

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ХОЛОДНЫХ ФИЛЬТР-ЛОВУШЕК ДЛЯ ОЧИСТКИ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РЕАКТОРАХ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

**В.В. Алексеев, Ю.А. Кузина, А.П. Сорокин**

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»*

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



Представлены результаты исследований особенностей тепло- и массообмена в холодных ловушках для очистки натрия от примесей в контурах быстрых реакторов как на специальных экспериментальных участках, моделирующих различные зоны ловушки (изотермический и неизотермический отстойники и фильтры, зона окончательного охлаждения), так и на моделях прототипов ловушек. В результате создано научное обоснование для разработки ловушек оригинальной конструкции для различных реакторов. Их емкость по примесям в три – пять раз превышает лучшие зарубежные аналоги. Испытания показали их высокую эффективность при очистке натрия от кислорода и водорода и существенно меньшую от продуктов коррозии и углерода. Учитывая течи радиоактивного натрия при эксплуатации ловушек первого контура реактора БН-600, для повышения безопасности быстрого реактора большой мощности принято решение о размещении системы очистки в баке реактора. Решен вопрос об исключении накопления водорода в ловушках первого контура в номинальном режиме. Обсуждаются две конструкции ловушки – с охлаждением аргоном и натрием. Показано, что при работе системы очистки реактора с охлаждением аргоном в течение срока эксплуатации реактора требуется 20 замен ловушек, при исключении попадания водорода в холодные ловушки первого контура – семь замен. Вариант встроенной в бак реактора ловушки с натриевым охлаждением имеет те же габаритные размеры, как и у ловушки с охлаждением аргоном. Охлаждающий натрий циркулирует по двум трактам: снаружи корпуса рабочей полости в рубашке – до 30% расхода и по расположенному внутри рабочей полости змеевику – до 70%. На основании расчетов по кодам, моделирующим тепло- и массообменные процессы в ловушках, предложены уточняющие технические решения.

**Ключевые слова:** быстрые реакторы, натриевый теплоноситель, холодная ловушка, бак реактора, эксперимент, расчетные коды, теплогидравлика, массообмен, примеси, кислород, водород, охлаждение аргоном, охлаждение натрием.

## ВВЕДЕНИЕ

Холодные ловушки являются основными устройствами очистки натрия в контурах быстрых реакторов. Работы в этой области начались с момента создания первых реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Были исследованы особенности процессов гидродинамики тепло- и массообмена в ловушках. Исследования проводились как на специальных экспериментальных участках, моделирующих различные зоны холодной ловушки, так и на моделях прототипов ловушек, расположенных вне бака реактора, которые проектировались в ФЗИ и ОКБМ. В основном, использовался эмпирический подход, который позволил достичь хороших результатов.

Была разработана и обоснована оригинальная конструкция отечественной холодной ловушки, которая превосходила по характеристикам лучшие зарубежные образцы [1, 2]. Эта конструкция ловушки состоит из трех последовательно включенных зон: неизотермического отстойника, зоны окончательного охлаждения и изотермического фильтра (рис. 1).

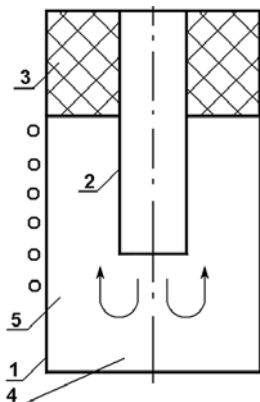


Рис. 1. Схема холодной ловушки: 1 – корпус ловушки; 2 – подводящий канал; 3 – фильтр; 4 – отстойник; 5 – зона охлаждения

Учитывая, что при эксплуатации холодных ловушек первого контура реактора БН-600 имели место течи радиоактивного натрия, в настоящее время при разработке реактора на быстрых нейтронах большой мощности с натриевым теплоносителем с целью повышения безопасности реактора принято решение о размещении системы очистки в баке реактора [3, 4]. Основным ее элементом являются встроенные в бак реактора холодные ловушки.

Сравнение различных систем холодной очистки показывает, что для холодных ловушек вне бака реактора необходимо иметь боксы для ловушек и обогреваемые трубопроводы для натрия, в то же время для встроенных в бак реактора холодных ловушек предполагается наличие шахт для хранения отработавших ловушек, системы перезарядки ловушек. Предложен также вариант комбинированной системы очистки, которая содержит одну крупногабаритную стационарную ловушку вне бака реактора и две заменяемые ловушки ограниченной емкости внутри корпуса реактора.

Разработка встроенной в бак реактора ловушки базируется на достигнутых ранее результатах исследований в области технологии натриевого теплоносителя. Поставлена задача усовершенствования ловушек с точки зрения как безопасности, так и экономичности и экологичности. Разработаны первые версии таких ловушек [5 – 8]. Для первого рассмотрения в качестве теплоносителя для охлаждения ловушек выбран аргон. Предлагаются также как альтернативные теплоносители натрий и эвтектический натрий-калиевый сплав. При этом используются разработанные в последнее время

методы и коды для численного моделирования сложных процессов пространственного массопереноса и осаждения примесей внутри ловушек [9 – 12].

### ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

Конструктивные решения холодных ловушек реакторов БР-10, БН-350 и БН-600 представлены на рис. 2, 3 [1, 2]. Следует отметить, что для охлаждения холодных ловушек используются различные теплоносители.

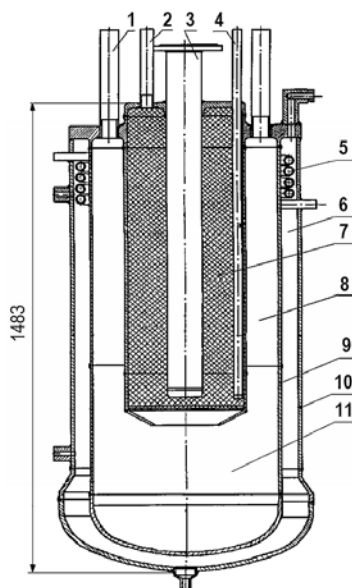


Рис. 2. Схема холодной ловушки примесей Na БР-10: 1 – входной патрубок Na; 2 – выходной патрубок Na; 3 – полость нагревателя; 4 – карман термопары; 5 – змеевик водяного охлаждения; 6 – полость толуола; 7 – фильтр; 8 – канал охлаждения натрия; 9 – внутренний корпус ловушки; 10 – наружный корпус ловушки; 11 – отстойник

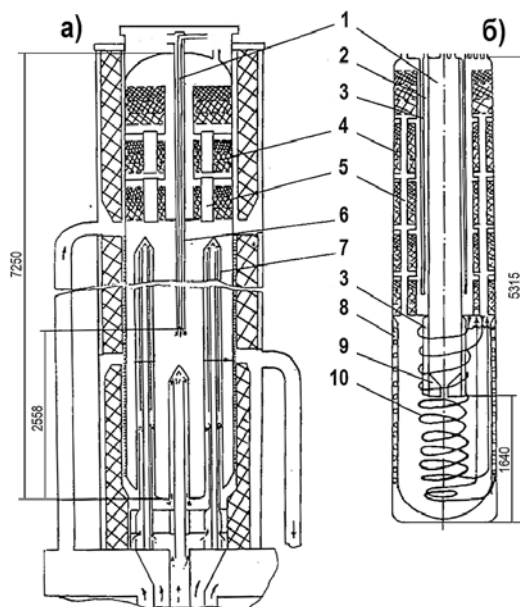


Рис. 3. Схемы холодных ловушек примесей натрия реакторов БН-600 (а) и БН-350 (б): 1 – центральная труба; 2 – внешний канал рекуператора; 3 – воздушный зазор; 4 – фильтр; 5 – проточные трубки; 6 – аксиальная труба; 7 – трубки воздушного охлаждения; 8 – кожух охлаждения; 9 – конус; 10 – змеевик

Исследования холодных ловушек были направлены на получение информации о процессах гидродинамики и тепло- и массообмена, распределения примесей в ловушках, а также на изучение их характеристик. Поэтому контролировались режимные параметры. Оперативная информация о распределении примесей в ловушке была получена с использованием специально разработанного для этой цели метода просвечивания ловушки  $\gamma$ -излучением цезия-137 при стационарном режиме ее работы в контуре, а после окончания испытаний – анализом частей ловушки, на которые она разрезалась, и локальных проб, отобранных из ловушки после ее разрезки. Не считая большого количества экспериментальных участков было испытано шесть ловушек различного типа: по три с нисходящим и восходящим движением натрия в зоне охлаждения. Ловушки охлаждались сплавом натрий-калий (прототипы ловушек БН-350) и воздухом (прототипы ловушек БН-600). Натрий загрязнялся подачей в контур кислорода, водорода или воды.

На основании проведенных в ФЭИ экспериментов [1] в 1963 г. были выданы рекомендации по конструированию холодных ловушек: основное охлаждение перенесено в неизотермический отстойник (первая зона), над ним последовательно располагаются зона окончательного охлаждения (вторая зона) и изотермический фильтр (третья зона). Разработана методика расчета ловушек этого типа и рассмотрены основные вопросы их конструирования. Постоянные, необходимые для расчета и конструирования ХЛ, определены из результатов опытов.

Было показано, что коэффициент удержания оксида и гидрида натрия (продуктов взаимодействия натрия с водой) близок к единице при времени пребывания натрия в ловушке в течение 15 – 20 мин. Минимальная концентрация кислорода и водорода в натрии после очистки его ловушками разных типов была равна их растворимости при температуре на выходе из ловушки. При температуре 120 – 150°C имеем соответственно 3 – 5 млн<sup>-1</sup> и 0,02 – 0,05 млн<sup>-1</sup>.

При определении объема холодной ловушки  $V_L$  и ее зон учитывался целый ряд факторов: вес теплоносителя в установке, интенсивность источников примесей, время очистки теплоносителя в установке, ресурс работы ловушки, требуемая (номинальная) концентрация примесей в теплоносителе. Исходя из того, что время пребывания теплоносителя  $\tau_L$  в ловушке при расходе  $Q_L$  должно быть не менее 10 – 15 мин,  $V_L = \tau_L Q_L$ , трехзонные ловушки должны обеспечивать коэффициент удержания примесей  $\beta$  не меньше 0,6 при чистой ловушке. По мере накопления примесей он будет стремиться к единице.

Расход теплоносителя  $Q_L$  через холодную ловушку определялся из условия максимально допустимой концентрации примесей  $C_{max}$  при известной интенсивности их источников  $G_{пр}$  в установке:

$$Q_L = G_{пр} / [(C_{max} - C_t^n)\beta],$$

где  $C_t^n$  – концентрация примесей на выходе из ловушки при температуре  $t$ . Зная  $Q_L$  и  $\tau_L$ , можно найти  $V_L$ .

Другой подход к определению объема ловушки базируется на количестве примесей, которое накапливает холодная ловушка либо за все время работы установки, либо за определенный заданный период времени. Результаты испытаний показали, что емкость ловушек при накоплении в них только оксида натрия составляет 25 – 27% об., четвертая часть исходного объема ловушки заполнена примесями. При накоплении в них окиси натрия и продуктов взаимодействия натрия с водой ( $Na_2O$ ,  $NaN$ ,  $NaOH$ ) их емкость становится ниже примерно в два раза. Учитывая отсутствие строгих методов моделирования, при проектировании холодных ловушек для БОР-60 и БН-350 было принято, что при выполнении рекомендаций их емкость по примесям будет равна 10% об. При резком возрастании расхода (в два – четыре раза)

наблюдается вынос частиц с теплоносителем в циркуляционный контур.

Для охлаждения холодных ловушек использовали толуол, даутерм, тетралин, сплав натрий-калий, воду, воздух, азот и др. Использование воды для охлаждения усложняет конструкцию ловушки и вызывает трудности при эксплуатации. В целях безопасной эксплуатации теплопередающая стенка должна быть выполнена двухслойной с промежуточной прослойкой из свинца.

Следует отметить, что при использовании газового охлаждения необходимо учитывать особые требования к месту выброса воздуха с учетом возможности аварийной течи металла в ловушке и предусмотреть дополнительные площади для размещения системы охлаждения (воздуховоды, вентиляторы и т.п.). Необходима сигнализация о течи теплоносителя в газовую систему и одновременное отключение холодной ловушки и газовой системы с помощью клапанов.

Холодные ловушки вторых, как и первых контуров, работают без замены, но на каждой из них из-за возрастания гидросопротивления или сложности обеспечения эксплуатации проводится регенерация. На основании термодинамического анализа предложены и обоснованы методы регенерации холодных ловушек, позволяющие восстанавливать их характеристики за счет перевода накопленных в ловушке примесей в каустическую фазу, температура которой не превышает 400 °С, и гидравлического удаления ее из холодной ловушки. Имеющийся опыт показывает, что регенерация ловушки может осуществляться не менее трех раз [13].

### **ВСТРОЕННАЯ В БАК РЕАКТОРА СИСТЕМА ОЧИСТКИ НАТРИЯ ОТ ПРИМЕСЕЙ**

**Особенности системы.** Встроенная в бак реактора система очистки натрия от примесей должна удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать требуемую чистоту теплоносителя в условиях длительной эксплуатации АЭС на номинальных параметрах;
- 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, при этом желательно, чтобы число замен было минимальным;
- иметь производительность, гарантирующую очистку теплоносителя от примесей при ППР, перегрузках топлива, аварийных загрязнениях за время, заданное техническим заданием.

Встроенная в бак реактора система очистки натрия имеет определенные недостатки:

- низкую производительность из-за существенно ограниченного расхода натрия через холодную ловушку (поэтому увеличивается время очистки натрия до требуемого уровня чистоты);
- необходимость многократной замены ловушек из-за недостаточной емкости встроенной системы очистки вследствие ограничений на размеры и количество ловушек;
- наличие сложной системы охлаждения и необходимость постоянного поддержания ловушки в режиме охлаждения (неработающая ловушка должна поддерживаться при 120 – 150 °С, так как длительное пребывание отсеченной ловушки при температуре окружающего ее натрия  $t_{\text{Na}} \geq 410$  °С приведет к усиленной коррозии элементов внутри ловушки);
- возможности выхода загрязненного примесями натрия в бак реактора из перегретой холодной ловушки, образования газообразного водорода и выхода его

в бак реактора.

Наиболее важным является изучение вопросов безопасности. Прежде всего расчетными оценками показано, что решается вопрос, связанный с накоплением водорода в холодных ловушках первого контура при работе на номинальных параметрах. За счет увеличения температуры на выходе из ловушки первого контура до 150°C при сохранении прежнего температурного режима холодной ловушки второго контура (температура на выходе из ловушки второго контура 120°C) и при суммарном расходе через холодные ловушки второго контура выше 44 м<sup>3</sup>/ч водород будет мигрировать в холодные ловушки второго контура.

**Встроенные в бак реактора холодные ловушки.** В настоящее время предложены две конструкции ловушки реактора большой мощности: с охлаждением аргонном и натрием [6 – 8].

Холодная ловушка с охлаждением аргонном. Первый вариант встроенной в бак реактора такой ловушки имел размер более 15 м, ее геометрические параметры были далеки от оптимальных. Для второго варианта, разработанного с охлаждением аргонном под давлением 1,5 МПа, высота ловушки была уменьшена, ее геометрические параметры несколько оптимизированы. Объем рабочей полости – 1,75 м<sup>3</sup> [6], расчетная вместимость по примесям – 350 кг.

Всего в баке реактора планируется разместить три встроенные холодные ловушки. Как показывают оценки, за 60 лет эксплуатации АЭС потребуется многократная замена ловушек. За весь срок эксплуатации перспективного быстрого реактора большой мощности в ловушки поступает около 8000 кг примесей. Объем рабочей полости холодной ловушки составляет 1,75 м<sup>3</sup>. Расчетная вместимость ловушки по примесям принята 20%, что составляет 350 кг. Количество ловушек в этом случае составляет 8000/350 = 23 шт. Учитывая, что на баке реактора установлено три ловушки, в течение всего срока эксплуатации реактора потребуется еще 20 штук (замен).

Снижению числа замен ловушек первого контура может способствовать эксплуатация системы очистки натрия в режиме, снижающем накопление водорода в этом контуре. Для минимизации числа замен ловушек в первом контуре потребуется обеспечить суммарный расход натрия 11,5 кг/с через все холодные ловушки второго контура. Для оценки экономии замен ловушек в первом контуре в течение 60-ти лет определено количество гидрида натрия, которое они могли бы удерживать. При источнике водорода в первом контуре 6,23·10<sup>-8</sup> кг/с количество гидрида натрия за 60 лет составит 2830 кг. За счет поступления водорода из второго контура через стенки промежуточного теплообменника должно накопиться еще около 1750 кг гидрида натрия. Таким образом, всего, даже без учета исходных загрязнений и загрязнений от внешних источников при перегрузках, может быть накоплено около 4580 кг гидрида натрия.

Количество сэкономленных замен холодных ловушек в случае накопления этого количества водорода во втором контуре составляет 13 штук. Поскольку при работе системы очистки по обычной схеме в течение всего срока эксплуатации реактора требуется 20 замен, то при исключении попадания водорода из второго контура в холодные ловушки первого контура потребуется всего лишь семь замен.

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<sup>-1</sup> (когда, продолжая очистку натрия, можно выходить на номинальные параметры реактора) составляет около 500 ч.

Для снижения числа замен встроенных в бак реактора ловушек первого контура



в процессе эксплуатации реактора и снижения времени очистки натрия после ППР, перегрузки топлива и от аварийных загрязнений необходимо увеличить как полезный объем ловушки, так и ее вместимость по примесям. При решении этой задачи выполнялись расчеты по оптимизации параметров и режима работы ловушек.

Холодная ловушка с натриевым охлаждением. Дополнительно был разработан вариант встроенной в бак реактора холодной ловушки с натриевым охлаждением. У нее такие же габаритные размеры, как и у ловушки с аргоновым охлаждением, но объем рабочей полости может быть существенно большим. Внутрь ловушки добавлен змеевик. Охлаждающий натрий циркулирует по двум трактам охлаждения: снаружи корпуса рабочей полости в рубашке – до 30% расхода и по расположенному внутри рабочей полости змеевику – до 70% расхода (в начальный период эксплуатации ловушки). Применение охлаждения рабочей полости натрием вместо аргона под давлением позволяет исключить элемент, имеющий повышенную потенциальную энергию, а также увеличить диаметр рабочей полости, что улучшает характеристики ловушки.

Преимуществами подтвержденного расчетами такого варианта ловушки являются

- использование натриевых контуров для охлаждения различных устройств осуществляется с высокой надежностью и в течение длительного периода времени (десятки лет) и может быть реализовано для охлаждения встроенных в бак реактора холодных ловушек;
- попадание охлаждающего натрия в первый контур не вызывает отрицательных эффектов;
- возможность реализации для штатной ловушки натриевого охлаждения встроенных в бак реактора ловушек;
- возможность получить более экономичное использование объема внутри ловушки при использовании натриевого охлаждения;
- возможность использования на АЭС имеющегося персонала с опытом по обращению с натриевым теплоносителем.

Контур для охлаждающего натрия должен удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к установкам со щелочными металлами. Технологическое оборудование должно размещаться в отдельных боксах или за защитным ограждением. Очевидно, что такой контур представляет собой сложную и громоздкую конструкцию. 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 натрий будет незначительным, что позволяет упростить системы контроля и очистки натрия от примесей. При этом 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.

Сопоставление систем очистки первых контуров реакторов на быстрых нейтронах. Проведенные исследования показали, что охлаждение холодной ловушки (ХЛ) жидкометаллическим теплоносителем позволит исключить опасность, обусловленную применением аргона под давлением 1,5 МПа, и будет способствовать улучшению характеристик ловушки. Сопоставление систем очистки (СО) первых контуров БН-350, БН-600 и перспективного БН (охлаждаемых натрием и аргонem) приведено в табл. 1.

Таблица 1

**Сопоставление систем очистки первых контуров БН-350, БН-600 и перспективного реактора на быстрых нейтронах большой мощности**

Охлаждение СО АЭС	$V_{Na}$ , м <sup>3</sup>	$V_{ХЛ}$ , м <sup>3</sup>	Расход ХЛ, $G_{Na}$ , м <sup>3</sup> /ч	$t_{вых,ХЛ}$ , °С	Емкость*, кг	$V_{Na}/G_{Na}$ , ч
СО БН-350	500	3×3	7×3	120	600×3	24
СО БН-600	1000	8×2	8×2	120	1600×2	62
СО перспективного БН (охлаждение Ar)	1900	1,75×3	2,8×3	150	350×3	230
СО перспективного БН (охлаждение Na)	1900	1,86×3	4×3	150	441×3	160

\* – Емкость по окиси натрия

Таблица показывает, что производительность и емкость системы очистки перспективного БН, охлаждаемой аргоном, уступают БН-600 почти в три раза, а при охлаждении натрием почти в 2,5 раза соответственно. Это значит, что время очистки теплоносителя первого контура перспективной РУ тремя ХЛ, охлаждаемыми аргоном, при равных условиях будет почти в три раза большим, чем для БН-600 [6]. Следует заметить, что для окончательного выбора варианта холодной ловушки необходимо проведение экономического анализа.

**ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАССОПЕРЕНОСА В ХОЛОДНЫХ ЛОВУШКАХ**

Оптимизационные исследования конструкции холодных ловушек имели целью достижение их максимальных экономических и технологических показателей. Предложена расчетная модель теплогидравлики и массопереноса примесей в холодной ловушке, которая основана на приближении несжимаемой многокомпонентной среды и позволяет моделировать глобальные пространственные распределения полей скорости течения теплоносителя, температур теплоносителя и элементов конструкции, распределение концентрации переносимой примеси. Использовались коды TURBOFLOW [5, 7], MASKA-LM [8 – 11]. В настоящее время создана первая версия трехмерного кода для математического моделирования процессов внутри ловушки [12]. Для решения теплогидравлической и массообменной задач использовался модифицированный код OpenFOAM. Задача решалась в стационарной постановке для уравнений Навье-Стокса, усредненных по Рейнольдсу (URANS) методом SIMPLE.

Решение проходило в два этапа. На первом рассчитывались поля ключевых параметров потока теплоносителя – скорости, температуры и давления. Результаты этого расчета использовались на втором этапе – расчете переноса примесей во внутренней полости ловушки. Для определения температурных полей, полей скоростей и давления выполнялся теплогидравлический расчет в двумерной гексагональной сетке из ~ 10 тыс. гексагональных ячеек модифицированным стационарным решателем *BuoyantSimpleFoam*. В него были включены теплофизические свойства жидких металлов. В исходный решатель заложено влияние сил плавучести на гидродинамику потока.

Расчет транспортировки примесей в полости ловушки производился с помощью переписанного решателя *TransportFoam*. Выполнено тестирование кода по полученным экспериментальным данным [12].

При расчетах с использованием кода MASKA-LM учитывалось влияние измене-



ния геометрии расчетной области за счет отложений на твердых поверхностях, что позволило оценить емкость холодной ловушки по примесям и время до исчерпания ее ресурса.

Расчеты массопереноса для ловушки с натриевым охлаждением с использованием кода TURBOFLOW показали, что змеевик, расположенный близко к стенке ловушки, не меняет характер течения, но увеличивает интенсивность охлаждения и скорость циркуляционного течения. Змеевик, расположенный близко к центру ловушки, тормозит циркуляционное течение. В результате меняется распределение скорости осаждения примеси на стенке ловушки. Наибольшее охлаждение и снижение концентрации примеси на выходе из ловушки достигается при расположении змеевика ближе к стенке – в этом случае поверхность змеевика максимальна. Влияние длины входной трубы на характеристики течения ловушки демонстрируется на рис. 4. Каждый самостоятельный фрагмент этого рисунка дает вид поперечного сечения половины внутренней полости ловушки, расположенной под фильтром между центральной осью и корпусом (см. рис. 1). При увеличении длины опускной трубы застойная область на дне ловушки уменьшается, циркуляция теплоносителя интенсифицируется. Зстойная область исчезает при расстоянии опускной трубы от дна ловушки 0,9 м.

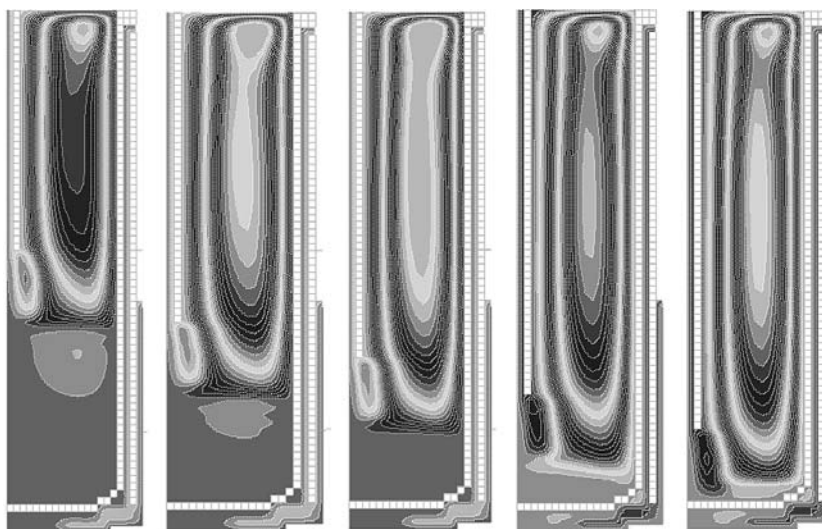


Рис. 4. Картина течения натрия в холодной ловушке при различных длинах опускной трубы

Область, в которой присутствует кристаллизованная примесь, увеличивается при погружении трубы. Повышается равномерность осаждения примесей на внутренних поверхностях ловушки. Скорость осаждения примесей также увеличивается за счет снижения температуры на выходе.

Анализ возможностей увеличения производительности системы очистки актуален. Очевидно, что основное условие этого – увеличение объема ловушки при обеспечении необходимого теплосъема. Поскольку объем ловушки, охлаждаемой натрием, составляет менее 13% от объема, который занимает вся конструкция системы очистки в баке реактора, то имеются резервы для увеличения объема ловушки. Например, было показано, что использование эффективной теплоизоляции позволит уменьшить ее толщину и за счет этого увеличить диаметр ловушки. Предварительные оценки показали, что только за счет этого производительность может быть увеличена в 1,5 раза. Конкретные технические решения требуют специальных проработок.

В частности, за счет оптимизации использования объема фильтра (необходимы соответствующие конструкторские решения) емкость ловушки можно увеличить на 5 – 6%. А из данных по доле объемной концентрации окиси натрия в различных зонах следует, что в ловушке, у которой минимизирована вероятность локального перекрытия сечения, емкость может достигать 30 – 40% об. Эти цифры, по-видимому, следует считать максимальными – их реализация в конкретной конструкции требует специальных НИОКР.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате исследований было разработано научное обоснование для создания совместно с ОКБМ и ОКБ «Гидропресс» холодных ловушек оригинальной конструкции для БН-350, БОР-60 и БН-600. Их емкость по примесям (одна из важнейших эксплуатационных характеристик) в три – пять раз превышает лучшие зарубежные аналоги. Испытания ловушек показали, что они эффективно очищают натрий от кислорода и водорода. С использованием результатов исследований были оптимизированы конструкции ловушки для БОР-60, БН-350, БН-600. Ловушки БН-350 отработали весь ресурс, ловушки БН-600 эксплуатируются более 35-ти лет.

Показано, что за счет увеличения температуры на выходе из холодной ловушки первого контура до 150°C при сохранении прежнего температурного режима ловушки второго контура (температура на выходе из ловушки второго контура 120°C) и при суммарном расходе через ловушки второго контура выше 44 м<sup>3</sup>/ч в ловушки второго контура будет мигрировать водород.

Для варианта ловушки с охлаждением аргоном под давлением 1,5 МПа объем рабочей полости составлял 1,75 м<sup>3</sup>, расчетная вместимость по примесям – 350 кг. При работе системы очистки реактора с тремя ловушками по обычной схеме в течение всего срока эксплуатации РУ требуется 20 замен ловушек, а при исключении попадания водорода в ловушки первого контура – лишь семь замен.

Вариант встроенной в бак реактора ловушки с натриевым охлаждением имеет те же габариты, как и у ловушки с аргоновым охлаждением, но объем ее рабочей полости может быть существенно большим – 1,86 м<sup>3</sup>, а вместимость по примесям – 441 кг. Дополнительно ловушка снабжена змеевиком. Охлаждающий натрий циркулирует по двум трактам охлаждения: снаружи корпуса рабочей полости в рубашке – до 30% расхода и по расположенному внутри рабочей полости змеевику – до 70% расхода (в начальный период эксплуатации ловушки). Охлаждение рабочей полости натрия прием вместо аргона под давлением исключает элемент с повышенной потенциальной энергией.

На основе расчетов с использованием разработанных кодов теплогидравлических и массообменных процессов в ловушке предложены уточняющие технические решения. Даны рекомендации по улучшению конструкции встроенной в бак реактора ловушки для увеличения ее производительности и емкости по примесям. Их реализация в конкретной конструкции ловушки требует проведения специальных НИОКР.

### **Литература**

1. Козлов Ф.А., Волчков Л.Г., Кузнецов Э.К., Матюхин В.В. Жидкометаллические теплоносители ЯЭУ. Очистка от примесей и их контроль. – М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.
2. Козлов Ф.А., Алексеев В.В., Загорюлько Ю.И., Сергеев Г.П., Волчков Л.Г., Козуб П.С., Ковалев Ю.П., Воробьева Т.А., Волов А.Н. Итоги развития технологии натрия как теплоносителя реакторов на быстрых нейтронах // Теплоэнергетика. – 2007. – № 12. – С. 10-23. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601507120026>.
3. Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М., Багдасаров Ю.Е. Васильев Б.А., Каманин

Ю.Л., Осипов С.Л., Кузавков Н.Г., Ершов В.Н., Аширметов М.Р. Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200 // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 201-205. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9286-z>.

4. Васильев Б.А., Васяев А.В., Зверев Д.Л., Шепелев С.Ф., Аширметов М.Р., Ершов В.Н., Онуфриенко С.В., Говердовский А.А., Поплавский В.М., Труфанов А.А., Ошканов Н.Н. Инновационный проект энергоблока БН-1200 как основа эволюционного развития направления БН/Сб. тезисов докладов IV Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии атомной энергетики (МНТК НИКИЭТ – 2016)», АО «НИКИЭТ» (27–30 сентября 2016 г., Москва). – М.: АО «НИКИЭТ», 2016. – С. 38-40.

5. 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 быстрых реакторов // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112. – Вып. 1. – С. 18-24. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9519-4>.

6. Алексеев В.В., Ковалев Ю.П., Калякин С.Г., Козлов Ф.А., Кумаев В.Я., Кондратьев А.С., Матюхин В.В., Пирогов Э.П., Сергеев В.В., Сорокин А.П., Торбенкова И.Ю. Система очистки натриевого теплоносителя АЭС с реактором БН-1200 // Теплоэнергетика. – 2013. – №5. – С. 9-20. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601513050017>.

7. Калякин С.Г., Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Алексеев В.В., Щербаков С.И., Кондратьев А.С., Варсеев Е.В. Исследования в обоснование встроенной в бак реактора системы очистки натрия // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 2. – С. 81-89. DOI: <https://doi.org/10.26583/jpre.2014.2.09>.

8. Сорокин А.П., Труфанов А.А. Очистка натрия АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2017. – Вып. 3. – С. 142-162. Электронный ресурс: <https://vant.ippe.ru/year2017/3/thermal-physics-hydrodynamics/1381-12.html> (дата доступа 04.10.2019).

9. Варсеев Е.В., Коновалов М.А., Алексеев В.В. Результаты численного моделирования теплообмена в макете холодной ловушки // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2014. – Вып. 2. – С. 106-113. Электронный ресурс: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2014/2-11.pdf> (дата доступа 04.10.2019).

10. Алексеев В.В., Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Варсеев Е.В., Кумаев В.Я., Кондратьев А.С. Расчеты массопереноса примесей в холодных ловушках с натриевым охлаждением. // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – Вып. 5. – С. 257-261. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-015-9999-0>.

11. Алексеев А.А., Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Варсеев Е.В., Кумаев В.Я., Кондратьев А.С. Расчеты массопереноса примесей в холодных ловушках с натриевым охлаждением. / Сб. докладов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2014)». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2015. – С. 380-385.

12. Алексеев В.В., Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Труфанов А.А., Крючков Е.А., Варсеев Е.В., Коновалов М.А., Торбенкова И.Ю. Испытания на натриевом стенде модели холодной ловушки. // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122. – № 1. – С. 29-33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0232-1>.

13. Козлов Ф.А., Волчков Л.Г. Новый способ регенерации ловушек для очистки щелочных жидкометаллических теплоносителей. // Атомная энергия. – 1975. – Т. 39. – Вып. 4. – С. 310. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01261913>.

Поступила в редакцию 11.10.2019 г.

#### Авторы

Алексеев Виктор Васильевич, главный научный сотрудник, д-р техн. наук,  
E-mail: [alexeev@ippe.ru](mailto:alexeev@ippe.ru)

Кузина Юлия Альбертовна, заместитель генерального директора, канд. техн. наук,  
E-mail: [ukuzina@ippe.ru](mailto:ukuzina@ippe.ru)

Сорокин Александр Павлович, главный научный сотрудник, д-р техн. наук,  
E-mail: [sorokin@ippe.ru](mailto:sorokin@ippe.ru)

## CONCEPTUAL ISSUES OF COLD FILTER-TRAPS DEVELOPMENT FOR SODIUM COOLANT PURIFICATION IN FAST REACTORS

Alekseev V.V., Kuzina Yu.A., Sorokin A.P.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

### ABSTRACT

Results of investigation of specific features of heat and mass transfer in cold traps for sodium purification from impurities in fast reactor loops performed both in special experimental sections modeling various zones of the trap - isothermal and non-isothermal sedimentation tanks and filters and the final cooling zone, and on prototype trap models are presented. As the result, a scientific justification was formulated for the development of innovative trap design for different reactors. Impurity trapping capacity of such traps is higher than that for the best foreign analogues by 3 – 5 times. Tests of traps demonstrated highly efficient sodium purification from oxygen and hydrogen and significantly lower capacity with respect to corrosion products and carbon. Taking into account that leaks of radioactive sodium during operation of the traps in the primary cooling loop of BN-600 reactor, the decision was made to install the coolant purification system inside the reactor vessel for enhancing the reactor safety. The issue of eliminating accumulation of hydrogen in traps of the primary cooling loop when the reactor is operated in nominal operation mode was resolved. Two designs of a cold trap were suggested - with argon cooling and with sodium cooling. It was demonstrated that 20 replacements of traps are required during the reactor lifespan when the reactor coolant purification system with argon cooling is utilized, with 7 replacements needed if hydrogen accumulation in the cold traps of the primary cooling loop is prevented. The option of sodium-cooled trap built into the reactor vessel has the same overall dimensions as the argon-cooled trap. Cooling sodium is circulated through two cooling paths: up to 30% of the flow rate in the jacket on the outside of the working cavity and up to 70% of the flow along the coil installed inside the working cavity. Based on the calculations using the developed codes for simulating heat and mass transfer processes in the traps the improving technical solutions were proposed.

**Key words:** fast reactors, sodium coolant, cold trap, reactor vessel, experiment, computation code, thermal hydraulics, mass transfer, impurities, oxygen, hydrogen, argon cooling, sodium cooling.

### REFERENCES

1. Kozlov F.A., Volchkov L.G., Kuznetsov E.K., Matyuchin V.V. *Liquid Metal Coolants for Nuclear Power Plants. Purification of Impurities and Their Control*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1983, 128 p. (in Russian).
2. Kozlov F.A., Alekseev V.V., Zagorulko Yu.I., Sergeev G.P., Volchkov L.G., Kozub P.S., Kovalev Yu.P., Vorob'eva T.A., Volov A.N. The results of the development of technology for using sodium as coolant for fast-neutron reactors. *Teploenergetika*, 2007, v. 54, no. 12, pp. 942-954. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601507120026> (in Russian).
3. Rachkov V.I., Poplavskii V.M., Tsibulya A.M., Bagdasarov Yu.E., Vasiliev B.A., Kamanin Y.L., Osipov S.L., Kuzavkov N.G., Ershov V.N., Ashirmetov M.R. Concept of an Advanced Power-Generating Unit with a BN-1200 Sodium Cooled Fast Reactor. *Atomnaya Energiya*, 2010, v. 108, no. 4, pp. 254-259. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9286-z> (in Russian).
4. Vasiliev B.A., Vasyaev A.V., Zverev D.L., Shepelev S.F., Ashirmetov M.R., Ershov V.N., Onufrienko S.V., Goverdovskij A.A., Poplavskij V.M., Trufanov A.A., Oshkanov N.N. Innovative Project of the BN-1200 Power Unit as the Basis for the Evolutionary Development of the BN

Direction. *Proc. of the IV-th International Scientific and Technical Conference «Innovative designs and technologies of nuclear power (ISTC NIKIET-2016)»*. Moscow. AO NIKIET Publ., 2016, pp. 38-40 (in Russian).

5. Kozlov F.A., Alexeev V.V., Kovalev Yu.P., Kumaev V.Ya., Matyuchin V.V., Orlova E.A., Pirogov E.P., Sorokin A.P., Shcherbakov S.I. Studies validating a sodium purification system for fast reactors. *Atomnaya Energiya*, 2012, v. 112, no. 1, pp. 21-28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9519-4> (in Russian).

6. Alekseev V.V., Kovalev Yu.P., Kalyakin S.G., Kozlov F.A., Kumaev V.Ya., Kondratev A.S., Matyuchin V.V., Pirogov E.P., Sergeev G.P., Sorokin A.P., Torbenkova I.Yu. Sodium Coolant Purification System for a Nuclear Power Station Equipped with a BN-1200 Reactor. *Teploenergetika*, 2013, v. 60, no. 5, pp. 311-322. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601513050017> (in Russian).

7. Kalyakin S.G., Kozlov F.A., Sorokin A.P., Alekseev V.V., Shcherbakov S.I., Kondratev A.S., Varseev E.V. Investigation in support of the sodium purification system integrated in the reactor tank. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*, 2014, no. 2, pp. 81-89. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.2.09> (in Russian).

8. Sorokin A.P., Trufanov A.A. Sodium Purification in NPP with Fast-Neutron Reactors. *VANT. Ser. Yaderno-Reaktornye Konstanty*. 2017, iss. 3, pp. 142-162. Available at: <https://vant.ippe.ru/year2017/3/thermal-physics-hydrodynamics/1381-12.html> (accessed Oct 04, 2019) (in Russian).

9. Varseev E.V., Kononov M.A., Alekseev V.V. Results of Heat and Mass Transfer Numerical Modeling in the Cold Trap Mockup. *VANT. Ser. Yaderno-Reaktornye Konstanty*, 2014, iss. 2, pp. 106-113. Available at: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2014/2-11.pdf> (accessed Oct 04, 2019) (in Russian).

10. Alekseev V.V., Kozlov F.A., Sorokin A.P., Varseev E.V., Kumaev V.Ya., Kondrat'ev A.S. Calculation of impurity mass transfer in cold traps with sodium cooling. *Atomnaya Energiya*, 2015, v. 118, no. 5, pp. 318-323. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-015-9999-0> (in Russian).

11. Alekseev A.A., Kozlov F.A., Sorokin A.P., Varseev E.V., Kumaev V.Ya., Kondrat'ev A.S. Calculation of Mass Transfer of Impurities in Cold Traps with Sodium Cooling. *Proc. of the Sci. and Techn. Conference «Thermophysics of fast neutron reactors (Thermophysics 2014)»*. Obninsk: SSCRF-IPPE Publ., 2015, pp. 380-385 (in Russian).

12. Alekseev V.V., Kozlov F.A., Sorokin A.P., Trufanov A.A., Kryuchkov E.A., Varseev E.V., Kononov M.A., Torbenkova I.Y. Sodium-Bench Testing of a Cold-Trap Model. *Atomnaya Energiya*, 2017, v. 122, no. 1, pp. 35-41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0232-1> (in Russian).

13. Kozlov F.A., Volchkov L.G. New Way to Regenerate Traps for Purification of Alkaline Liquid Metal Coolants. *Atomnaya Energiya*, 1975, v. 39, no. 4, p. 310. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01261913> (in Russian).

#### Authors

Alekseev Victor Vasil'evich, Main Researcher, Dr. Sci. (Engineering),  
E-mail: [alexeev@ippe.ru](mailto:alexeev@ippe.ru)

Kuzina Yuliya Al'bertovna, Deputy Director General. Cand. Sci. (Engineering),  
E-mail: [ukyzina@ippe.ru](mailto:ukyzina@ippe.ru)

Sorokin Alexander Pavlovich, Main Researcher, Dr. Sci. (Engineering),  
E-mail: [sorokin@ippe.ru](mailto:sorokin@ippe.ru)