

ОСОБЕННОСТИ ОЧИСТКИ И КОНТРОЛЯ НАТРИЙ-КАЛИЕВОГО ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА

Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлева В.С., Брагин Д.С., Приказчикова А.А.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1



Натрий-калиевый сплав находит применение, в основном, в ядерных энергетических установках малой мощности, в том числе космических ЯЭУ. При выборе теплоносителя таких ЯЭУ на первый план выступают не соображения стоимости, а вопросы безопасности, предэксплуатационного хранения, транспортировки и запуска заправленных теплоносителем установок. Обоснование использования определенного теплоносителя в космических ЯЭУ требует тщательного изучения их физико-химических свойств, вида и форм существующих в нем примесей, метода поддержания их качества и т.д. В связи с возникновением новых перспективных направлений применения расплавов щелочных металлов, например, в качестве рабочих тел в датчиках измерения давления, в высокотемпературных тепловых трубах и другом оборудовании, не позволяющем проводить периодическую очистку, требуется обоснование методов тщательной предварительной очистки в обеспечении длительного ресурса эксплуатации. Расплавленные щелочные металлы содержат разнообразные примеси, количество которых зависит от конкретных условий работы жидкометаллического контура. Известны такие источники примесей как примеси, поступающие в исходном металле, загружаемом в контур, примеси в инертных газах, оксидные пленки на внутренних поверхностях конструкционных материалов и газы, проникающие через стенки в процессе эксплуатации. В циркуляционных контурах происходит непрерывный отток компонентов сталей в холодную зону, что приводит к увеличению коррозии. Наиболее неблагоприятное влияние на коррозию конструкционных материалов оказывает кислород, имеющий высокую растворимость в щелочных металлах. В статье приведены данные о методах и средствах контроля примесей в контуре и способах очистки сплава от них.

Ключевые слова: эвтектика, натрий-калий, теплоноситель, очистка, контроль.

Для цитирования: Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлева В.С., Брагин Д.С., Приказчикова А.А. Особенности очистки и контроля натрий-калиевого эвтектического сплава. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 2. – С. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.11>

МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Технология щелочных теплоносителей, к которым относится натрий-калиевый сплав, основывается на необходимости глубокой очистки от различных примесей при подготовке к загрузке в циркуляционные контуры и контроле примесей в процессе эксплуатации [1–3].

Очистка может производиться при помощи различных методов, включающих в себя предварительную и контурную очистку. Выбор метода очистки напрямую зависит от формы существования примесей.

Ниже представлены методы очистки щелочных металлов от примесей [4–6].

Дистилляционный метод очистки металла в вакууме основан на различии упругости паров основного металла и содержащихся в нем примесей. Схема дистилляционной установки разработана авторами (рис. 1).

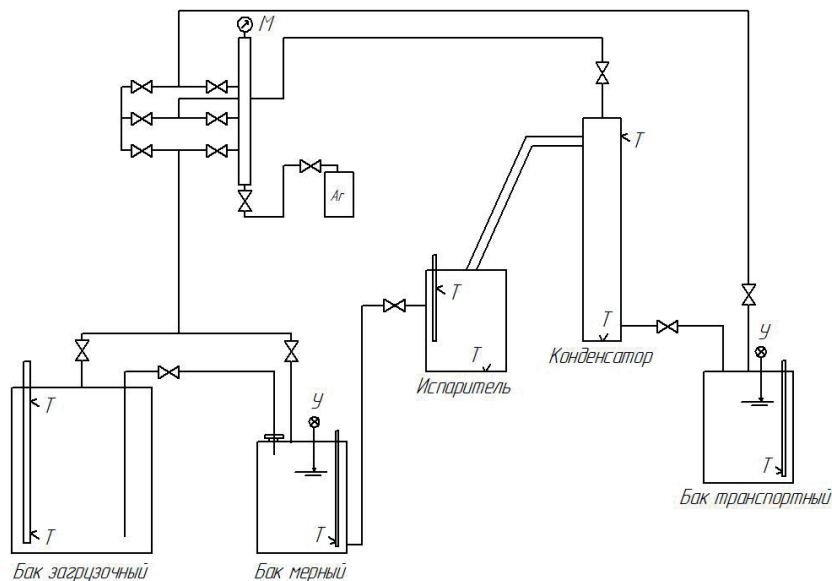


Рис. 1. Схема дистилляционной установки

Процесс дистилляции включает в себя следующие этапы: прогрев расплава до температуры испарения, испарение расплава со скоростью, зависящей от параметра испарения, конденсация паров на поверхности конденсатора. Эффективность разделения примесей и основного металла, а также паропроизводительность дистилляционного метода высока, что позволяет получать металлы чистотой до 99,9999%. Испарение – процесс неравномерный, поэтому жидкость должна быть несколько перегрета, чтобы избыточная упругость пара уравнивала потери давления при движении пара к поверхности конденсации. Дистилляция металла происходит, как правило, при низких давлениях. Недостатки такого метода: относительная сложность и громоздкость оборудования вместе с высоковакуумной аппаратурой.

Отстаивание является эффективным способом освобождения расплавленного металла от основной массы взвешенных примесей. Схема процесса отстаивания отражена на рис. 2.

Обычно металл отстаивается в баках или емкостях, служащих для загрузки циркуляционных контуров. Металл должен отстаиваться при температуре, немного превышающей плавление металла. При такой температуре подавляющая часть примесей находится в нерастворенном состоянии, и процесс

идет наиболее эффективно. Все примеси щелочных металлов имеют больший удельный вес, чем сам теплоноситель, поэтому под действием сил тяжести они тонут в жидкости, испытывая гидравлическое сопротивление. После уравнивания сил тяжести и сил гидравлического сопротивления частица движется с постоянной скоростью. Продолжительность отстаивания прямо пропорционально зависит от высоты емкости, в которой оно происходит. Затем металл сливается в контур через трубку, срез которой помещен в отстойнике на достаточном расстоянии от дна емкости.

Центрифугирование – это разделение жидкости и осадка в поле центробежных сил. Схема процесса центрифугирования представлена на рис. 3.

На частицу взвеси в центрифуге действуют центробежная сила, отбрасывающая частицу на периферию центрифуги, и сила гидравлического сопротивления. Основным преимуществом данного метода является малое время разделения и уплотнения осадка. Этот метод не получил широкого распространения из-за относительной сложности – необходимости в специальном оборудовании, способном работать при высоких температурах и больших оборотах центрифуги.

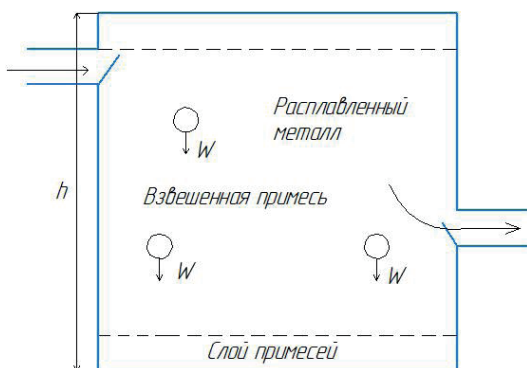


Рис. 2. Схема отстаивания

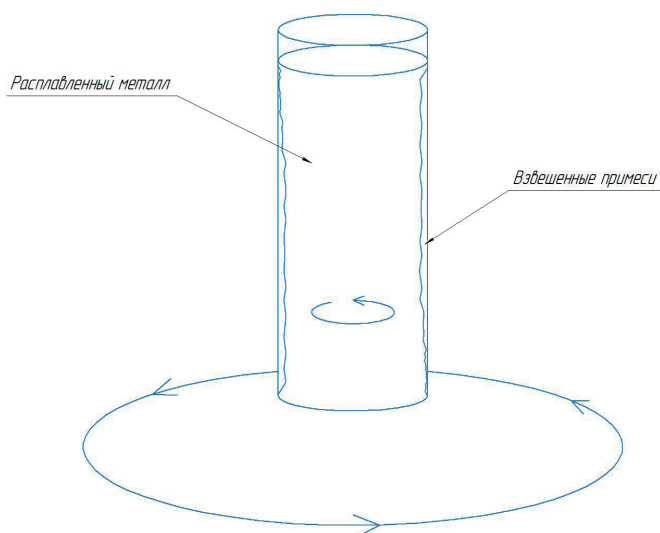


Рис. 3. Схема процесса центрифугирования

Термическое вакуумирование или дегазацию применяют для удаления растворенных газов. Путем вакуумной откачки можно удалить любые газы, находящиеся в жидком металле. Газы из металла при откачивании удаляются в результате выделения вследствие уменьшения их растворимости при пониженном давлении, термической диссоциации соединений газов с металлом, термического восстановления соединений, образования и испарения субокислов.

Фильтрование – процесс отделения нерастворенных частиц примесей от жидкости с помощью фильтров, представляющих собой пористые перегородки различных конструкций. Схема процесса фильтрования отражена на рис. 4.

Для фильтрования по обе стороны перегородки создают разность давлений, определяемую суммарным гидравлическим сопротивлением самой перегородки и осадка примеси, нарастающего на ней.

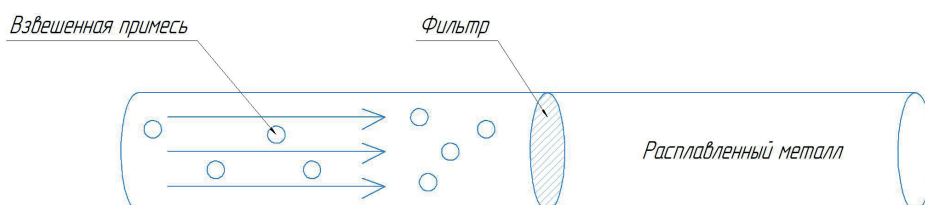


Рис. 4. Схема процесса фильтрования

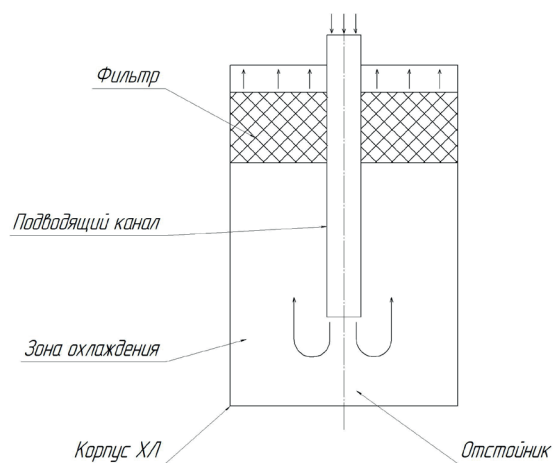


Рис. 5. Схема холодной ловушки

Электроперенос примесей – это процесс, направленный на перемещение примесей под действием электрического тока, проходящего через раствор. Экспериментальные данные по электропереносу примесей весьма ограничены, поэтому трудно говорить о применимости разработанных теорий электропереноса к щелочным металлам.

Очистка при помощи холодной ловушки основана на том, что растворимость многих соединений газовых примесей со щелочными металлами понижается с уменьшением температуры.

Поэтому очистка может быть осуществлена путем кристаллизации примесей из раствора при охлаждении теплоносителя на некотором участке контура. Схема холодной ловушки проточного типа [7–9] более удобна и технологична (рис. 5) в сравнении с дисковой холодной ловушкой.

Очистка при помощи горячей ловушки основана на процессе химического связывания примесей теплоносителя химически более активным веществом [10, 11].

Металлы для реализации реакции химической очистки не должны быть агрессивны по отношению к конструкционным материалам контура.

Процесс химической очистки описывается реакциями типа



для оксида натрия и



для гидрида калия.

Особенности протекающих физико-химических процессов могут быть изучены при термодинамическом анализе, проведенном авторами. Для термодинамического анализа были выбраны несколько металлов, наиболее подходящих для химического связывания примесей кислорода и водорода в натрий-калиевом сплаве. Это обусловлено тем фактом, что именно кислород и водород являются наиболее важными примесями, влияющими на теплогидравлические характеристики натрий-калиевого сплава.

Результаты термодинамического анализа, показывающего возможность очистки Na-K от кислорода титаном, цирконием, алюминием и ниобием, отражены на рис. 6.

Результаты численного исследования возможности очистки Na-K от водорода титаном, цирконием и алюминием приведены на рис. 7.

Продукты реакции должны быть слабо растворимы в теплоносителе. Для химической очистки Na-K сплава от кислорода и водорода с точки зрения термодинамики целесоо-

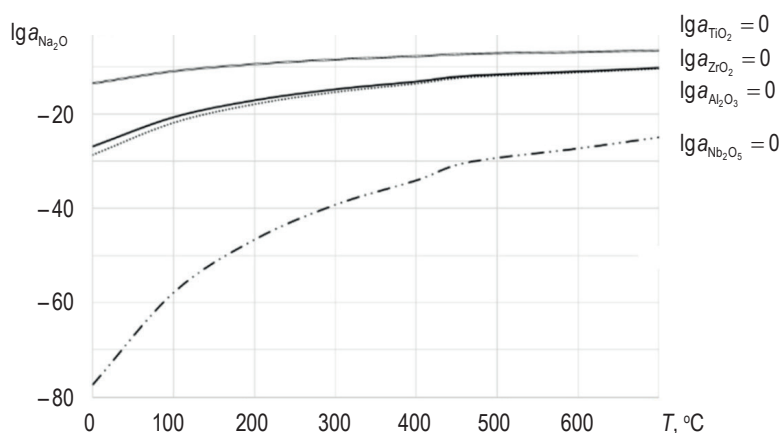


Рис. 6. Температурная зависимость концентрации насыщения TiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , Nb_2O_5

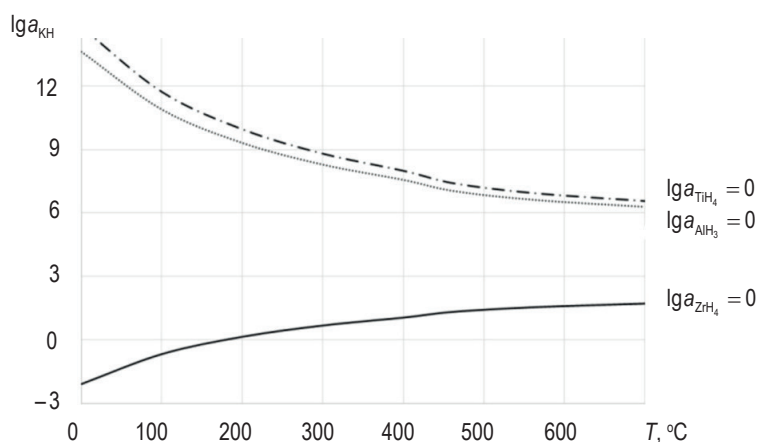


Рис. 7. Температурная зависимость концентрации насыщения гидридов TiH_4 , AlH_3 и ZrH_4

бразно применение циркония. Также существует способ очистки щелочного жидкометаллического теплоносителя от примесей с помощью горячей ловушки. Ее принцип действия диаметрально противоположен принципу очистки холодной ловушкой.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЧИСТОТЫ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА НАТРИЙ-КАЛИЙ

Контроль чистоты жидкометаллических теплоносителей необходим для выполнения двух задач [12]. Первая – обнаружение аварийных ситуаций, таких как разгерметизация контура сопровождается быстрым возрастанием содержания примесей в сплаве, и предотвращение последствий разуплотнения (выпадение нерастворимого осадка в холодных зонах, закупорка трубопроводов, ухудшение тепловых характеристик и т.д.). Вторая задача – контроль медленно развивающихся процессов, например, коррозия конструкционных материалов [13, 14]. В этом случае требуется периодический контроль чистоты жидкометаллического теплоносителя для установления отклонения от нормы и принятия соответствующих решений. Техническое решение обеих задач возможно двумя путями: первый – непрерывный оперативный контроль содержания примесей в сплаве с использованием разнообразных физико-химических методов, второй путь – химический или химико-спектральный анализ проб сплава – периодический контроль.

Для периодического контроля сплава на содержание в нем кислорода, водорода, нелетучих форм углерода, карбоната и металлических примесей разработан пробоотборник-дистиллятор. С помощью него можно быстро отобрать пробы сплава из циркуляционного контура, сконцентрировать примеси в стакане в виде твердого остатка путем отгонки сплава из вакуума. Оперативный отбор проб устраняет вероятность перераспределения примесей в процессе пробоотбора, а совмещение пробоотбора с дистилляцией в одном устройстве снижает загрязнение пробы. Схема универсального пробоотборника-дистиллятора приведена на рис. 8 [15].

Пробоотборник имеет шесть стаканов, что позволяет одновременно отбирать две пробы сплава для определения содержания кислорода, две пробы для определения содержания углерода и два пустых стакана для определения фона устройства (по кислороду и углероду). Металлическая прокладка позволяет создать равномерное поле температуры в дистилляторе, что исключает конденсацию паров металла в дистилляционной зоне и обеспечивает их удаление в конденсатор. Пробоотборник имеет съемную электропечь с регулируемой мощностью для обогрева корпуса дистиллятора и конденсатора. При анализе сплава на содержание кислорода используют никелевые или молибденовые стаканы, для анализа углерода – кварцевые.

К методам оперативного контроля примесей в натрий-калиевом сплаве следует отнести пробковый индикатор примесей (ПИ).

Известно [1], что растворимость кислорода и водорода в сплаве изменяется с изменением температуры:

$$\lg C_{\text{O}} = 2,08 - 1970/T, \quad (3)$$

$$\lg C_{\text{H}} = 2,54 - 2730/T, \quad (4)$$

где C_{O} , C_{H} – растворимости кислорода и водорода, масс.%, T – температура сплава по шкале Кельвина.

При заданной концентрации примесей $C_i < C_{si}$ (концентрация насыщения) и температуре $T > T_{si}$ (температура насыщения сплава примесью i) раствор однороден. Понижение

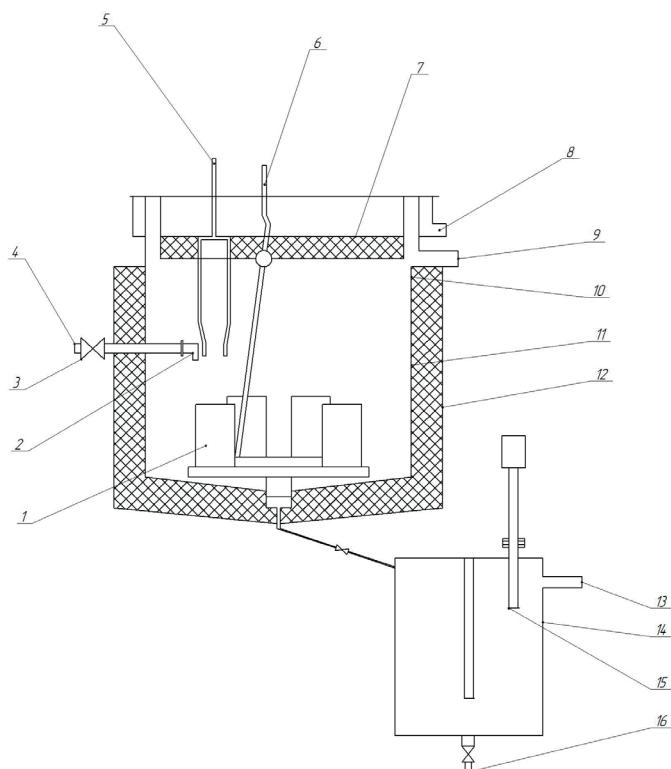


Рис. 8. Универсальный пробоотборник-дистиллятор 1 – стакан для проб; 2 – сливная трубка; 3 – вентиль; 4 – входной штуцер; 5 – уровнемер; 6 – шток вращения поворотной платформы; 7 – крышка дистиллятора; 8 – входной штуцер хладагента; 9, 13 – штуцер газовакуумной линии; 10 – коническое уплотнение с металлической прокладкой; 11 – корпус дистиллятора; 12 – изоляция печи; 14 – конденсатор; 15 – уровнемер конденсатора; 16 – штуцер для слива теплоносителя

температуры T приводит растворенную примесь в насыщенное состояние ($T \leq T_{si}$), происходит расслоение однородной системы на гомогенный раствор с концентрацией примеси C_{si} и избыточную фазу соединения примеси с компонентами растворителя. Для водорода в сплаве это – гидрид KH , для кислорода – Na_2O . Избыточная фаза частично находится в виде взвеси в потоке сплава, частично кристаллизуется на стенках холодильника. Взвешенные частицы забивают отверстия индикатора, что приводит к уменьшению расхода теплоносителя через ПИ по мере выпадения взвеси, т.е. при $T \leq T_{si}$.

Таким образом, измерив температуру сплава в момент начала уменьшения расхода и приняв ее за температуру насыщения, можно определить по уравнениям (3), (4) концентрацию примесей, если известен заранее вид примеси.

Пробковый индикатор включает в себя клапан-шайбу с малым проходным сечением, холодильник, вентиль, расходомер, термомпары.

Холодильник выполнен в виде змеевика, на входе которого установлен датчик магнитного расходомера. Роль шайбы с отверстиями выполняет клапан вентиля, на поверхности которого профрезеровано 15–20 канавок прямоугольного сечения размером $0,5 \text{ мм} \times 0,5 \text{ мм}$ или $1 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$. С целью более точной фиксации температуры забивания рекомендуется, чтобы темп охлаждения сплава не превышал $10^\circ\text{C}/\text{мин}$.

ВЫВОДЫ

Описана технология жидкометаллического теплоносителя натрий-калий, которая основана на глубокой очистке и контроле теплоносителя перед и во время эксплуатации установки для безаварийной работы. Изучение и усовершенствование методов очистки и контроля позволит увеличить срок службы установок и облегчить их конструкцию, что является одним из важнейших факторов для космических ЯЭУ.

Для практического применения как в лабораторных условиях, так и в реальных установках, по мнению авторов, подходят следующие методы: предварительная очистка натрий-калиевого сплава путем его дистилляции; очистка непосредственно в циркуляционном контуре при помощи холодных и горячих ловушек; оперативный контроль примесей при помощи пробкового индикатора

Литература

1. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы жидкометаллических теплоносителей. – М.: Атомиздат, 1967.
2. Ярыгин В.И., Купцов Г.А., Ионкин В.И. и др. Термоэмиссионный электрогенерирующий модуль для активной зоны ядерного реактора с вынесенной термоэмиссионной системой преобразования тепловой энергии в электрическую (варианты). Патент РФ, № 2187156, 2002.
3. Gibson M.A., Poston D.I., McClure P., Godfroy T., Sanzi J., Briggs M.H. The Kilopower Reactor Using Stirling Technology (KRUSTY) Nuclear Ground Tests Results and Lessons Learned. / Proc. 2018 International Energy Conversion Engineering Conference. Cincinnati, USA, 2018, AIAA 2018-4973. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2018-4973>
4. Приказчикова А.А., Ульянов В.В., Кремлёва В.С. Исследование особенностей дистилляции щелочных металлов как метода их предварительной очистки. / Тезисы докладов XVIII Международной научно-технической конференции «Будущее атомной энергетики». – Обнинск, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2022. – С.88–89.
5. Приказчикова А.А., Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С. Исследование особенностей дистилляции как метода предварительной очистки щелочных теплоносителей / Тезисы докладов VI Международной (XIX Региональной) научной конференции «Техногенные системы и экологический риск». – Обнинск, 2023. – С. 53–55.
6. Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлёва В.С., Приказчикова А.А. Исследование способов очистки натрий-калиевого сплава / Тезисы докладов VI Международной (XIX Региональной) научной конференции «Техногенные системы и экологический риск». – Обнинск, 2023. – С. 60–62.
7. Калякин С.Г., Козлов Ф.А., Сорокин А.П. и др. Исследования в обоснование встроенной в бак реактора системы очистки натрия. / Сборник докладов конференции «Теплофизика-2013». – Обнинск, ГНЦ РФ – ФЭИ, 2014. – Т. 2. – С. 395–402.
8. Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Коновалов М.А., Дельнов В.Н. Ядерная энергетическая установка с системой очистки теплоносителя. Патент на изобретение RU 2614048 C1, 22.03.2017. Заявка № 2016110062 от 18.03.2016.
9. 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.
10. Кремлёва В.С., Ульянов В.В., Кошелев М.М. Влияние примеси кислорода на концентрацию оксидов в эвтектическом сплаве калия с натрием. / Тезисы докладов V Международной (XVIII Региональной) научной конференции «Техногенные системы и экологический риск». Обнинск, 2022. – С. 37–39.

11. Козлов Ф.А., Коновалов М.А., Сорокин А.П. Очистка геттерами жидкометаллических систем с натриевым теплоносителем от кислорода. // Теплоэнергетика. – 2016. – № 5. – С.63–69.
12. Брагин Д.С., Верещагина Т.Н., Логинов Н.И. Градуировка электромагнитного насоса-расходомера. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – № 4. – С. 194–200.
13. Козлов Ф.А., Алексеев В.В., Сорокин А.П. Развитие технологии натрия как теплоносителя быстрых реакторов. // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116. – № 4. – С. 228–234.
14. Калякин С.Г., Сорокин А.П., Козлов Ф.А., Алексеев В.В., Щербаков С.И. Исследования в обоснование встроенной в бак реактора системы очистки натрия. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2014. – № 2. – С. 81–89. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.2.09>
15. Арнольдов М.Н., Козлов Ф.А., Сорокин А.П. Физическая химия и технология щелочных жидкометаллических теплоносителей. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2014. – № 2. – С. 18–32.

Поступила в редакцию 05.04.2024

Авторы

Ульянов Владимир Владимирович, начальник лаборатории,
Кошелев Михаил Михайлович, заместитель начальника лаборатории,
E-mail: mkoshelev@ippe.ru
Кремлева Владлена Сергеевна, младший научный сотрудник,
Брагин Денис Сергеевич, инженер-теплофизик 2 к.,
Приказчикова Анастасия Андреевна, инженер-исследователь

UDC 621.039

Features of Purification and Control of Sodium-Potassium Eutectic Alloy

Ulyanov V.V., Koshelev M.M., Kremleva V.S., Bragin D.S., Prikazchikova A.A.

*IPPE JSC,
1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga reg., Russia*

Abstract

Sodium-potassium is used mainly in low-power nuclear power plants, including space nuclear power plants. When choosing a coolant for such nuclear power plants, it is not cost considerations that come to the fore, but the safety, pre-operational storage, transportation and launch of installations filled with coolant. Justification for the use of a certain coolant in space nuclear power plants requires a thorough study of their physical and chemical properties, the type and form of impurities existing in it, the method of maintaining their quality, etc. In connection with the emergence of new promising areas for the use of alkali metal melts, for example, as working fluids in pressure measurement sensors, in high-temperature heat pipes and other equipment that does not allow periodic cleaning, justification of methods for thorough pre-cleaning is required to ensure a long service life. Molten alkali metals contain a variety of impurities, the amount of which depends on the specific operating conditions of the liquid metal circuit. Such sources of impurities are known as impurities entering the source metal loaded into the circuit, impurities in inert gases, oxide films on the internal surfaces of structural materials and diffusion of gases through the walls during operation. In circulation circuits, there is a continuous outflow of steel components

into the cold zone, which leads to increased corrosion. Oxygen, which has high solubility in alkali metals, has the most adverse effect on the corrosion of structural materials. This article provides data on methods and means of controlling impurities in the circuit and methods for cleaning the alloy from them. Cleaning can be done using various methods; a distinction is made between preliminary and contour cleaning. The choice of purification method directly depends on the form of existence of impurities. Monitoring the purity of liquid metal coolants is necessary to perform two tasks. The first is the detection of emergency situations, such as depressurization of the circuit accompanied by a rapid increase in the content of impurities in the alloy and prevention of the consequences of decompaction (insoluble sediment in cold zones, blockage of pipelines, deterioration of thermal characteristics, etc.). The second task is to control slowly developing processes, such as corrosion of structural materials.

Keywords: eutectic, sodium-potassium, coolant, purification, control.

For citation: Ulyanov V.V., Koshelev M.M., Kremleva V.S., Bragin D.S., Prikazchikova A.A. Features of Purification and Control of Sodium-Potassium Eutectic Alloy. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 2, pp. 127–137; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.11> (in Russian).

References

1. Subbotin V.I. Ivanovsky M.N., Arnoldov M.N. Physico-chemical foundations of liquid metal coolants. M.: Atomizdat, 1967 (in Russian).
2. Yarygin V.I., Kuptsov G.A., Ionkin V.I., Ovcharenko M.K., Ruzhnikov V.A., Mikheev A.S., Yarygin D.V. Thermionic power generating module for a power supply reactor in an aggressive zone with a remote thermionic system for converting thermal energy into electrical energy (options). RF Patent, No. 2187156, 2002 (in Russian).
3. Gibson M.A., Poston D.I., McClure P., Godfroy T., Sanzi J., Briggs M.H. The Kilopower Reactor Using Stirling Technology (KRUSTY) Nuclear Ground Tests Results and Lessons Learned. *Proc. 2018 International Conference on Energy Conversion. Cincinnati, USA, 2018*. AIAA 2018-4973. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2018-4973>
4. Prikazchikova A.A., Ulyanov V.V., Kremleva V.S. Study of the features of distillation of alkali metals as a method of their preliminary purification. *Abstracts of the XVIII International Scientific and Technical Conference «The Future of Nuclear Energy»*. Obninsk, IATE MEPhI. 2022, pp. 88–89 (in Russian).
5. Prikazchikova A.A., Ulyanov V.V., Koshelev M.M., Kremleva V.S. Study of distillation methods as a method of preliminary purification of alkaline coolants. *Abstracts of the VI International (XIX Regional) scientific conference «Technogenic systems and environmental risk»*. Obninsk, 2023, pp. 53–55 (in Russian).
6. Ulyanov V.V., Koshelev M.M., Kremleva V.S., Prikazchikova A.A. Study of a method for purifying sodium-potassium alloy. *Abstracts of the VI International (XIX Regional) scientific conference «Technogenic systems and environmental risk»*. Obninsk, 2023, pp. 60–62 (in Russian).
7. Kalyakin S.G., Kozlov F.A., Sorokin A.P. et al. Research on the justification of the sodium purification system built into the reactor tank. *Proc. of the conference «Thermophysics-2013»*. Obninsk, IPPE. 2014, vol. 2, pp. 395–402 (in Russian).
9. Kozlov F.A., Sorokin A.P., Konovalov M.A., Delnov V.N. Nuclear power plant with a coolant purification system. Patent for invention RU 2614048 C1, 03/22/2017. Application No. 2016110062 dated 03/18/2016 (in Russian).
9. Alekseev V.V., Kozlov F.A., Sorokin A.P., Trufanov A.A., Kryuchkov E.A., Varseev E.V., Konovalov M.A., Torbenkova I.Yu. Tests on a sodium test bench for a model of cold traps. *Atomic Energy*. 2017, vol. 122, no. 1, pp. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0232-1>

10. Kremleva V.S., Ulyanov V.V., Koshelev M.M. Study of oxide stress impurities in a eutectic alloy of potassium with sodium. *Abstracts of the V International (XVIII Regional) scientific conference «Technogenic systems and environmental risk»*. Obninsk, 2022, pp. 37–39 (in Russian).

11. Kozlov F.A., Konovalov M.A., Sorokin A.P. Purification of liquid metal systems with sodium coolant from oxygen using getters. *Thermal Engineering*. 2016, no. 5, pp. 367–373. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601516050049>

12. Bragin D.S., Vereshchagina T.N., Loginov N.I. Calibration of an electromagnetic pump-flow meter. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear reactor constants*. 2022, no. 4, pp. 194–200 (in Russian).

13. Kozlov F.A., Alekseev V.V., Sorokin A.P. Development of sodium technologies as a coolant for fast reactors. *Atomic Energy*. 2014, vol. 116, no. 4, pp. 278–284. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-014-9854-8>

14. Kalyakin S.G., Sorokin A.P., Kozlov F.A., Alekseev V.V., Scherbakov S.I. Studies validating a sodium purification system integrated in the reactor vessel. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 2, pp. 81–89; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.2.09> (in Russian).

15. Arnoldov M.N., Kozlov F.A., Sorokin A.P. Physical chemistry and technology of alkaline liquid metal coolants. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear reactor constants*. 2014, no. 2, pp. 18–32 (in Russian).

Authors

Vladimir V. Ulyanov, Head of laboratory,

Mikhail M. Koshelev, Deputy Head of laboratory,

E-mail: mkoshelev@ippe.ru

Vadlena S. Kremleva, junior researcher,

Denis S. Bragin, thermal physics engineer 2nd degree,

Anastasia A. Prikazchikova, research engineer