможность выхода загрязненного примесями натрия в бак реактора из перегретой ХЛ, образования газообразного водорода и выхода его в бак реактора. Зависимость равновесного давления водорода над натрием от температуры, рассчитанная нами по закону Сиверса при концентрациях водорода в натрии, равных концентрации насыщения, показана на рис. 1.

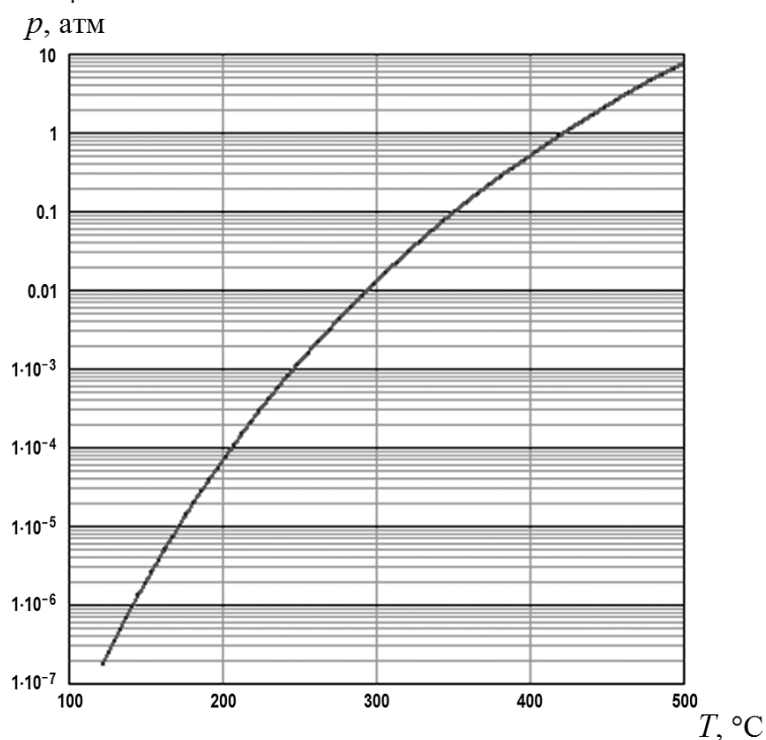


Рис. 1. Зависимость равновесного давления водорода над натрием от температуры

Для размещения в баке реактора должна быть научно обоснована и разработана по существу новая конструкция ХЛ.

Надежных методов расчета массопереноса и осаждения примесей внутри ловушек в связи со сложностью протекающих процессов до настоящего времени нет. Это обстоятельство не позволяло спроектировать оптимальную холодную ловушку заданной производительности без предварительных экспериментальных исследований на моделях, соизмеримых по размерам с создаваемым образцом. Решение указанной проблемы осуществляется с использованием многомерного математического моделирования процес-

сов внутри ловушки.

Емкость ХЛ определяется двумя основными факторами: физико-химическими характеристиками системы натрий-примеси, образующейся в ХЛ, и тем, насколько равномерно накопленная примесь будет распределена в объеме ХЛ.

Известно, что лучшие образцы отечественных ХЛ имеют емкость по кислороду 25 – 27 % по объему [2].

Имеет место неравномерное заполнение зон ХЛ окисью. Существует принципиальная возможность увеличения емкости ХЛ в полтора – два раза. Анализ литературы показывает, что емкость ловушек может быть еще выше. Задача исследований характеристик холодных ловушек состоит в оптимизации их конструкции с целью достижения максимальных экономических и технологических показателей.

Для увеличения емкости трехзонной ХЛ необходимо равномерное распределение отложений в ловушке. Это в настоящее время является основным критерием, по которому проводится математическое моделирование накопления примесей внутри ловушки. Расчеты с использованием кода TURBOFLOW применительно к холодной ловушке с натриевым охлаждением показали, что при включении охлаждения через змеевик циркуляционное движение натрия в ловушке замедляется. При этом в верхней части ловушки увеличивается скорость осаждения, в нижней части – осаждение снижается. Таким образом, змеевик можно использовать для регулирования профиля осаждения примеси на стенках ловушки.

Сравнительные расчеты гидродинамики натрия и тепломассопереноса для двух версий ловушки с использованием кодов МАСКА и TURBOFLOW подтвердили возможность оптимизации параметров холодных ловушек с использованием математического моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРВЫХ ВЕРСИЙ ВСТРОЕННОЙ В БАК РЕАКТОРА ХОЛОДНОЙ ЛОВУШКИ

Первый вариант встроенной в бак реактора ХЛ с аргоновым охлаждением имел длину более 15 м, ее геометрические параметры были далеки от оптимальных.

Второй вариант этой ловушки под давлением 1,5 МПа разработан позже. Высота ловушки уменьшена, ее геометрические параметры были несколько оптимизированы. Расчетная вместимость по примесям – 350 кг, объем рабочей полости 1,75 м³.

Кроме того, был разработан первый вариант встроенной в бак реактора ХЛ с натриевым охлаждением. Ловушка имеет такие же габаритные размеры, как оптимизированная ловушка с аргоновым охлаждением, но объем ее рабочей полости (РП) может быть существенно больше. Дополнительно внутри нее установлен змеевик. Охлаждающий натрий циркулирует по двум трактам охлаждения: снаружи корпуса РП в рубашке и по расположенному внутри РП змеевику. Сопоставление характеристик холодных ловушек с аргоновым и натриевым охлаждением приводится в [3].

Преимущества использования натрия для охлаждения холодных ловушек заключаются в следующем:

- эксплуатация натриевых контуров для охлаждения различных устройств осуществляется с высокой надежностью в течение длительного периода времени (десяtkи лет);
- попадание охлаждающего натрия в натрий первого контура не вызывает отрицательных эффектов;
- натриевое охлаждение позволяет получить более экономичное использование объема внутри ловушки;
- персонал АЭС имеет опыт по обращению с натриевым теплоносителем.

Всего в баке реактора планируется разместить три встроенные ловушки.

Как показали оценки, за весь срок эксплуатации перспективного быстрого реактора в холодные ловушки поступает около 8000 кг примесей. Объем рабочей полости ХЛ

составляет $1,75 \text{ м}^3$. Расчетная вместимость ХЛ по примесям принята 20 %, что составляет 350 кг. Количество ХЛ в этом случае составляет $8000/350 = 23$ шт. Учитывая, что на баке реактора установлено три ХЛ, потребуется 20 замен в течение всего срока эксплуатации реактора.

Снижению числа замен ловушек первого контура может также способствовать эксплуатация системы очистки натрия в режиме, снижающем накопление водорода в холодных ловушках первого контура. Для этого потребуется обеспечить суммарный расход натрия $11,5 \text{ кг/с}$ через все холодные ловушки второго контура. Для оценки экономии замен холодных ловушек в первом контуре за 60 лет определялось количество гидрида натрия, которое могло быть в них удержано. При источнике водорода в первом контуре $6,23 \cdot 10^{-8} \text{ кг/с}$ количество гидрида натрия составляет 2830 кг за 60 лет. За счет поступления водорода из второго контура через стенки промежуточного теплообменника может быть накоплено еще около 1750 кг гидрида натрия (с учетом оценок для БН-600). Всего, без учета исходных загрязнений и от внешних источников при перегрузках, может быть накоплено около 4580 кг гидрида натрия. Количество сэкономленных замен ХЛ в первом контуре в случае переноса этого водорода во второй контур равно 13. Поскольку при работе системы очистки по обычной схеме требуется 20 замен в течение всего срока эксплуатации реактора, то при исключении попадания водорода в ХЛ первого контура потребуется всего семь замен.

Для снижения числа замен встроенных в бак реактора холодных ловушек первого контура в процессе эксплуатации реактора и снижения времени очистки натрия после ППР, перегрузки топлива и от аварийных загрязнений необходимо увеличить полезный объем ловушки, а следовательно, и расход через нее и вместимость по примесям.

При одновременной работе трех ловушек для очистки натрия после ППР, перегрузки топлива и от аварийных загрязнений потребуется не менее 1600 ч (67 сут). При этом время очистки натрия от кислорода до концентрации 10 млн^{-1} (когда, продолжая очистку натрия, можно выходить на номинальные параметры реактора) составляет около 500 ч.

РАСЧЕТ МАССОПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В ХЛ С НАТРИЕВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ КОДА TURBOFLOW

Вопросы оптимизации включали в себя создание численного алгоритма и структуры расчетного кода. В результате расчетов были получены поля скорости, температуры, концентраций растворенной примеси и твердых частиц в натрии, циркулирующем в холодной ловушке, а также распределение потока примесей на стенки по длине ловушки.

Проведены расчетные исследования теплогидравлики и массопереноса для вариантов конструкции охлаждаемой части ХЛ с натриевым охлаждением с использованием кода TURBOFLOW[4]. Рассмотренные варианты конструкции отличаются увеличенной длиной рабочей полости ХЛ на 0,5 и 1 м, увеличенным ее диаметром на 0,1 м и различным расположением конца входной трубы и ее диаметра в полости ХЛ. Были увеличены диаметр трубы и число витков змеевика. Схема внутренней полости ХЛ показана на рис. 2.

Температура внутри змеевика задавалась переменной по высоте ХЛ – от 120°C в верхней части и до 140°C – в нижней. Коэффициент теплопередачи через стенку змеевика – $3300 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Расчеты были выполнены для чистой ХЛ и ХЛ с загрязнением поверхности корпуса и змеевика слоем примесей толщиной 2,3 см с коэффициентом теплопроводности $40 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$. Для всех вариантов расчета температура на входе в ХЛ $T_{\text{вх}} = 250^\circ\text{C}$, концентрация примеси на входе в ловушку соответствует температуре насыщения 183°C . Расход натрия в системе охлаждения больше в три раза, чем расход загрязненного натрия. Температура охлаждающего натрия на входе 120°C . Соотношение расхода охлаждающего натрия в рубашке охлаждения и змеевике принято 30 и 70 %.

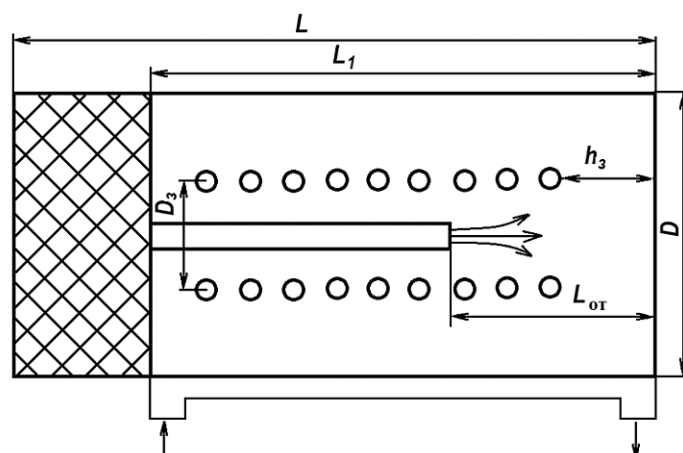


Рис. 2. Схема внутренней полости холодной ловушки с натриевым охлаждением

Для чистой ХЛ изучалось влияние диаметра змеевика на характеристики переноса. Длина внутренней полости ХЛ 2,75 м (на 0,5 м больше проектной), диаметр – 0,76 м, скорость на срезе входной трубы – 1,8 м/с, расход – 1,1 л/с, расстояние от конца трубы до дна – 0,95 м. Получены распределения скорости отложения примеси на стенке по длине ловушки, а также относительные концентрации примеси на выходе из ловушки для каждого из рассматриваемых вариантов. Результаты расчетов приведены на рис. 3 и в табл.1

Змеевик, расположенный близко к стенке, не меняет характер течения, но увеличивает интенсивность охлаждения и скорость циркуляционного течения. Змеевик, расположенный близко к центру ХЛ, тормозит циркуляционное течение. В результате меняется распределение скорости осаждения примеси на стенке ХЛ. Наибольшее охлаждение и снижение концентрации примеси на выходе ХЛ достигается при расположении змеевика ближе к стенке – в этом случае поверхность змеевика максимальна.

Отложения примеси на стенке ХЛ и змеевике толщиной 2,3 см не приводят к существенному ухудшению охлаждения загрязненного натрия. Для змеевика отложения способствуют увеличению его поверхности, и доля тепла, отводимая через змеевик, увеличивается. Отложения на змеевике в некоторых случаях даже приводят к улучшению охлаждения за счет изменения характера течения. Расположение змеевика ближе к стенке имеет небольшое преимущество с точки зрения максимального охлаждения и равномерности отложений. В этом случае также выше отложения на днище ловушки.

Все рассмотренные варианты отличались отсутствием в нижней части ловушки застойной области из-за выбора большой скорости на выходе из трубы и низкого ее расположения.

Полученные расчетные данные позволяют сделать вывод о том, что для улучшения охлаждения загрязненного натрия в ХЛ и снижения зависимости характеристик ХЛ от величины накопленных отложений целесообразно диаметр змеевика выбирать на 20 – 30 см меньше внутреннего диаметра полости ХЛ.

Для обеспечения эффективного осаждения примеси на дне ХЛ высота отстойника (ниже среза входной трубы) должна выбираться из условия проникновения струи до дна ХЛ при заданном расходе. При этом скорость струи не должна превышать 1,8 м/с. Для скорости 1,8 м/с высота отстойника составляет 1,45 м, а для 0,9 м/с – 0,9 м.

Определены значения параметров холодной ловушки с натриевым охлаждением, которые соответствуют схеме, представленной на рис. 3. Диаметр внутренней полости ловушки $D = 0,86$ м, длина внутренней полости ловушки без фильтра $L_1 = 3,25$ м. При этом объем рабочей полости ловушки до фильтра составляет около $1,8 \text{ м}^3$. Расход очи-

щаемого натрия через ловушку примерно 1,5 кг/с. Нижняя часть змеевика расположена на расстоянии примерно 0,45 – 0,5 м от дна ловушки. Температура очищаемого натрия на входе и выходе из ловушки составляет $T_{\text{вх}} = 250^\circ\text{C}$ и $T_{\text{вых}} = 150^\circ\text{C}$.

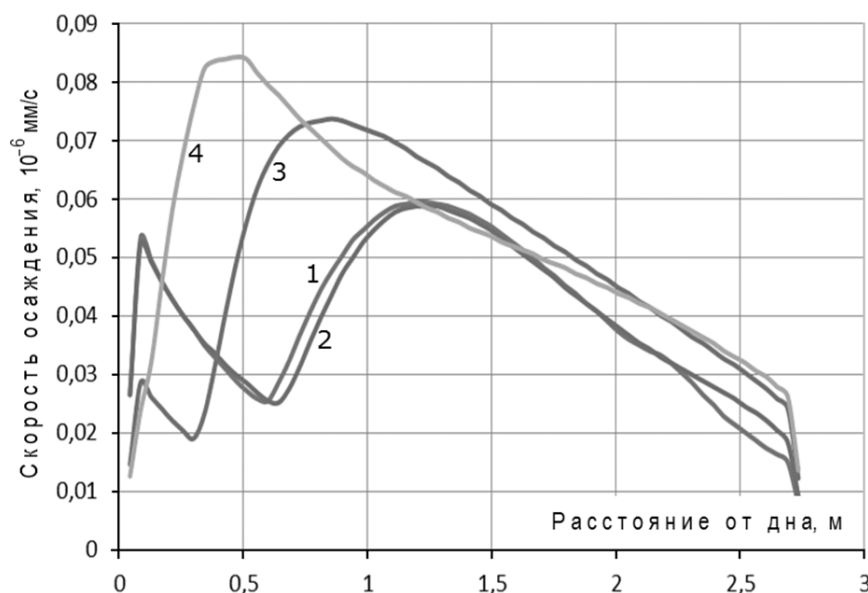


Рис. 3. Распределение скорости отложения примеси на стенке по длине ловушки для четырех вариантов расположения змеевика в полости ХЛ. Номера вариантов указаны цифрами

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета к рис. 3

Вариант	Диаметр змеевика, м	$T_{\text{вых Na}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{вых охл}}, ^\circ\text{C}$	$C_{\text{вых}}/C_{\text{вх}}$	$C_{\text{вых нас}}/C_{\text{вх}}$
1	0,56	149	134	0,583	0,02
2	0,40	152	136	0,610	0,02
3	0,32	153	136,5	0,624	0,012
4	0,28	150	136	0,625	0,01

Для варианта ловушки с натриевым охлаждением необходимо оптимизировать систему охлаждения с целью ее упрощения и удешевления. Эта цель может быть достигнута, если отказаться от сливного и дыхательного баков, системы очистки и некоторых других элементов контура. Ввиду относительно низкой температуры контура поступление примесей в охлаждающий натрий будет незначительным, что позволяет упростить системы контроля и очистки его от примесей. Уровень требований к помещениям, размещению натриевого оборудования и некоторым вспомогательным системам должен быть скорректирован. В итоге потребуются создание малоинерционной замкнутой системы циркуляции натриевого хладагента, герметичной и работоспособной в течение заданного срока эксплуатации.

В этом случае может быть сделан вывод о предпочтении варианта ловушки с натриевым охлаждением. Как показывает расчет, для указанного варианта обеспечивается наиболее равномерное распределение отложений на стенках по высоте ловушки и змеевике. Это позволит накапливать в ловушке 500 кг и более оксида натрия.

Литература

1. Козлов Ф.А., Алексеев В.В., Ковалев Ю.П., Кумаев В.Я., Матюхин В.В., Орлова Е.А., Пирогов Э.П., Сорокин А.П., Щербаков С.И. Исследования в обоснование системы очистки натрия для перспективных быстрых реакторов. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112. – Вып. 1. – С. 18-24.
2. Козлов Ф.А., Волчков Л.Г., Кузнецов Э.К., Матюхин В.В. Жидкометаллические теплоносители ЯЭУ. Очистка от примесей и их контроль. / Под ред. д.т.н. Ф.А. Козлова. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Алексеев В.В., Ковалев Ю.П., Калякин С.Г. и др. Системы очистки натриевого теплоносителя АЭС с реактором БН-1200 // Теплоэнергетика. – 2013. – №5. – С. 1–12.
4. Scherbakov S.I. Numerical simulation of nonsteady-state multifase flow. The 2D TURBO-FLOW computer code used to perform express analysis of designs / NURETH-11. – Paper 238. – Avignon, France. – October 2-6, 2005.

Поступила в редакцию 18.11.2013 г.

Авторы

Калякин Сергей Георгиевич, первый заместитель генерального директора по науке – директор Института ядерных реакторов и теплофизики (ИЯРТ), доктор техн. наук
E-mail: kalyakin@ippe.ru

Сорокин Александр Павлович, заместитель директора ИЯРТ, доктор техн. наук
E-mail: sorokin@ippe.ru

Козлов Федор Алексеевич, советник директора ИЯРТ, доктор техн. наук, профессор
E-mail: kozlov@ippe.ru

Алексеев Виктор Васильевич, заместитель начальника отдела, доктор техн. наук
E-mail: alexeev@ippe.ru

Щербаков Сергей Иванович, старший научный сотрудник
E-mail: scher@ippe.ru

УДК 621.039.534

STUDIES VALIDATING A SODIUM PURIFICATION SYSTEM INTEGRATED IN THE REACTOR VESSEL

Kalyakin S.G., Sorokin A.P., Kozlov F.A., Alekseev V.V., Scherbakov S.I.

State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering n.a. A.I. Leypunsky. 1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

Considering that safety of fast neutron reactors must be improved, the requirements for the equipment of a nuclear power facility have been raised. Specifically, it has been decided that all systems with radioactive sodium, including the sodium purification system, be placed inside the reactor vessel. Since no prototype of the cold trap integrated in the reactor vessel is available in Russia, a considerable number of studies validating its design were required. The paper presents the calculation results obtained using the MASKA and TURBOFLOW codes for different versions of argon and sodium-cooled cold traps integrated in the fast neutron reactor vessel. Based on the above analysis, the conclusion is made that the sodium-cooled trap is preferable because it allows gaining a more rational use of the space inside the trap. Thus, the most uniform distribution of depositions on the walls along the height of the trap and in the serpentine is achieved, which allows accumulating more than 500 kg of sodium oxide in the trap. Recommendations on improving the design of the cold trap in order to increase its productivity and capacity are given for different impurities. The numerical results obtained suggest that in order to achieve improved cooling of low-purity sodium in the cold trap and to decrease the dependence of its characteristics on the quantity of the depositions accumulated the serpentine diameter should be 20–30 cm less than the inner diameter of the cold trap cavity.

Key words: sodium, cold trap, temperature, concentration, hydrogen, model, distribution of deposition, mass transfer, computer code

REFERENCES

1. Kozlov F.A., Alekseev V.V., Kovalev Yu.P., Kumaev V.Ya., Matyukhin V.V., Orlova E.A., Pirogov E.P., Sorokin A.P., Scherbakov S.I. Issledovaniya v obosnovanie sistemy ochistki natriya dlya perspektivnykh bystrykh reaktorov [Researches in substantiation of sodium purification system for perspective fast reactors]. *Atomnaya Energiya*, 2012, v. 112, no. 1, pp. 18–24.
2. Kozlov F.A., Volchkov L.G., Kuznetsov E.K., Matyukhin V.V. *Gidkometalicheskie teplonositeli YaEU. Ochistka ot primesej i ikh kontrol'*. [Liquid metal coolants of NPP. Clearing from impurity and their control]. Under the editorship of Dr. Sci. Tech. Kozlova F.A. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1983. (in Russian).
3. Alekseev V.V., Kovalev Yu.P., Kalyakin S.G., Kozlov F.A., Kumaev V.Ya., Kondrat'ev A.S., Matyukhin V.V., Pirogov E.P., Sergeev G.P., Sorokin A.P., Torbenkova I.Yu. Sistemy ochistki natrievogo teplonositelya AES reaktorom BN-1200 [Purification systems of the sodium coolant for NPP with BN-1200 reactor]. *Teploenergetika*, 2013, no. 5, pp. 1–12.
4. Scherbakov S.I. Numerical simulation of nonsteady-state multiphase flow. The 2D TURBO-FLOW computer code used to perform express analysis of designs. *Proc. 11-th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics NURETH-11, Paper 238*. Avignon, France, October 2–6, 2005.

Authors

Kalyakin Sergey Georgievich, First Deputy Director General, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: kalyakin@ippe.ru

Sorokin Alexandr Pavlovich, Deputy Director, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: sorokin@ippe.ru

Kozlov Fyodor Alekseevich, Adviser of Director, Dr. Sci. (Engineering), Professor

E-mail: kozlov@ippe.ru

Alekseev Victor Vasil'evich, Deputy Head of Department, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: alexeev@ippe.ru

Scherbakov Sergej Ivanovich, Senior Researcher of IN RTP

E-mail: scher@ippe.ru