# Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ — ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени А. И. Лейпунского

ФЭИ - 3295

Р.О. Сутягина, В.В. Алексеев, И.А. Сутягин

# ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ОЧИСТКИ В ОБЛАСТИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

# Р.О. Сутягина, В.В. Алексеев, И.А. Сутягин. Обзор существующих систем очистки в области жидкометаллических теплоносителей Препринт ФЭИ – 3295. Обнинск, 2021. – 53 с.

Жидкометаллический теплоноситель, быстрый реактор, очистка, натрий, емкость, холодная ловушка, горячая ловушка, предварительная очистка теплоносителя, дистилляция, отстаивание, фильтрация, примесь.

Проведен анализ существующих систем очистки от примесей натриевого теплоносителя быстрых реакторов с акцентом на очистку теплоносителя в контуре. Системы очистки теплоносителя являются необходимым элементом любой реакторной установки. Поддержание необходимой чистоты жидкометаллического теплоносителя как в процессе подготовки его к загрузке в установку, так и на работающей ядерно-энергетической установке является одной из задач технологии жидкометаллических теплоносителей. Примеси, неизбежно присутствующие в теплоносителе и постоянно поступающие в него, могут вызывать эффекты, усложняющие эксплуатацию таких установок. Это указывает на важность разработок в области методов очистки теплоносителя.

### Review of existing purification systems in the field of liquid metal

The analysis of the existing systems for purification of sodium coolant from impurities in fast reactors with an emphasis on purification of the coolant in the circuit is carried out. Coolant purification systems are a necessary element of any reactor plant. Maintaining the required purity of the liquid metal coolant both in the process of preparing it for loading into the installation and at the operating nuclear power plant is one of the tasks of the liquid metal coolant technology. Impurities that are inevitably present in the coolant and constantly entering it can cause effects that complicate the operation of such installations. This indicates the importance of developments in the field of methods for coolant cleaning.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ОТ ПРИМЕСЕЙ НАТРИЕВОГО	_
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ	6
1.1 Примеси в жидкометаллическом теплоносителе	6
1.2 Системы очистки теплоносителя	7
1.3 Способы очистки во время предварительной подготовки теплоносителя	
и на экспериментальных установках	8
1.3.1 Дистилляция	8
1.3.2 Отстаивание	13
1.3.3 Центрифугирование	15
1.3.4 Обезгаживание	15
1.3.5 Фильтрование	16
1.3.6 Зонная очистка	18
1.3.7 Очистка с помощью электропереноса примесей	19
ГЛАВА 2. ОЧИСТКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КОНТУРЕ ЯЭУ	19
2.1 Классификация ловушек	19
2.2 Холодные ловушки	20
2.3 Отечественные разработки ХЛ	22
2.4 Зарубежные проекты и разработки	28
2.5 Геттерная очистка	39
2.6 Сравнение ловушек для очистки натриевого теплоносителя	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	52

### СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- В настоящем препринте применяют следующие сокращения:
- DFR реактор на быстрых нейтронах с теплоносителем из натрий-калиевого сплава
- FBTR индийский реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем
- FFTF американский экспериментальный реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем
- HNPF реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем
- KALIMER-600 проект быстрого натриевого реактора бассейнового типа мощностью 600 MBт
- KNK-2 компактная ядерная установка с натриевым охлаждением в Карлсруэ
- SRE американский реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем и мощностью до 6,5 МВт
- Superphenix французский энергетический реактор-размножитель на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем
- АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»
- АО «ОКБМ Африкантов» Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И. И. Африкантова»
- АЭС атомная электростанция
- БН-350 реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем мощностью 350 MBт
- БН-600 реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем мощностью 600 MBт
- БОР-60 экспериментальный реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем мошностью 60 MBт
- БР-5 реактор на быстрых нейтронах мощностью 5МВт
- БУК космическая ядерно-энергетическая установка
- ПСК параллельная смешанная конвекция
- РП рабочая полость
- СССР Союз Советских Социалистических Республик
- ТОПАЗ космическая ядерно-энергетическая установка
- ХЛ холодная ловушка
- ЯР ядерный реактор
- ЯЭУ ядерно-энергетическая установка

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время большинство программ по развитию ядерной энергетики как в мире, так и в России направлено на развитие быстрых реакторов. Оптимальным теплоносителем для таких реакторов является натрий, благодаря удачному сочетанию физических, теплофизических и коррозионных свойств.

Применение жидкометаллических теплоносителей ставит ряд вопросов, решение которых входит в задачу технологии жидкометаллических теплоносителей. К ним относятся: поддержание необходимой чистоты жидкометаллического теплоносителя как в процессе подготовки его к загрузке в установку, так и на работающей ядерно-энергетической установке. Самостоятельной задачей является изучение возможных источников примесей в установках.

Особенность натрия как теплоносителя ядерно-энергетической установки во многом определяется химической активностью по отношению к водороду, кислороду, воде и ряду других веществ. Примеси, неизбежно присутствующие в теплоносителе и постоянно поступающие в него, могут вызывать эффекты, усложняющие эксплуатацию таких установок: отложение примесей на поверхностях, повышение коррозионных эффектов, ухудшение радиационной обстановки на установке и др. Все это указывает на важность разработок в области методов очистки теплоносителя. Работы в этом направлении начались с момента создания первых реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.

Настоящая работа представляет собой анализ существующих систем очистки от примесей натриевого теплоносителя быстрых реакторов с акцентом на очистку теплоносителя в контуре. Системы очистки теплоносителя являются необходимым элементом любой реакторной установки.

Все данные, используемые в данном препринте, опубликованы в российской и зарубежной литературе за последние полвека. Проделанная работа дает возможность судить о состоянии дел в области систем очистки на данном этапе развития ядерной энергетики.

# ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ОТ ПРИМЕСЕЙ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

#### 1.1 Примеси в жидкометаллическом теплоносителе

В жидкометаллическом теплоносителе присутствуют различного рода примеси, количество которых существенно меняется в зависимости от конкретных условий. Соответственно, чем больше работает ядерный реактор (ЯР) на мощности, тем больше примесей накапливается в теплоносителе.

Основные источники примесей:

- примеси в исходном натрии промышленного производства (их количество зависит от применяемого сырья, технологии производства и условий хранения);
  - конструкционные и технологические материалы;
  - защитный газ;
- попадание примесей при разгерметизации контура во время монтажных и ремонтных работ;
- смазочные средства, используемые в центробежных циркуляционных насосах и других подвижных механизмах реакторных установок;
  - продукты ядерных реакций и осколки деления;
- диффузия водорода из водяного контура в парогенераторах натрийвода;
- аварийные ситуации (протечки воды в парогенераторах натрий-вода, протечки масла и т. д.).

Поддержание чистоты теплоносителя является одним из важнейших условий эффективной и безопасной работы быстрых ЯР. При отсутствии должной чистоты жидкометаллического теплоносителя присутствующие в нем примеси могут оказывать влияние на следующие факторы в работе ядерного реактора:

- ядерно-физические характеристики ЯР;
- радиационную обстановку, создаваемую примесями в результате взаимодействия их с ядерным излучением;
- протекание процессов коррозии и массопереноса конструкционных материалов;
- образование отложений на поверхностях, контактирующих с натрием.

При использовании натрия в качестве теплоносителя ЯР многие примеси становятся радиоактивными. Одним из самых важных факторов, влияющих на скорость коррозии в натрии, является содержание кислорода.

Количественное содержание кислорода по-разному может повлиять на изменение процессов в ядерно-энергетической установке (ЯЭУ). Превышение кислорода выше определенного предела поведет за собой увеличение скорости коррозии для многих материалов. Слишком высокое содержание кислорода может привести к закупорке системы окислами. Вследствие пониженной растворимости окиси натрия при низких температурах она будет отлагаться в виде твердого осадка при температуре ниже температуры насыщения окисью [1].

Соответственно, можно сделать вывод, что, ввиду последствия закупорки окисью, следует тщательно следить за чистотой натрия по кислороду. Рекомендуется ограничивать содержание кислорода до величины, меньшей растворимости при самой низкой температуре в системе.

#### 1.2 Системы очистки теплоносителя

В настоящее время существуют специальные системы очистки теплоносителя от примесей, поступающих в контур за счет источников, указанных в разделе 1.1.

Очистку жидкометаллического теплоносителя необходимо проводить как перед заполнением контура, так и непосредственно в контуре в процессе эксплуатации. Основные системы очистки представлены на рис. 1.



Рис. 1. Системы очистки теплоносителя

Системы очистки жидкометаллического теплоносителя должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- обеспечивать требуемую чистоту теплоносителя в условиях длительной эксплуатации атомной электростанции (АЭС) на номинальных параметрах;
- иметь необходимую емкость ловушки по примесям, которые могут поступить в теплоноситель с учетом всех режимов эксплуатации, включая аварийное загрязнение. Емкость ловушки по примесям объемная доля, занятая примесями при исчерпании ресурса ловушки, к полному объему [2];
- иметь производительность, гарантирующую очистку теплоносителя от примесей за время, заданное техническим заданием на установку [3]. При наличии источников примеси в теплоносителе под производительностью понимают количество примеси, выводимое ловушкой из теплоносителя в единицу времени, при отсутствии источников количество теплоносителя, очищенного в единицу времени от исходной концентрации до такой, которая превышает минимальную концентрацию примеси в теплоносителе не более чем на 10 % [4];
  - простота конструкционного исполнения и эксплуатации.

# 1.3 Способы очистки во время предварительной подготовки теплоносителя и на экспериментальных установках

#### 1.3.1 Дистилляция

Дистилляция металлов протекает, как правило, при высоких температурах (400–550 °C) и весьма низких давлениях ((1–5)· $10^{-2}$  мм рт. ст.). Этот способ очистки позволяет получить теплоноситель высокой чистоты (до 99,9995 мас.%).

Дистилляционный метод очистки металлов в вакууме основан на различии упругостей паров и скоростей испарения основного металла и содержащихся в нем примесей.

Процесс дистилляции состоит из нескольких этапов:

- прогрев расплава до температуры испарения, при которой достигается эффективное испарение;
- испарение расплава со скоростью, зависящей от параметров испарения;
  - перенос паров к поверхности конденсатора;
- конденсация паров на поверхности конденсатора при определенной температуре [5].

Скорость испарения натрия зависит как от температуры в испарительной камере, так и от степени вакуума в системе. На рис. 2 показана кривая зависимости удельной скорости дистилляции натрия от температуры, рассчитанная с использованием уравнения Ленгмюра для случая поддержания высокой степени вакуума — порядка  $10^{-2}$  Па и менее.

Влияние степени вакуума на скорость дистилляции при температуре 450 °C показано на рис. 3. Аналогичные зависимости можно получить и для других температур. Используя эти данные, можно оценить, например, время дистилляции недренируемых остатков натрия из оборудования натриевых контуров.

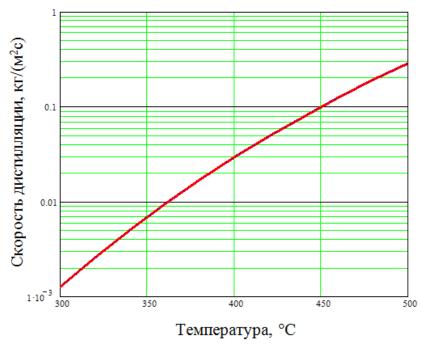


Рис.2. Зависимость скорости дистилляции натрия от температуры при высоком вакууме

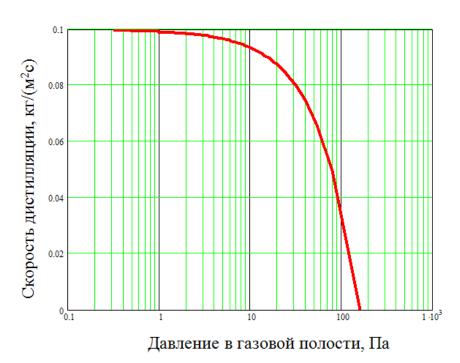
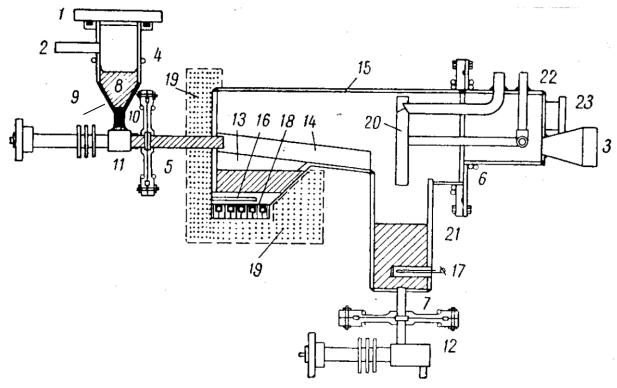


Рис.3. Зависимость скорости дистилляции натрия от степени вакуума при температуре 450 °C



1 – крышка; 2, 3 – патрубки для откачки и заполнения аргоном; 4, 6, 7 – трубки водяного охлаждения; 5 – соединительный трубопровод; 8 – загрузка чернового металла; 9 – камера фильтра; 10 – фильтр; 11, 12 – жидкостные металлические клапаны; 13 – испаритель; 14 – желоб; 15 – корпус установки из трубы диаметром 200 мм; 16, 17 – термопары; 18 – нихромовый нагреватель; 19 – теплоизолятор; 20 – конденсатор; 21 – сборник; 22 – трубки к высокотемпературному масляному насосу; 23 – окно

Рис. 4. Установка для фильтрации и вакуумной дистилляции щелочных металлов

В литературе [6] описаны три основных метода дистилляции жидкометаллических теплоносителей: вакуумная дистилляция, дистилляция с дефлегмацией и ректификация. На рис. 4 изображена установка полунепрерывного действия для фильтрации и вакуумной дистилляции щелочных металлов, а именно калия, натрия и лития.

Процесс дистилляции на данной установке происходит следующим образом [6, 7]:

- металл загружают в камеру фильтра;
- используя патрубки для откачки, создают форвакуум (0,01 мм рт. ст.);
- металл расплавляют с помощью газового нагрева;
- проводят дополнительную откачку до вакуума  $10^{-4} 10^{-5}$  мм рт. ст.;
- камеру внутри корпуса, клапан и соединительный трубопровод нагревают;
- под давлением аргона через фильтр продавливают расплавленный металл в испаритель;

- конденсация пара происходит при температуре 100 °C на внутренней стороне корпуса;
- с внутренней стороны корпуса металл попадает на желоб и стекает в сборник;
- конденсат сливается в стеклянную изложницу, в которой было создано разряжение.
  - процесс испарения продолжается до полного заполнения сборника.

Установка полунепрерывного действия для фильтрации и вакуумной дистилляции позволяет обеспечить многократную дистилляцию без какихлибо признаков коррозии или разрушения сосуда.

В таблице 1 приведены температуры испарения и соответствующие им скорости дистилляции натрия при вакууме 0,1 мм рт. ст. [7].

Таблица 1. Параметры дистилляции натрия

Параметр	Значение			
Температура испарения, °С	330	347	361	375
Скорость дистилляции, г/ч	260	460	630	1000

Натрий с помощью этого способа может быть очищен не только от окислов, но и от других элементов и соединений, упругость паров которых сильно отличается от упругости паров натрия при одной и той же температуре [8]. Основными недостатками процесса вакуумной дистилляции являются сложность процесса, большие размеры дистилляторов и большой расход энергии.

Ввиду указанных недостатков метод вакуумной дистилляции практически не применяется для очистки теплоносителя. Двух- или трехфазную очистку натрия вакуумной дистилляцией применяют в редких случаях, когда нужно получить особо чистый натрий.

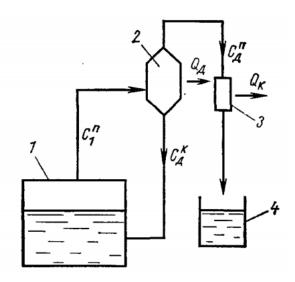
Схема процесса дистилляции, совмещённого с дефлегмацией, представлена на рис. 5.

Кратко процесс дистилляции с дефлегмацией можно описать следующим образом:

- выход пара из испарителя с концентрацией легколетучего компонента  $C_1^{\Pi}$ ;
- частичная конденсация этого пара в дефлегматоре до температуры  $t_{\text{Д}}$  (пар и конденсат, имеющие концентрации  $C_{\text{Д}}^{\text{П}}$  и  $C_{\text{Д}}^{\text{K}}$  соответственно, находятся в равновесии);
  - обогащенный пар отправляется в конденсатор [9].

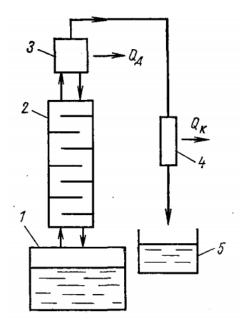
Еще одним из способов дистилляции является метод ректификации. Схема данного способа представлена на рис. 6. Ректификация представляет собой совокупность следующих последовательных процессов:

- движение пара из испарителя в концентрационную колонку;
- движение конденсата навстречу пару из дефлегматора;
- взаимодействие в конденсационной колонке пара и конденсата (конденсационная колонка обладает тарелками, которые обеспечивают контакт пара и конденсата);
  - установление равновесия между жидкостью и паром.



1 – испаритель; 2 – дефлегматор; 3 – конденсатор; 4 – сборный бак;  $Q_{\rm M}$  – тепло дефлегмации;  $Q_{\rm K}$  – тепло конденсации

Рис. 5. Процесс дистилляции с дефлегмацией [6]



1 – испаритель; 2 – конденсационная колонка; 3 – дефлегматор; 4 – конденсатор; 5 – сборный бак;  $Q_{\rm M}$  – тепло дефлегмации;  $Q_{\rm K}$  – тепло конденсации

Рис. 6. Ректификационная установка [6]

В США в 1950 году была спроектирована установка с названием «Жени» для производства пара, в которой в качестве теплоносителей были применены натрий и натрий-калиевый сплав. Очистка жидкого металла проводилась с помощью дистилляции [1, 10].

#### 1.3.2 Отстаивание

Отстаивание — эффективный способ освобождения расплавленного металла от основной массы взвешенных примесей в результате различий между плотностями примесей и теплоносителя. При охлаждении натрия окислы, которые находились в растворе металла, выпадают в кристаллическую фазу. Кристаллы окиси, удельный вес которых больше удельного веса натрия, осаждаются на дно [8].

Металл отстаивается в емкостях, служащих для загрузки циркуляционных контуров, при температуре, немного превышающей температуру плавления металла. При таких условиях большая часть примесей находится в нерастворенном состоянии, что обуславливает наибольшую эффективность отстаивания. При высокой конвекции в емкости отстаивания происходит взмучивание осадка, что приводит к ухудшению процесса.

На рис. 7 схематически представлена емкость, в которой может производиться очистка натрия с помощью отстаивания. Трубу, по которой натрий из отстойника подается в установку, не опускают до дна, чтобы при передавливании не захватить осевшие при отстаивании на дно окислы [8].

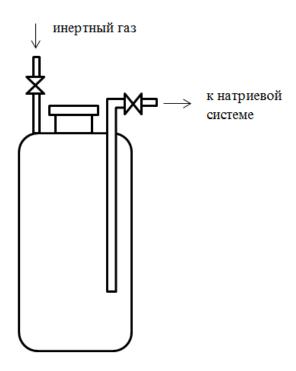


Рис. 7. Бак-отстойник [8]

Известны зависимости для скорости осаждения сферических частиц. С учетом всех сил, действующих на осаждающуюся (всплывающую) частицу, имеет место соотношение для скорости их движения относительно среды [11].

$$w = \sqrt{\frac{4 \cdot |\rho_{\rm T} - \rho| \cdot g \cdot d}{3 \cdot \rho \cdot \xi}}, \qquad (1)$$

где d — диаметр частицы;

*g* — ускорение свободного падения;

ρ<sub>т</sub>, ρ — плотности материалов частиц и жидкости;

 $\xi$  — коэффициент сопротивления среды, зависящий от режима обтекания частицы.

Режим обтекания характеризуется числом Рейнольдса, определяемого по формуле:

$$Re = \frac{w \cdot d}{v}, \qquad (2)$$

где v — вязкость жидкости.

При ламинарном обтекании частицы жидкостью (Re < 1) имеет место закон Стокса, при котором коэффициент сопротивления среды рассчитывается оп формуле:

$$\xi = \frac{24}{\text{Re}}.\tag{3}$$

На отрезке  $1 \le \text{Re} \le 2$  величина  $\xi$  также рассчитывается по закону Стокса. Промежуточный режим обтекания соответствует изменению числа Рейнольдса 2 < Re < 500, в этом случае используется эмпирическая зависимость Аллена:

$$\xi = \frac{18,5}{\text{Re}^{0,6}}.\tag{4}$$

Скорость осаждения или всплытия частиц в жидкости рассчитывается также с использованием полуэмпирической зависимости Тодеса и Розенбаума [12]:

$$w = \frac{v}{d \cdot \text{Ar} \cdot \left(18 + 0.61 \cdot \sqrt{\text{Ar}}\right)}$$
 (5)

где Ar — критерий Архимеда, определяемый по формуле:

$$Ar = \frac{\left|\rho_T - \rho\right| \cdot g \cdot d^3}{\rho \cdot v^2} \,. \tag{6}$$

Очевидно, что при  $\rho_{\scriptscriptstyle T} > \rho$  частицы тонут, а при  $\rho_{\scriptscriptstyle T} < \rho$  всплывают.

Представленные зависимости получены безотносительно к какой-либо конкретной среде, поэтому справедливы для различных жидкостей, включая натриевый теплоноситель. Многочисленные экспериментальные данные, полученные для жидкостей с различными физическими свойствами, а также для газов подтверждают справедливость формул (1) и (5).

#### 1.3.3 Центрифугирование

Центрифугирование – способ очистки, основанный на разделении жидкости и осадка в поле центробежной силы.

Преимущества данного способа:

- малое время разделения;
- уплотнение осадка под действием центробежных сил;
- высокая концентрация примеси в зоне концентрирования (близка к 100 %).
   Недостатки:
- сложность процесса;
- необходимость специального оборудования, которое будет работать в среде расплавленных металлов при повышенных температурах [6].

Технические характеристики центрифуги для очистки жидкометаллических теплоносителей:

Температура разделения в центрифуге, °С	150
Радиус барабана центрифуги, м	0,1
Скорость барабана, об/мин	1200
Время разделения, с	4

Один из типов центробежной очистки — очистка циклонами. Примеси в таком устройстве разделяются возникающей центробежной силой, действующей на частицы в жидкости, подводимой с большой скоростью тангенциально к цилиндрической внутренней поверхности циклона. Ввиду своей простоты и отсутствия движущихся механических частей, устройства с циклонами применимы для очистки от частиц оксидов натрия. Недостаток этого метода — большие расходы металла через циклон и тепла для охлаждения это потока [6].

Метод центрифугирования при очистке жидкометаллических теплоносителей практически не используется.

#### 1.3.4 Обезгаживание

Обезгаживание (дегазация) — способ очистки натрия, применяемый для удаления растворенных газов. Газы из металлов при откачке удаляются в результате выделения путем уменьшения их растворимости при понижении давления, термической диссоциации соединений газов с металлом, термического восстановления соединений, образования и испарения субокислов. Существуют и другие способы обезгаживания металлов, основанные на

существовании летучих субокислов некоторых элементов, способных восстанавливать примеси щелочных металлов [6].

Процесс обезгаживания, как и любой другой способ очистки, зависит от многих факторов, например таких, как сопутствующие процессы испарения и конденсации жидкого металла.

Подробно обезгаживание как метод очистки щелочных металлов не изучался. Лишь некоторые эксперименты по удалению водорода из натрия путем вакуумной откачки рассмотрены в [6].

#### 1.3.5 Фильтрование

Фильтрование – процесс очистки, основанный на отделении нерастворенных частиц примесей от жидкости с помощью фильтров, представляющих собой пористые перегородки разных конструкций, выполненные из различных материалов. Например, в качестве фильтрующих элементов используются насадки из стружки и проволоки, металлические сетки обычного и саржевого плетения и металлокерамические пористые материалы [6]. По обе стороны от перегородки создается разность давлений. Для очистки жидкометаллического теплоносителя используются два типа перегородок:

- 1) из спеченного материала с размерами пор 5–10 мкм;
- 2) мелкоячеистые нержавеющие сетки с размерами ячейки 10–50 мкм. Существуют два способа фильтрования:
- при постоянном давлении;
- при постоянной скорости движения жидкости (способ практически не используется).

Эффективность фильтрования зависит в основном от следующих факторов:

- температура фильтрования;
- размеры пор в используемом фильтре;
- количество фильтрований (зачастую однократное фильтрование является недостаточным из-за способности некоторых примесей устойчиво существовать в пересыщенном растворе);
  - времени выдержки металла перед фильтрованием;
  - зависимости растворимости примеси от температуры;
  - характера диаграммы металл примесь;
- взаимодействие системы металл первая примесь со второй примесью [6].

Схемы установки для очистки натрия с помощью метода фильтрации и конструкция фильтра изображены на рис. 8 и 9 соответственно.

Процесс фильтрации при использовании данной установки выглядит следующим образом:

- 1. Под действием избыточного давления или специального насоса, натрий из емкости 1 прокачивается через фильтр сетчатого типа. Натрий имеет температуру 110-150 °C. Скорость натрия через сетку фильтра составляет  $(1-3)\cdot 10^{-3}$  м/с.
- 2. Кристаллы окиси задерживаются фильтром, а чистый натрий попадает в емкость 2.

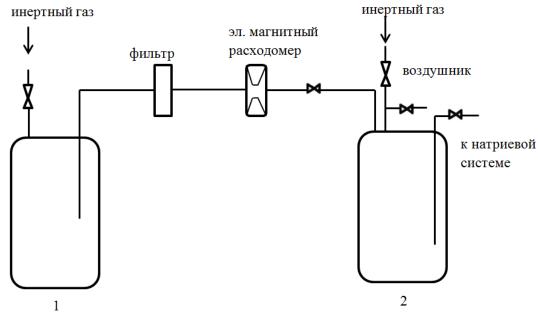


Рис. 8. Схема фильтрации натрия [8]

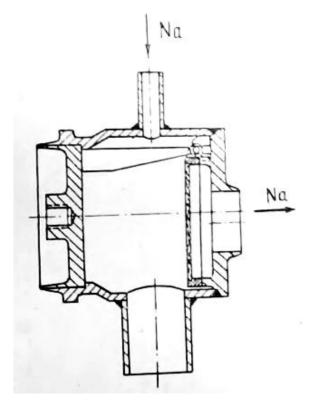


Рис. 9. Фильтр для натрия [8]

Основное применение фильтрации сводится к удалению больших количеств окиси и осадков из натрия во время первичной загрузки в систему. Установлено, что при фильтрации окиси натрия возникает закупорка, если фильтрация осуществляется в условиях, способствующих росту кристаллов на фильтрующем слое. Это может произойти, например, если натрий быстро охлаждается и фильтруется. Закупорку можно предотвратить двумя способами:

- регулировка температуры перед фильтрацией;
- поддерживание температуры фильтрующего слоя несколько выше температуры основной массы натрия [1].

#### 1.3.6 Зонная очистка

Зонная очистка — это способ, основанный на различии концентраций насыщения примесями расплава металла и твердого металла.

На рис. 10 представлена схема непрерывной зонной очистки, которая происходит следующим образом. В колонне, заполненной очищаемым металлом, постепенно передвигают расплавленные зоны с помощью передвижных нагревателей. В центр колоны непрерывно подают свежий расплав.

Зонная очистка, в том числе и непрерывная зонная очистка, для щелочных металлов практически не исследована [5]. Ввиду отсутствия результатов исследований в области жидкометаллических теплоносителей эффективность зонной очистки невозможно предугадать. Поэтому, на данный момент этот способ практически не применяется при очистке жидкометаллических теплоносителей.

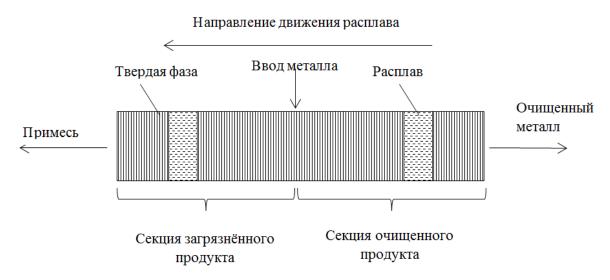


Рис. 10. Схема непрерывной зонной очистки [5]

#### 1.3.7 Очистка с помощью электропереноса примесей

Электроперенос — это направленное перемещение примесей под действием электрического тока, проходящего через раствор.

Эксперименты по использованию такого метода для очистки жидкометаллических теплоносителей не проводились. Существует лишь теоретическое обсуждение [5], которое показывает, что ловушка, основанная на электропереносе примесей, обладает малой производительностью. Ввиду этого обстоятельства она может быть использована лишь для улавливания примесей, источники которых обладают малой интенсивностью (пример: продукты коррозии конструкционных материалов).

В работе [13] проводились эксперименты по перемещению примеси кислорода (оксида натрия) в расплавленном натрии под действием электрического тока при температуре 300 °C. В результате было получено следующее: сильный перенос кислорода к аноду, увеличивающийся с ростом температуры. На этом экспериментальные данные закончились. Поэтому трудно говорить о применимости электропереноса как способа очистки жидкометаллического теплоносителя.

#### ГЛАВА 2. ОЧИСТКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КОНТУРЕ ЯЭУ

#### 2.1 Классификация ловушек

Ловушки принято классифицировать по следующим признакам, представленным на рис. 11.

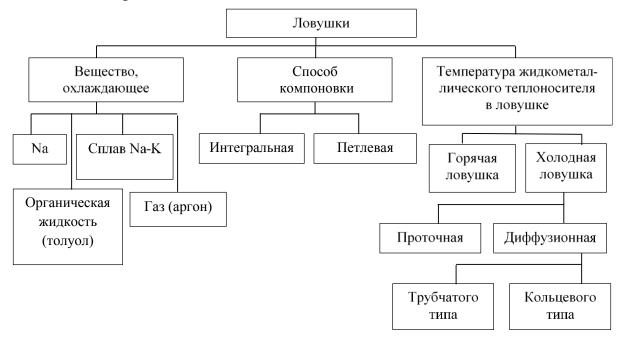


Рис. 11. Классификация ловушек, используемых для очистки жидкометаллических теплоносителей

Из схемы, представленной на рис. 11, видно, что ловушки в зависимости от температуры теплоносителя бывают двух типов: горячие и холодные (ХЛ). ХЛ в свою очередь делятся на проточные и диффузионные. ХЛ проточного типа, а именно трехзонные проточные ловушки, используются в большинстве эксплуатируемых ядерных реакторов на быстрых нейтронах для периодической и непрерывной очистки.

Одним из важных отрицательных моментов диффузионной ловушки является опасность ее забивания при резких аварийных повышениях концентрации примесей в контуре.

По способу компоновки ловушки бывают интегральные и петлевые. Интегральная ловушка представляет собой встроенную в бак ректора ХЛ (ловушка в реакторе Superphenix). Петлевая ловушка — ловушка, вынесенная за пределы бака реактора. Ловушки такого типа используются в реакторах в России, США, Англии. Основные преимущества и недостатки интегральных и петлевых ловушек представлены в разделе 2.6.

#### 2.2 Холодные ловушки

Холодная очистка является основным способом удаления примесей из натрия действующих промышленных и экспериментальных установок.

XЛ представляет собой тепломассообменное устройство, которое служит для непрерывной или периодической очистки циркулирующего через него теплоносителя. Простейшая холодная ловушка представляет собой любую поверхность, достаточно холодную для того, чтобы на ней произошло осаждение растворенной примеси [1].

Принцип работы XЛ основан на удержании растворенных примесей за счет выкристаллизации их из теплоносителя при охлаждении, а также частично взвесей за счет механической очистки. Поскольку растворимость окислов натрия в натрии падает с уменьшением температуры, то очистка металла от окислов будет тем лучше, чем ниже температура металла в ловушке [5].

Основные параметры ловушки, к которым выдвигают требования при ее проектировании:

- объем ловушки;
- соотношение между объемами зон внутри ловушки;
- обеспечение необходимого температурного и гидравлического режимов.

Рекомендуется проектировать  $X\Pi$ , состоящую из трех зон, в следующем соотношении, % от общего объема [14]:

- 1) зона охлаждаемого отстойника 30–40;
- 2) зона окончательного охлаждения 30–37;
- 3) зона фильтрации 40–23.

При выборе конструкции необходимо учитывать следующие интегральные характеристики XЛ:

- скорость очистки теплоносителя;
- емкость по накапливаемым окислам;
- эффективность удержания примесей [15].

Для конструкций ХЛ и режимов их работы характерны:

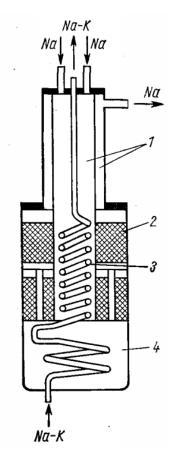
- большие эквивалентные гидравлические диаметры, изменяющиеся в процессе накопления примесей;
  - малые скорости теплоносителя;
  - значительные температурные перепады;
- изменяющиеся во времени концентрации примесей и их состав в теплоносителе [16].

Проточные XЛ — основные устройства очистки натрия от кислорода, водорода, трития, частично продуктов коррозии конструкционных материалов и некоторых продуктов деления. На рис. 12 представлена схема проточной XЛ.

Для очистки небольших контуров при сравнительно невысоких требованиях к чистоте натрия может быть использована ХЛ диффузионного типа, представляющая собой тупиковую трубу, приваренную к трубопроводу, по которому циркулирует теплоноситель.

Поступление примесей из потока к холодной поверхности ХЛ зависит от естественной конвекции, вызываемой турбулентностью у входа в ловушку. Емкость ХЛ с естественной конвекцией по окиси натрия составляет около 20 % [1]. По факту диффузионная ловушка (ловушка с естественной конвекцией) представляет собой устройство, которое не требует постоянного внимания после начала ее эксплуатации. ХЛ непрерывно медленно удаляет кислород до тех пор, пока содержание окиси натрия в ловушке не достигнет 20 % по весу от общего содержимого в ловушке.

Необходимые условия для эффективной работы диффузионной XЛ:



1 – рекуператор; 2 – зона фильтрации; 3 – зона охлаждения; 4 – зона отстаивания

Рис. 12. Схема проточной ХЛ [6]

- отсутствие на входе в XЛ значительных градиентов температур (из этого следует, что зона осаждения примесей и зона охлаждения металла должны быть совмещены);
- поддержание в зоне кристаллизации минимальной температуры жидкого состояния;
- организация достаточно эффективного конвективного массообмена в зоне охлаждения кристаллизации [6].

#### 2.3 Отечественные разработки ХЛ

В СССР за основу при создании промышленных ловушек принята конструкция, в которой рекуператор тепла (если он предусматривался) выполняется обязательно регулируемым, отстойник делается охлаждаемым, а зона фильтрации состоит из нескольких параллельных секций с увеличивающейся по ходу очищаемого теплоносителя плотностью набивки в каждой секции. Охлаждение теплоносителя в отстойнике с одновременным использованием расположенных над ним зон окончательного охлаждения и фильтра увеличивает эффективность работы ловушки и практически полностью исключает выброс примесей в контур.

Модель XЛ (рис. 13) реактора БР-5 представляла собой цилиндр, рабочий объем которого был заполнен насадкой из нержавеющей проволоки. Ловушка охлаждалась кипящим толуолом. Данная конструкция ловушки обеспечивала охлаждение натрия до заданной температуры, исключая его замерзание в любой части ХЛ. Ниже представлены основные характеристики ловушки БР-5. Однако емкость ХЛ по окиси натрия составляла лишь 1,5% об. Для улучшения этого показателя перед испытанием вторая ловушка такого типа была модернизирована (удалена насадка из входного канала и добавлен отстойник). Что способствовало увеличению емкости ХЛ до 3% об [17].

На рис. 14 представлена конструкция XЛ, охлаждаемой сплавом Na-K, разработанная в СССР.

Характеристики ХЛ реактора БР-5 [4]:

Расход теплоносителя через ловушку, м <sup>3</sup> /ч	0,8
Объем ловушки, м <sup>3</sup>	0,2
Охлаждающая среда	
1 контуркипяш	ций толуол
2 контур	вода
Тип насадки фильтра	стружка
Емкость ловушки по примесям, %	1,5–3
Эффективность очистки от окислов, млн $^{-1}$	·····≤ 10

При создании XЛ с большей емкостью (для использования на БОР-60, БН-350 и БН-600) проводились многочисленные расчетно-теоретические и

экспериментальные исследования. На рис. 15 представлена XЛ, используемая на БОР-60, далее указаны ее характеристики. Опыт эксплуатации такой ловушки показал, что они работают надежно и обеспечивают достаточно эффективную очистку натрия.

Кратко способ очистки XЛ БОР-60 представлял собой следующий процесс:

- предварительное охлаждение теплоносителя в рекуператоре;
- поступление теплоносителя из рекуператора в охлаждаемую водой зону отстоя (объем которой  $0.6 \text{ м}^3$ , температура в зоне -120– $140 ^{\circ}$ C) по центральной трубе;
- поступление в зону фильтрации. Зона фильтрации объемом  $0,4~{\rm M}^3$  состояла из двух частей, каждая из которых имела три зоны фильтров из стружки [17].

#### Характеристики ХЛ БОР-60 [18, 4]:

1 1 , 3
Расход теплоносителя через ловушку, $M^3/4$
Объем ловушки, м <sup>3</sup>
Охлаждающая среда вода
Тип насадки фильтра стружка нержавеющей стали,
плотность набивки 100, 200 и 400 кг/м $^3$
Эффективность очистки от окислов, млн $^{-1}$ ————————————————————————————————————
Очистка от примесейкислород, радиоактивные изотопы,
изотопы цезия, кобальта и др.

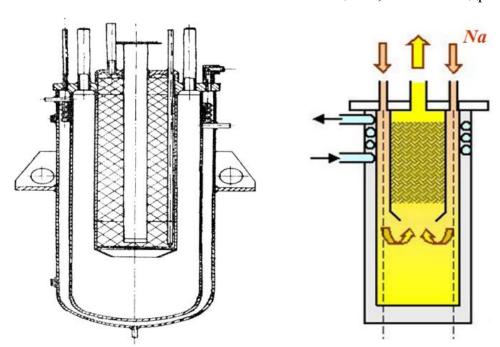
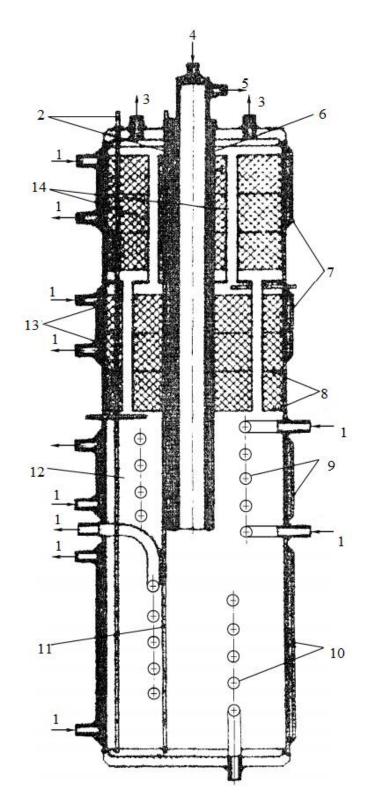
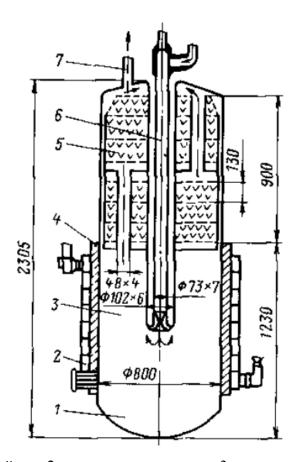


Рис. 13. XЛ примесей реактора БР-5 и прототип XЛ реактора БР-5, испытанный на стенде [17]



1 — сплав Na-K; 2 — карманы термопар; 3 — выход Na из XЛ; 4 — вход Na в XЛ; 5 — сброс Na с газом; 6 — теплоизолирующий воздушный зазор; 7 — охлаждение фильтров; 8 — решетки; 9 — змеевик и рубашка зоны окончательного охлаждения; 10 — змеевик и рубашка отстойника; 11 — отстойник; 12 — зона окончательного охлаждения; 13 — зона фильтрации; 14 — перепускные трубы

Рис. 14. Конструкция XЛ, охлаждаемой сплавом Na-K [12]



1 – охлаждаемый отстойник;
 2 – водяное охлаждение;
 3 – зона окончательного охлаждения;
 4 – металлическая предохранительная прослойка между охлаждающим поясом и корпусом ловушки;
 5 – изотермический фильтр;
 6 – центральная изотермическая труба для входа натрия в ловушку;
 7 – выход натрия из ловушки

Рис. 15. Холодная ловушка БОР-60 [4]

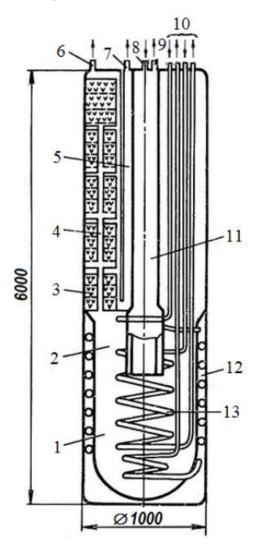
ХЛ БН-350 представляет собой вертикальный сосуд высотой 6000 мм и диаметром 1000 мм из нержавеющей стали, характеристики ловушки представлены ниже. На рис. 16 изображена ХЛ БН-350. Данные ловушки поддерживают необходимую чистоту теплоносителя при всех режимах работы установки. Кроме нерадиоактивных примесей, ловушки накапливают и радиоактивные изотопы, такие как йод и цезий. ХЛ на БН-350 обеспечивала очистку натрия, в том числе и при аномальных загрязнениях от водорода, кислорода и продуктов взаимодействия его с водой. На реакторе БН-350 ХЛ первого контура отработали весь ресурс без замены [3].

## Характеристики ХЛ БН-350 [19]:

Расход натрия через XЛ, м <sup>3</sup> /ч	7–10
Температура натрия на выходе из XЛ, °С	120
Объем ловушки, м <sup>3</sup>	3
Охлаждающая среда	
Типа насадки фильтра	стружка
Емкость ловушки, кг	

Процесс очистки в XЛ БН-350 происходит следующим образом. Теплоноситель поступает в центральную трубу, выполняющую роль рекуператора, где частично охладившись, поступает в зону охлаждения. В зоне охлаждения натрий проходя змеевидный холодильник, остывает до температуры кристаллизации окислов. Зона охлаждения совмещена с отстойником, который дополнительно охлаждается за счет протока сплава натрий калий по наружной его поверхности. Из отстойника натрий, очищенный от окислов, поднимается вверх и проходит через фильтрующие элементы, расположенные между наружным корпусом ловушки и внешней трубой рекуператора. Очищенный натрий поступает во внешнюю полость рекуператора, где нагревается от входящего натрия.

Основным отличием XЛ реакторов БОР-60 и БН-350 от БР-5 являлось то, что основное охлаждение было перенесено в отстойник, а над ним последовательно располагалась зона окончательного охлаждения и фильтрации [3].



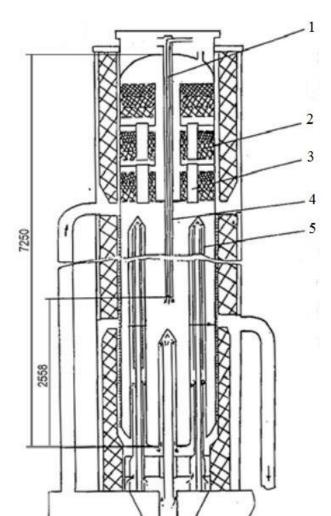
- 1 зона отстаивания-охлаждения;
- 2 зона окончательного охлаждения;
- 3 зоне фильтрации;
- 4 перепускные трубы;
- 5 кольцевой канал рекуператора;
- 6 выход натрия из ловушки через байпас рекуператора;
- 7 выход натрия из рекуператора;
- 8 вход натрия в ловушку;
- 9 сброс газа;
- 10 вход и выход охлаждающего сплава натрий–калий из рубашки и змеевика;
- 11 центральный канал рекуператора;
- 12 рубашка;
- 13 змеевик

Рис. 16 – ХЛ БН-350 [3]

Следующим этапом модернизации холодных ловушек была разработка XЛ для БН-600. Научно-исследовательские работы были направлены на обоснование ловушки, охлаждаемой воздухом (первоначально предполагалось, что ловушки первого контура будут охлаждаться азотом). В исследованиях, проводимых до 1970 г., использовались участки, в которых в проточной зоне охлаждения вынужденная и естественная конвекции действовали в одну сторону (параллельная смешанная конвекция (ПСК)). После нее натрий поступал в изотермический отстойник, а затем в фильтр.

Было установлено, что отложение окиси натрия в зоне охлаждения начинается практически сразу, как только раствор становится пересыщенным, что является основной причиной ограничения емкости  $X\Pi$  — происходит локальное перекрытие проходного сечения.

Конструкция ХЛ БН-600 представлена на рис. 17, технические характеристики приведены далее.



- 1 центральная труба входа натрия;
- 2 фильтр;
- 3 проточная трубка;
- 4 кольцевая труба;
- 5 трубка воздушного охлаждения

Рис. 17. ХЛ БН-600 [20]

#### Характеристики ХЛ БН-600 [2,20]

Расход натрия через ловушку, $M^3/V$	8
Температура натрия	
на входе, °С	300
на выходе, °С	120
Объем ловушки, м <sup>3</sup>	8
Охлаждающая среда	воздух
Расход воздуха на охлаждение, м <sup>3</sup> /ч	35000
Емкость ловушки по примесям, кг	1600–1800

XЛ БН-600 представляет собой стальной цилиндрический сосуд длиной 7250 мм и диаметром 1230 мм.

ХЛ имеет три зоны:

- зона фильтрации трехсекционный фильтр их нержавеющей стали с различной плотностью набивки;
  - зона окончательного охлаждения;
  - зона отстоя.

В зонах отстоя и окончательного охлаждения расположено 8 труб воздушного охлаждения. Подача натрия происходит по центральному каналу (при закупорке имеется резервная подача по кольцевому каналу). Разогрев ХЛ осуществляется специальной электрической секционной печью, охлаждение — воздушным вентилятором (одна часть подается в трубы охлаждения, другая — на охлаждение корпуса ХЛ) [20].

В настоящее время ведутся работы в направлении разработки XЛ для перспективного реактора на быстрых нейтронах большой мощности. В результате исследований, выполненных в АО «ОКБМ Африкантов» и АО «ГНЦ РФФЭИ», для перспективного реактора на быстрых нейтронах большой мощности предложены две конструкции XЛ: с охлаждением аргоном и натрием. Показано, что охлаждение XЛ жидкометаллическим теплоносителем позволит исключить опасность, обусловленную применением аргона под давлением 1,5 МПа, и будет способствовать улучшению характеристик XЛ [20].

### 2.4 Зарубежные проекты и разработки

В 70-х годах в институте ядерных исследований РЖЕЖ были разработаны и сконструированы три вида холодных ловушек, основные характеристики которых представлены в таблице 2. Регулируемый температурный режим  $110-210~^{\circ}\mathrm{C}$  в зоне фильтрации XЛ позволяет добиться снижения концентрации окислов до значения около  $10^{-3}$ %.

На рис. 18–25 представлены различные конструкции XЛ, которые были разработаны научными организациями ранее, но не все были реализованы.

Таблица 2. Характеристики холодных ловушек, разработанных в РЖЕЖ [16]

Обозначение	Облом нотрия п	Рабочая	Расход,	Охлаждающая
Обозначение	Объем натрия, л	температура, °С	л/мин	среда
С-Ш	6,46	150	1,2	тетрагидрона- фталин
CMT-1	175	300	9	толуол
СПС	250	300	3,3	воздух

Модель XЛ на рис. 18 была разработана и сконструирована для использования в индийском быстром натриевом исследовательском реакторе FBTR (Fast Breeder Test Reactor). Охлаждающая среда — Na-K. Объем ловушки составлял 360 литров. Процесс очистки представляет собой следующий процесс: натрий входит в XЛ (в соответствии с рис. 18) и разветвляется за пределами концентрической оболочки перед входом в проволочную сетку. После прохождения через проволочную сетку натрий накапливается внутри концентрической оболочки и покидает XЛ. Ловушка снабжена змеевиком для охлаждения в оболочке из сплава Na-K вокруг чехла.

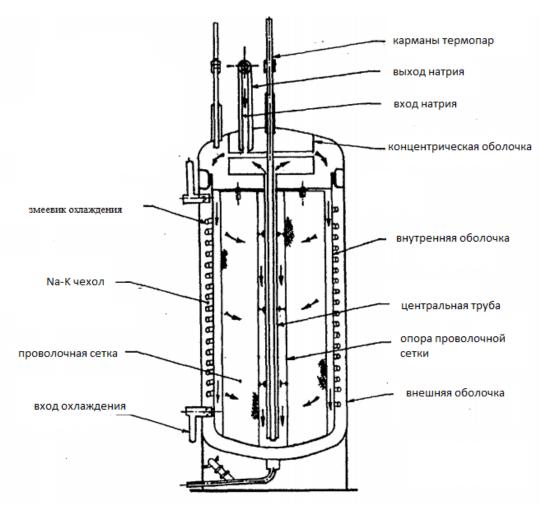


Рис. 18. XЛ второго контура реактора FBTR [21]

На рис. 19 представлена ловушка, предназначенная для использования на KALIMER-600 (быстрый натриевый реактор мощностью 600 МВт (эл.) бассейнового типа, который не был построен). Основные размеры данной ловушки:

- внутренний диаметр 257 мм;
- высота 578 мм;
- объем ~ 26 литров.

Основные отличия XЛ на KALIMER-600:

- 1) дополнительные линии:
- линия подачи пара и азота;
- линия розлива воды;
- линия выхода газа-реагента;
- линия подачи жидкого реагента.
- 2) замена воздуха на газообразный азот.

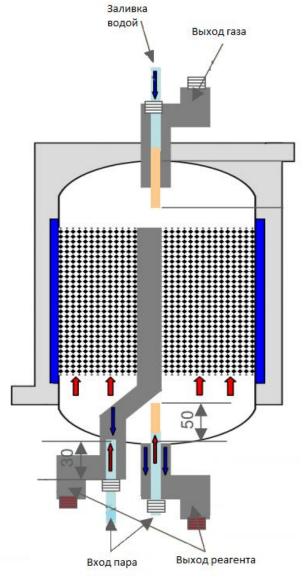


Рис. 19. ХЛ на KALIMER-600 [22]

XЛ для французского энергетического реактора-размножителя на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем Superphenix мощностью 1242 МВт представлена на рис. 20.

XЛ включает в себя экономайзер в верхней части, кассету с проволочной сеткой в нижней части и контур наружного охлаждения. Контур наружного охлаждения бывает двух видов, в зависимости от размеров ХЛ:

- петля органической жидкости, погруженная в жидкий теплопроводник (сплав Na-K) – в случае ловушек большого размера;
- петля органической жидкости, погруженная в воздух в случае ловушек среднего размера [23].

XЛ для реактора Superphenix работают следующим образом: натрий охлаждается внутри ловушки; растворимость водорода и кислорода в натрии уменьшается, а гидрид и оксид выпадают в осадок в сетчатом картридже, который имеет большую площадь на единицу объема (около 350  $\text{м}^2/\text{m}^3$ ). Основные технические характеристики XЛ для реактора Superphenix представлены ниже.

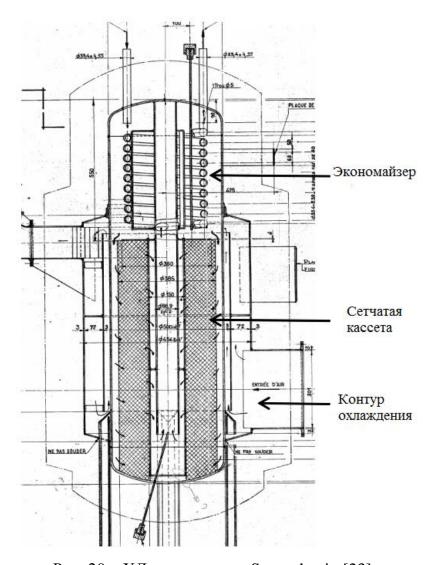


Рис. 20 – XЛ для реактора Superphenix [23]

#### Технические характеристики XЛ Superphenix [4]:

 Расход теплоносителя через ловушку, м³/ч
 60

 начальная очистка
 10

 Объем ловушки, м³
 1,2

На рис. 21а—в изображены ХЛ, используемые на экспериментальном стенде FFTF (Fast Flux Test Facility), мощностью 400 МВт (тепл). Данные ловушки размещены в различных частях стенда.

На рис. 22 представлена холодная ловушка реактора KNK-II, первого немецкого экспериментального реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.

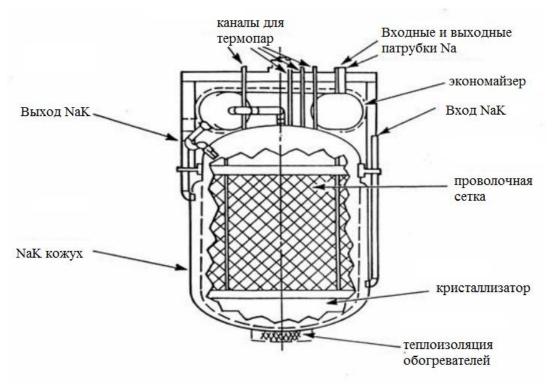
XЛ данного образца состоит из интегрированного блока с теплообменником и зоной фильтрации. Половина зоны фильтрации содержит проволочную сетку, вторая половина – уплотнительное кольцо. Охлаждение ловушки происходит газообразным азотом.

Для реактора на быстрых нейтронах SNR-300 (который планировали построить в Германии, но так и не запустили) была разработана усовершенствованная модель ХЛ, используемая в реакторе KNK-II. Она представляла следующую конструкцию: охлаждаемая газом ловушка с вынесенным теплообменником. Наполнение — кольца Рашига (1 м³), объем натрия — 1,65 м³. Емкость ХЛ по примесям — 200—300 литров.

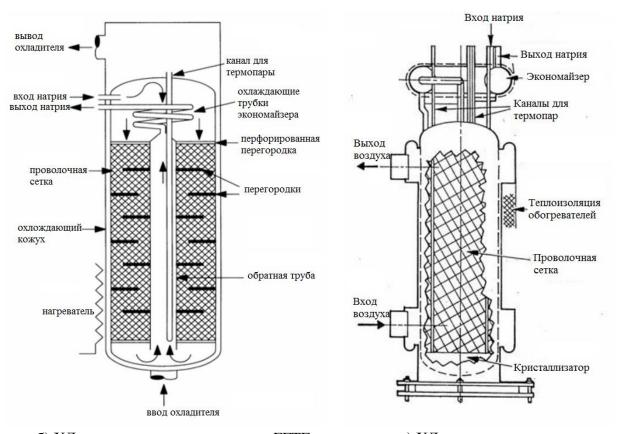
Ловушка установки HNPF изображена на рис. 23.

Технические характеристики XЛ установки HNPF [4]:

Диаметр ловушки, м	0,5
Объем ловушки, л	550
Емкость ловушки по окислам, %	17
Охлаждающая среда	азот



а) ХЛ первого контура



б) XЛ экспериментального стенда FFTF

в) ХЛ второго контура

Рис. 21. XЛ экспериментального стенда FFTF [24]

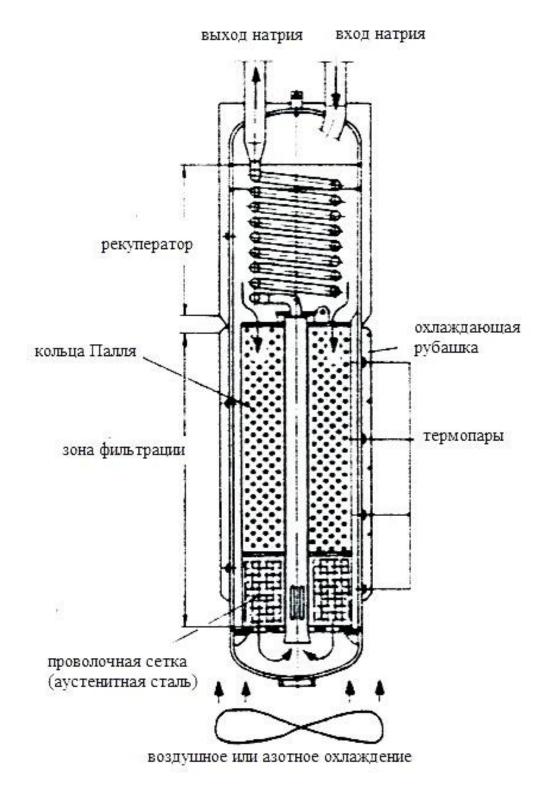
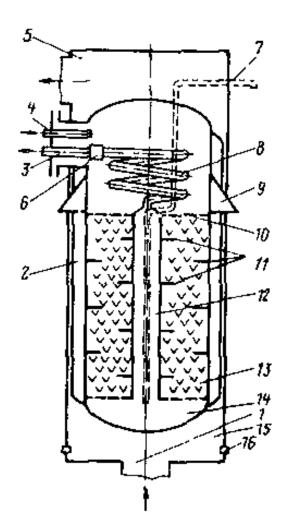


Рис. 22. XЛ реактора KNK-II [25]



1, 5 – вход и выход охлаждающего азота;

- 2 продольные ребра;
- 3,4 выход и вход натрия в ХЛ;
- 6 скользящее соединение;
- 7 изолированный азотный канал;
- 8 змеевик рекуператора;
- 9 опоры;
- 10 верхняя перфорированная пластина;
- 11 пластины, распределяющие поток в зоне охлаждения;
- 12 центральная труба;
- 13 набивка из нержавеющей сетки;
- 14 отстойник;
- 15 полость азота;
- 16 лабиринтное уплотнение

Рис. 23. XЛ установки HNPF [4]

Изначально конструкция ХЛ для американского реактора SRE (от англ. — Sodium Reactor Experiment) была аналогична ловушке для БР-5, имея лишь два отличия: теплоноситель поступал в зону охлаждения, заполненную насадкой, снизу и двигался вверх и конденсатор толуола был выносным [4].

На реакторе SRE использовались два типа холодных ловушек:

- с кипящей охлаждающей жидкостью (кипящий толуол);
- с принудительной конвекцией.

В ловушке первого типа температура поступающего натрия опускалась ниже температуры насыщения, за счет чего происходило осаждение оксида натрия. Осажденный оксид собирался на витках проволочной сетки, которая служила фильтром для сбора взвешенных частиц оксида. В ХЛ данного типа температура кожуха поддерживалась постоянной (112 °C) с помощью кипения толуола при атмосферном давлении. На рис. 24 изображена полная схема ловушки в виде сборки, показывающая толуольный цикл и экономайзер натрия [26]. Процесс работы такой ловушки выглядел следующим образом:

- поток исходного натрия поступал в экономайзер, где охлаждался и попадал в ловушку;
- поступающий натрий отдавал большую часть тепла толуолу и некоторое количество тепла натрию, циркулирующему по центральной трубе;
  - толуол кипел во внешнем кожухе;
- пары толуола поднимались вверх и попадали в конденсатор. Далее конденсировались при помощи охлаждения тетралином. Конденсат возвращался в резервуар, а жидкий толуол под действием силы тяжести возвращался в кожух;
- температура натрия опускалась ниже температуры насыщения, и происходило осаждение оксидов натрия на сетке из нержавеющей стали;

Характеристики XЛ с кипящим охладителем реактора SRE [4,26]:
Охлаждающая среда толуол
Скорость улавливания кислорода, кг/ч0,0041
Емкость ловушки, кг
по кислороду
по оксидам натрия
Температура натрия, °С
на входе
на выходе
Температура толуола, °С
на входе
на выходе
Расход теплоносителя через ловушку, $M^3/4$
Фильтрсетка из нержавеющей стали

В ловушке второго типа (рис. 25) в качестве охлаждающей жидкости использует тетралин, который проходит по кожуху ХЛ. Движение потока исходного натрия происходит снизу вверх по кольцевому пространству. Сетка из нержавеющей стали в центральной трубе была отделена. Байпасные трубы были установлены для обеспечения дополнительной площади фильтрации.

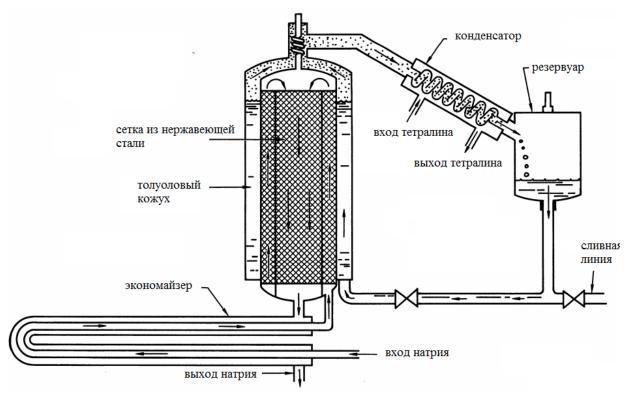


Рис. 24. XЛ с кипящим охладителем реактора SRE [26]

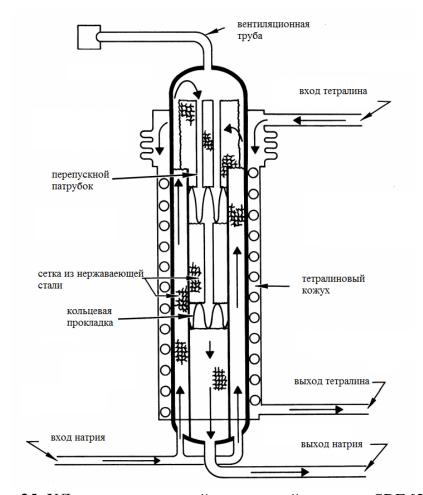


Рис. 25. XЛ с принудительной конвекцией реактора SRE [26]

# Характеристики ХЛ с принудительной конвекцией реактора SRE: Охлаждающая среда тетралин Скорость улавливания кислорода, кг/ч 0,0091 Емкость ловушки, кг 1,27 по кислороду 4,9 Температура натрия, °С 174 на входе 152 Температура толуола, °С 38 на входе 38 на выходе 61

Все рассмотренные XЛ относятся к одному типу, а именно — петлевые ловушки, далее будет рассмотрен еще один тип — интегральные или встроенные. Основные преимущества и недостатки такого типа описаны в п. 2.6.

Фильтр..... проволока из нержавеющей стали

На данный момент ведутся разработки встроенной в бак реактора XЛ с двумя охлаждающими средами: натрий и газ (аргон).

Преимущества натрия как охлаждающей среды для ХЛ:

- теплофизически и коррозионно пригодная охлаждающая среда;
- твердое агрегатное состояние при комнатной температуре;
- плавление при температуре не выше 100 °C;
- попадание охлаждающего натрия в натрий первого контура не вызывает отрицательных эффектов в контуре.
- натриевое охлаждение позволяет получить более экономичное использование объёма внутри ловушки;
- положительный опыт эксплуатации натриевых контуров для охлаждения различных устройств.

Основные задачи встроенной в бак реактора системы очистки натрия:

- обеспечить требуемую чистоту теплоносителя в условиях длительной эксплуатации АЭС на номинальных параметрах;
- иметь необходимую ёмкость по примесям, которые поступают в теплоноситель первого контура с учетом всех режимов эксплуатации (включая аварийное загрязнение);
- иметь производительность, гарантирующую очистку теплоносителя от примесей при планово-предупредительных ремонтах, перегрузках топлива и аварийных загрязнениях [27].

Разработано несколько версий встроенных в бак реактора ловушек:

– XЛ с аргоновым охлаждением длиной более 15 м (геометрические параметры были далеки от оптимальных);

- оптимизированная ХЛ с охлаждением аргоном под давлением
   1,5 МПа. Высота ловушки уменьшена. Расчётная вместимость по примесям
   350 кг. Ловушка имеет объём рабочей полости (РП) 1,75 м³;
- ХЛ с натриевым охлаждением. Ловушка имеет такие же габаритные размеры, как оптимизированная ловушка с аргоновым охлаждением, но объем её РП может быть существенно больше. Внутри установлен змеевик. Охлаждающий натрий циркулирует по двум трактам охлаждения: снаружи корпуса РП в рубашке и по расположенному внутри РП змеевику [27].

В таблице 3 представлены основные характеристики ХЛ с двумя охлаждающими средами: натрий и аргон.

**Таблица 3**. Сравнение характеристик аргонового и натриевого охлаждения ХЛ [14]

Аргоновое охлаждение	Натриевое охлаждение			
Концентрация кислорода, млн <sup>-1</sup>				
3	1,5			
Время очистки (тремя ХЛ от	г концентрации 20 млн <sup>-1</sup> ), ч			
1300 (до 3,3 млн <sup>-1</sup> )	870 (до 2 млн <sup>-1</sup> )			
300 (до 10 млн <sup>-1</sup> )	$200 (до 10 млн^{-1})$			
Эффективность теплопередачи				
на «грязной» XЛ недостаточна	недостаточна			
Конструкторские решения				
отсутствуют дополнительные охлажда-	наличие дополнительных охлаждаю-			
ющие поверхности в РП	щих поверхностей в РП – змеевик			
Безопасность				
– опасность аварии с разгерметизацией	<ul> <li>опасность прекращения охлажде-</li> </ul>			
полости аргона с 1.5 МПа;	ния;			
– опасность прекращения охлаждения;	– аккумуляция водорода в ХЛ			
– аккумуляция водорода в ХЛ				

# 2.5 Геттерная очистка

Геттерная очистка — процесс очистки теплоносителя с использованием геттера, вещества, поглощающего и прочно удерживающего газы (кроме инертных), связывая их за счёт хемосорбции. Материал, используемый в качестве геттера, должен удовлетворять многим требованиям, одним из которых является способность геттера восстанавливать окись натрия [3].

Геттерная (горячая) ловушка представляют собой устройство, принцип действия которого основан на геттерной очистке. Типичная конструкция горячей ловушки с техническими характеристиками, представленными ниже, изображена на рис. 26.

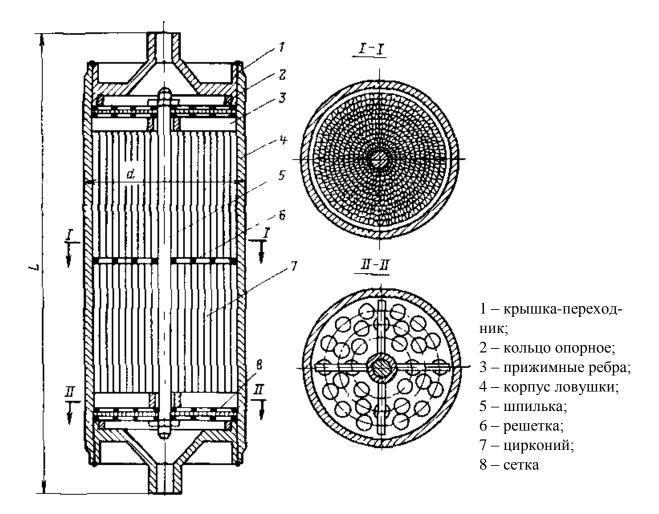


Рис. 26. Типичная конструкция горячей ловушки [4]

## Характеристики горячей ловушки:

Геттер	циркониевая фольга
Толщина циркониевой фольги, мм	0,1 или 0,3
Скорость натрия через горячую ловушку, м/с	0,6
Минимальная концентрация кислорода, млн-	12-5
Рабочая температура, °С	550–650

Первоначально горячая ловушка использовались для ЯЭУ на космических аппаратах типа БУК, ТОПАЗ, учитывая особенности их автономной эксплуатации и более высокий уровень температур, для очистки теплоносителя (эвтектический сплав натрий-калий) с геттером из йодидного циркония.

При подборе материала геттера необходимо рассматривать следующие характеристики:

– термодинамическая оценка возможности протекания реакции восстановления в нужном направлении и с достаточной глубиной (необходимое условие для восстановления натрия — уменьшение изобарно-изотермического потенциала реакции (свободная энергия Гиббса));

- коэффициент распределения отношение концентрации примеси в геттере к концентрации этой примеси в теплоносителе (растворе) в равновесном состоянии при данной температуре;
- коррозионное воздействие геттерного металла на конструкционные материалы;
  - температуру взаимодействия геттера с натрием;
  - допустимый привес геттера при росте температуры.

Геттеры должны удовлетворять определенным требованиям:

- не должны быть более агрессивными, чем удаляемая примесь, по отношению к конструкционным материалам;
- не должны увеличивать остаточную радиоактивность жидкометаллического теплоносителя;
- продукты реакции должны быть менее растворимы, чем удаляемая смесь [4].

В основном используемые геттеры делят на две группы: легкорастворимые (магний, литий, кальций) и труднорастворимые (цирконий, титан, иттрий). Основными преимуществами геттерных ловушек являются простота конструкции, не требующая постоянного обслуживания, и высокая эффективность. К недостаткам относятся малая емкость ловушек по отношению к примесям и малая скорость удаления примесей при низких температурах.

В работе [28] Нааг исследовал 12 металлов в качестве геттера для очистки натрия от кислорода (табл. 4). Исследования проводились при температуре  $540\,^{\circ}\mathrm{C}$ .

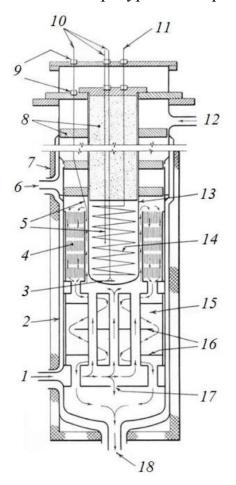
Таблица 4. Результаты эксперимента очистки натрия различными геттерами

Готтор	Содержание кислорода, 10-4 вес.%		
Геттер	до очистки	после очистки	
Mg	38	19	
Ca	45	27	
Ba	42	27	
Ti	39	34	
Cr	19	26	
Sr	30	74	
As	30	43	
Cl	17	66	
Sn	21	44	
Ni	28	78	
Be	23	75	
Cs	38	58	

Наиболее эффективными геттерами себя проявили магний, барий и кальций. Большое распространение как геттерный материал получил титан. Многие исследователи, в том числе Нааг, Боумен, проводили исследования в направлении использования титана как геттерного материала.

Исследуя возможность использования горячей ловушки для очистки натрия первого контура от примеси кислорода было установлено, что при номинальных параметрах (температура теплоносителя, омывающего геттер, равна 550 °C) может быть обеспечена необходимая производительность и емкость горячей ловушки с геттером в виде фольги из йодидного циркония в ограниченном объеме.

Однако в стояночных режимах (температура теплоносителя составляет 250–300 °C) производительность горячей ловушки с йодидным цирконием снижается более чем на четыре порядка. Имеются геттеры, у которых постоянная, характеризующая взаимодействие с кислородом в натрии, на порядок выше, чем для йодидного циркония. Однако и это не позволяет существенно упростить конструкторские решения, обеспечивающие необходимую производительность. Поэтому была исследована возможность очистки от кислорода низкотемпературными сорбентами [29].



- 1 вход жидкого металла;
- 2 -кожух ловушки;
- 3 детектор течи;
- 4 циркониевая фольга;
- 5 термопары;
- 6 основной вентиль жидкометаллического контура;
- 7 теплоизоляция;
- 8 экран;
- 9 кабельные уплотнения;
- 10 детектор течи и основная термопара;
- 11 основной силовой кабель;
- 12 вход азота в систему охлаждения;
- 13 контейнер нагревателя;
- 14 нагреватель (35 кBт);
- 15 рекуперативный теплообменник;
- 16 перегородки;
- 17 байпасное отверстие;
- 18 выход жидкого металла

Рис. 27. Конструкция горячей ловушки реакторной установки DFR [29]

На рис. 27 представлена модель горячей ловушки для реактора DFR с основными техническими характеристиками [29]:

Температура теплоносителя в ловушке, °С	C600
Расход через ловушку, м <sup>3</sup> /ч	3,43
Геттер	циркониевая фольга
Площадь поверхности геттера, м <sup>2</sup>	372
Толщина фольги, мкм	127
Электрическая мощность, кВт	35

При очистке натрия и натрий-калиевого сплава в качестве геттера может быть использована фольга толщиной не менее 0,3 мм:

- из циркония (и его сплавов) при температуре 550–650 °C (для очистки от кислорода и в меньшей мере от водорода);
- стали типа X18H10T при температуре до 700 °C (для очистки от углерода [29]).

На рис. 28 рассмотрена модель горячей ловушки для реактора SRE с основными техническими характеристиками [4, 26]:

Температура теплоносителя, °С	
на входе в ловушку	630
на выходе из ловушки	650
Расход через ловушку, м <sup>3</sup> /ч	1,36
Геттерци	ркониевая фольга
Площадь поверхности геттера, м <sup>2</sup>	400
Толщина фольги, мкм	100
Емкость ловушки по кислороду, предельная, кг	43,73
Скорость улавливания кислорода, кг/ч	0,0041
Электрическая мощность, кВт	30

# 2.6 Сравнение ловушек для очистки натриевого теплоносителя

Результаты представленного выше анализа систем очистки теплоносителя в контуре позволяют провести сравнение для более полного понимания рассматриваемого вопроса.

Холодные ловушки являются основными устройствами очистки натрия в контурах быстрых реакторов. Сфера исследований в области ХЛ весьма разнообразна и получила освещение в большом количестве научных работ. Первое, на что стоит обратить внимание, — это сопоставление ХЛ по мере их развития. В таблице 5 представлены параметры имеющихся холодных ловушек для различных реакторов, систематизированные из представленного выше материала.

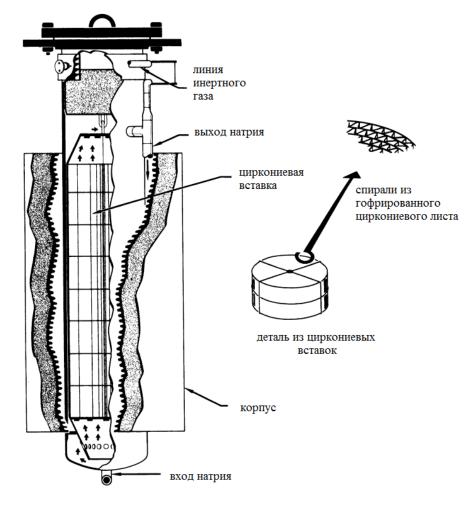


Рис. 28. Конструкция горячей ловушки реакторной установки SRE [26]

На основании данных таблицы 5 можно сделать следующие выводы:

- XЛ обладают высокой эффективностью очистки теплоносителя от окислов;
- основные охлаждающие среды: воздух, NaK, толуол, реже тетрагидронафталин;
- практически у всех образцов в качестве насадки фильтра используется стружка из нержавеющей стали, с одним лишь отличием плотность набивки.

Сказанное позволяет сделать заключение о необходимости продолжения исследований в следующих направлениях:

- поиск оптимальной охлаждающей среды;
- увеличение емкости ловушек по примесям;
- варьирование различных типов насадки фильтра. Исследований в данной области мало, и все они используют в качестве насадки стружку из нержавеющей стали.
  - встройка ловушки в бак реактора.

Таблица 5. Сравнение ХЛ первых контуров АЭС

Объем ХЛ, м <sup>3</sup>	Охла- ждаю- щая среда	Расход теплоносителя через ХЛ, м <sup>3</sup> /ч	Тип насадки фильтра	Емкость ХЛ по приме- сям, кг/ об %	Эффектив- ность очистки от окислов, млн <sup>-1</sup>
			БР-5		
0,2	1 контур – толуол 2 контур – вода	0,8	стружка из нержавею- щей стали	(1,5 – 3) %об	≤ 10
			БОР-60		
1,2	вода	0,8–1,2	стружка из нержавею- щей стали, уд. поверх- ность $0.7 - 0.8 \text{ m}^2/\text{kr}$	-	1–4
			БН-350		
3	NaK	8	стружка из нержавею- щей стали	600/20	3–5
			БН-600		
6	воздух	8	трехсекционный фильтр из нержавеющей стружки с различной плотностью набивки: 100, 200 и 400 кг/м <sup>3</sup>	1600/17	2–3
		Экспери	ментальный контур С-Ш	<u> </u>	
0,0065	тетрагид- ронафта- лин	0,072	стружка плотностью 0,32/0,40 кг/л	-	10
	Экспериментальный контур (СМТ-1)				
0,175	толуол	0,54	стружка плотностью 0,15/0,25/0,4 кг/л	-	10
			СПС-1		
0,25	воздух	0,198	стружка плотностью 0,1/0,2/0,4 кг/л	-	10
Superphenix					
1,2	NaK или воздух	начальная очистка – 60 непрерыв- ная очистка – 10	сетчатый картридж с площадью на единицу объема около $350 \text{ m}^2/\text{ m}^3$	-	-
HNPF					
0,55	азот	-	-	17 %об	-

Основной составляющей XЛ является охлаждающая среда. Преимущества и недостатки основных возможных охлаждающих сред XЛ представлены в таблице 6. Помимо представленных в табл. 6 охлаждающих сред XЛ, также могут использоваться толуол, тетралин, даутерм и др.

В таблице 7 приведено сравнение известных на данный момент горячих ловушек для различных установок с жидкометаллическим теплоносителем.

Таблица 6. Достоинства и недостатки различных охлаждающих сред для ХЛ

Преимущества	Недостатки
Na	ı-K
- возможность без труда регулиро-	- изменение свойств теплоносителя
вать теплосъем;	при попадании в него сплава Na-K
- небольшая поверхность теплосъема	
Вс	ода
простота контура охлаждения	<ul><li>сложная конструкция XЛ;</li></ul>
	<ul> <li>повышенные меры безопасности;</li> </ul>
	<ul> <li>применение фильтров для предвари-</li> </ul>
	тельной очистки
Газовое оз	хлаждение
– возможность плавного регулирова-	<ul> <li>необходимо учитывать требования к</li> </ul>
ния теплосъема;	месту выброса воздуха с учетом воз-
<ul> <li>небольшая вероятность тепловых</li> </ul>	можной аварийной течи металла в ХЛ;
ударов;	<ul><li>усложнение схемы АЭС</li></ul>
- высокая безопасность эксплуатации	
ловушки	

Таблица 7. Сравнение разработанных моделей горячих ловушек

Попомотр	Установка	Установка	Эксперименталь-	
Параметр	DFR	SRE	ные стенды	
Температура теплоносителя	600	650	650	
омывающего геттер в ловушке, °С	000	0.50	030	
Количество натрия, т	51,3	22,7	0,05	
Расход через горячую ловушку, м <sup>3</sup> /ч	3,43	1,36	1,5–2,5	
Геттер	циркониевая фольга			
Площадь поверхности геттера, м <sup>2</sup>	372	400	8,7	
Толщина фольги, мкм	127	100	100	
Электрическая мощность, кВт	35	30	_	

Опыт исследований в области геттерной очистки помогает сформулировать соответствующие выводы о состоянии наработок в этом направлении:

– недостаточное внимание уделено разработке горячих ловушек в качестве системы очистки от примесей в ЯЭУ;

– не подобран оптимальный геттерный материал для горячей ловушки, основной упор делается на циркониевую фольгу.

Несмотря на небольшой круг исследований в этой области горячие ловушки представляют большой интерес, связанный с двумя положительными моментами:

- стабильное улавливание в случае повышения температуры теплоносителя (во избежание выброса загрязнений);
- легко использовать для небольших экспериментальных стендов и резервуаров [30].

В таблице 8 приведено сравнение способов реакторной компоновки ловушек.

Таблица 8. Преимущества и недостатки компоновок различного типа

Тип компоновки				
Интегральная	Петлевая			
Преимуш	ества			
-отсутствие необходимости вывода натри-	-удобство в эксплуатации, техно-			
евых трубопроводов за пределы бака реак-	логичность;			
тора → исключается вероятность утечки	-схема очистки позволяет под-			
теплоносителя и пожара натрия;	ключать любые приборы кон-			
	троля примесей в теплоносителе;			
$-$ компактная система очистки $\rightarrow$ не требу-	-объем ловушки не ограничен;			
ется специального помещения для ее разме-	– двух-трех ловушек достаточно			
щения (сокращение строительных объемов)	на весь срок эксплуатации АЭС			
Недостатк	И			
-увеличение размеров реакторного бака →	- необходимость вывода натрие-			
усложнение конструкции всей ЯЭУ;	вых трубопроводов за пределы			
-ловушка имеет ограниченный объем и не-	бака реактора (вероятность			
большую емкость по примесям → низкая	утечки теплоносителя и пожара			
производительность и увеличение времени	натрия);			
очистки натрия до требуемого уровня чи-	– увеличение строительных объ-			
стоты;	емов АЭС			
-сложность операции замены ловушки,				
необходимость остановки реактора;				
-возможность выхода загрязненного при-				
месями натрия в бак реактора из ловушки;				
-возможность образования газообразного				
водорода и выхода его в бак реактора;				
-исключается возможность охлаждения ло-				
вушки воздухом (применение охлаждения				
азотом, аргоном усложняет схему АЭС)				

По ряду позиций можно считать целесообразным использование встроенной ловушки для реакторов большой мощности. В связи с этим были проведены исследования по разработке системы очистки для перспективного реактора на быстрых нейтронах (табл. 9) [20].

Таблица 9. Параметры ХЛ перспективного реактора на быстрых нейтронах

				Темпера-		
	Объем	Объем	Расход	тура вы-	Емкость	Производи-
ΧЛ	натрия	XЛ, м <sup>3</sup>	XЛ (G),	хода	по окиси	тельность
	$(V), M^3$	AJ1, M	$M^3/H$	натрия из	натрия, кг	(V/G), ч
				ХЛ, ℃		
Охлажде-	1900	1,75×3*	2,8×3*	150	350×3*	230
ние аргон	1900	1,73^3	2,0^3	130	330^3	230
Охлажде-	1900	1,86×3*	4×3*	150	441×3*	160
ние натрий	1900	1,00^3	4^3	130	441^3	100

<sup>\* -</sup> количество ХЛ

Проанализировав вместе таблицы 5 и 9 можно сделать следующий вывод: емкость системы очистки перспективного БН, охлаждаемой аргоном, уступает БН-600 почти в три раза, а при охлаждении натрием почти в 2,5 раза соответственно. Из чего следует, что время очистки теплоносителя первого контура перспективной ЯЭУ тремя ХЛ, охлаждаемыми аргоном, при равных условиях будет почти в три раза большим, чем для БН-600 [20].

Представленные выводы говорят о необходимости доработки предложенных систем очистки для перспективных реакторов.

Результаты исследований, проведенных в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», показывают, что очистка натрия от кислорода с использованием горячих ловушек, расположенных в баке реактора на быстрых нейтронах, при номинальных параметрах установки при температуре теплоносителя, омывающего геттер, 550 °C, позволяет обеспечить требуемую чистоту теплоносителя. Однако производительность горячей ловушки в стояночных режимах, когда температура теплоносителя, омывающего геттер, равна 250–300 °C, снижается на четыре порядка [29].

Рассмотрим для сравнения преимущества и недостатки холодных и горячих ловушек (табл. 10).

Основной вывод, который можно сделать, это возможность использования горячих ловушек для повышения производительности систем очистки, расположенных в ограниченном объеме, в условиях, когда основной примесью является кислород. Для этого необходимо провести ряд исследований для подбора необходимой конфигурации системы очистки.

Таблица 10. Преимущества и недостатки холодных и горячих ловушек

Преимущества	Недостатки
Холо	рдная
-хорошо удерживают кислород, водо-	очистка от продуктов коррозии, угле-
род, тритий, йод;	рода, цезия и других продуктов деле-
-очистка от кислорода и водорода во	ния неэффективна
всех режимах эксплуатации АЭС.	
Гор.	ячая
-с циркониевым геттером могут ис-	–для использования в стояночных ре-
пользоваться в высокотемпературных	жимах необходим подогрев натрия;
ЯЭУ и в натриевых реакторах большой	-имеющийся опыт по выбору геттера
мощности;	и по эксплуатации горячей ловушки на
– объем горячей ловушки в 7 раз меньше	натриевых стендах и на исследователь-
объема ХЛ;	ских ЯЭУ ограничен использованием
-опыт проектирования и эксплуатации	циркония в виде фольги
был получен на экспериментальных	
стендах и ЯЭУ космических аппаратов	

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенный анализ существующих систем очистки от примесей натриевого теплоносителя быстрых реакторов с акцентом на очистку жидкометаллического теплоносителя в контуре показывает, что проблема разработки наиболее эффективного метода очистки рассматривалась и рассматривается достаточно широко в области ядерной энергетики.

В препринте кратко рассмотрены существующие методы очистки жидкометаллических теплоносителей во время предварительной подготовки теплоносителя. При существовании довольно обширного количества различных способов очистки, большинство из них имеет слабое применение в практике жидкометаллических теплоносителей. Это связано с отсутствием экспериментальной базы того или иного способа.

Приведены способы очистки жидкометаллического теплоносителя в контуре ЯЭУ. Как и для дореакторной очистки, в контуре существует возможность использовать несколько способов очистки. Подробно изучена непрерывная фильтрация циркулирующего натрия с помощью холодных ловушек. При конструировании и рассмотрении холодных ловушек необходимо обращать внимание на распределение примесей по ее объему, эффективность каждой зоны ловушки, емкость ловушки по отношению к примесям, недопустимые режимы работы, при которых может произойти закупорка ловушки. Из второй главы также можно увидеть, что до сих пор ведутся теоретические и экспериментальные исследования, которые в основном направлены на повышение емкости ловушек по примесям. Положительные результаты, полученные при создании систем очистки отечественных установок БН-350, БН-600, свидетельствуют о целесообразности и эффективности проделанной работы.

Перспективным направлением исследований являются горячие ловушки, которые в свое время были сконструированы для использования на космических станциях, постепенно их роль для наземных ЯЭУ увеличивается. При всех положительных моментах, множествах исследований стоит также отметить, что одновременно целый ряд конкретных вопросов, связанных, например, с поиском оптимального геттерного материала для горячей ловушки остается мало изученным и исследованным. Практически весь имеющийся опыт по выбору геттера и по эксплуатации горячих ловушек на натриевых стендах и на исследовательских ЯЭУ ограничен использованием циркония в виде фольги или мелкодисперсных гранул в качестве геттерного материала.

Анализ существующих систем очистки или проектов на стадии разработки показал, что имеются возможности повышения технологических характеристик систем очистки. Холодные ловушки — неотъемлемый элемент системы очистки первого контура, в то же время горячие ловушки позволяют обеспечить очистку жидкометаллического теплоносителя в первом контуре от кислорода при работе как на номинальном режиме, так и в стояночных режимах при подогреве теплоносителя в них [3].

При размещении систем очистки в баке реактора из-за ограниченности объема, требования к характеристикам систем очистки по производительности и емкости повышаются. Для выполнения этих требований целесообразно использовать систему очистки, включающую как холодные, так и горячие ловушки.

При всей значимости проведенных исследований, полученные результаты не исчерпывают многих проблем, роль которых повысилась в последнее время в связи с проектированием перспективных реакторов большой мощности на быстрых нейтронах.

Основные выводы, полученные в результате анализа:

- созданы холодные ловушки, в основном удовлетворяющие потребности быстрых реакторов в очистке натрия от примесей. Показатели отечественных XЛ не уступают показателям лучших зарубежных образцов, а в ряде случаев превосходят их;
- целесообразно продолжать исследования по оптимизации устройств очистки натрия для перспективных реакторов с целью конструирования оптимальной системы очистки, пригодной для любого режима работы ЯЭУ;
- в настоящее время недостаточное внимание уделяется горячим ловушкам в качестве системы очистки натрия от примесей;
- не проводятся исследования в области поиска оптимального геттерного материала.

Главным критерием оценки холодных ловушек является их емкость по примесям. Соответственно, в настоящее время стоит задача оптимизации существующих холодных ловушек, которые будут способны производить очистку большого количества жидкометаллического теплоносителя быстрого реактора большой мощности. При этом основными критериями отбора способа очистки теплоносителя по-прежнему являются экономичность, безопасность, технологичность.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Кэри Б. Джексон Жидкометаллические теплоносители (натрий и натриево-калиевый сплав): Пер. с англ. Под ред. А.Е. Шейндлина. М.: Издательство иностранной литературы, 1958. 358 с.
- 2. Козлов Ф.А. и др. Исследования в обоснование системы очистки натрия для быстрых реакторов // Атомная энергия. 2012. Т.112. Вып. 1. С. 18–24.
- 3. 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
- 4. Козлов Ф.А. и др. Жидкометаллические теплоносители ЯЭУ. Очистка от примесей и их контроль. М.: Энергоатомиздат, 1983. 122 с.
- 5. Иванов В.Е. и др. Чистые и сверхчистые металлы. М.: Металлургия, 1965. 263 с.
- 6. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. М.: Атомиздат, 1970. 295 с.
- 7. Horsley G.W. A filtration and vacuum distillation unit for the purification of alkali metals // Journal of Applied Chemistry. 1958. Vol. 8. №1.
- 8. Сидоров В.И., Медведев Б.А. Лаборант-теплофизик : Пособие по технической учебе. Обнинск: Ротапринт ФЭИ, 1969. 299 с.
- 9. Кириллин В.А., Шейндлин А.Е. Термодинамика растворов. Л.: Госэнергоиздат, 1956.
- 10. Чечеткин А.В. Высокотемпературные теплоносители. М.: Энергия, 1971. 496 с.
- 11. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1974
- 12. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Л.: Стройиздат, 1978.
  - 13. Невзоров Б.А. Ж.физ.хим., 35, №3, 620 (1961)
- 14. Правила устройств и безопасной эксплуатации установок, работающих со щелочными металлами. Обнинск, 1995 г.
- 15. Волчков, Л.Г. и др. Массообмен примесей в потоке натрия. Труды 2 Симпозиума стран-членов СЭВ. Обнинск, 1973, том 2. С. 203.
- 16. Шульц В., Парызек Р. и Нехватал И. Опыт проектирования, сооружения и эксплуатации установок в институте ядерных исследований РЖЕЖ // Совещание специалистов стран-членов СЭВ: Сборник докладов / Центральный институт ядерных исследований Россендорф под Дрезденом. Дрезден, 1977. С. 237-242.

- 17. Кизин В. Д. и др. Улавливание радиоактивных примесей холодной ловушкой реактора БОР-60. НИИАР П-2 (296). Димитровград. 1977. 21 с.
- 18. Поляков В.И., Чечеткин Ю.В. Эффективность очистки натриевого теплоносителя БОР-60 от радиоактивных примесей холодной ловушкой окислов // Атомная энергия. 1975. № 38 (3). С. 171—172
- 19. Алексеев В.В и др. Системы очистки натриевого теплоносителя АЭС с реактором БН-1200 // Теплоэнергетика. -2013. № 5. C. 9–20
- 20. Алексеев В.В., Кузина Ю.А. и Сорокин А.П. Концептуальные вопросы разработки холодных фильтр-ловушек для очистки натриевого теплоносителя в реакторах на быстрых нейтронах // Известия вузов. Ядерная энергетика. -2020. № 1. С. 121—133.
- 21. Rajan M. Sodium removal and requalification of a secondary loop cold trap / M. Rajan, R. Veerasamy, K. Gurumootrhy, K.K. Rajan, R.D. Kale Engineering Development Group Indira Gandhi Centre for Atomic Research Kalpakkam 603102, India
- 22. Byung Ho Kim. Dismantling of the Sodium Purification loop and the Removal of the Sodium from its components Working material. Technical Meeting on "Decommissioning of Fast Reactors After Sodium Draining". Reproduced by the IAEA Vienna, Austria, 2005
- 23. Carra O. Secondary cold traps treatment at Superphenix / O. Carra, E. Joulia, R. Blachier, G. Deprez. Working material. Technical Meeting on "Decommissioning of Fast Reactors After Sodium Draining". Reproduced by the IAEA Vienna, Austria, 2005
- 24. Farabee, A. (2005). Closure of the Fast Flux Test Facility: History, Status, Future Plans. Technical Meeting on "Decommissioning of Fast Reactors After Sodium Draining", (604–678). France: IAEA
- 25. Stamm H.H. Sodium chemistry at KNK-II / H.H. Stamm , K.C. Stade, H. Richard // 2nd Internat.Conf.on Liquid Metal Technology in Energy Production. Wash., 1980. pp.16-30.
- 26. Hinze R.B. Control of oxygen concentration in a large sodium system // USAEC Report NAA-SR-3638, Atomics International, Canoga Park, California, 1959. 46 p.
- 27. Козлов Ф.А. и др. Исследования в обоснование системы очистки натрия для быстрых реакторов // Атомная энергия. 2012. T.112. Bып.1. C. 18–24
  - 28. Naag F. Nucleonics, 15, No. 2, 58 (1957)
- 29. Козлов Ф.А., Коновалов А.М. и Сорокин А.П. Очистка геттерами жидкометаллических систем с натриевым теплоносителем от кислорода // Теплоэнергетика.  $2016. N \cdot 5. C. 63 69$
- 30. Chemistry control in Sodium Fast Reactors: feedback from Phenix, Superphenix and other Liquid Metal Fast Breeder Reactors.

Подписано к печати 29.12.2021. Формат 60×84  $^{1}/_{16}$ . Усл. п. л. 1,7. Уч.-изд. л. 2,4. Тираж 45 экз. Заказ № 2 (2022 г.).

Отпечатано в ОПиНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов. 249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1. AO «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»