

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-55-62

Приборы и методы контроля примесей в тяжёлых жидкометаллических теплоносителях

Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, Н.С. Волков, Р.В. Сумин, М.Д. Погорелов, Т.К. Зырянова

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия

Поступила 05.09.2024

Принята к печати 26.12.2024

Одна из ключевых проблем эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с охлаждением тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем заключается в образовании и накоплении различных отложений. При проведении ремонтных работ эти отложения усложняют процесс восстановления оборудования. Это приводит к сокращению срока службы и снижению эффективности установки в целом. За исключением случаев разрушения активной зоны, процессы образования и перемещения примесей в контуре с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем протекают со временем довольно медленно. Соответственно, важным аспектом работы является время от запроса до получения полной информации о состоянии системы. Целью работы являлся контроль состава, количества и состояния примесей во всех возможных состояниях (присутствующих в виде раствора в тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе, пассивированных конгломератов на внутренних поверхностях контура, а также на свободной поверхности тяжёлого жидкометаллического теплоносителя); разработка набора устройств, позволяющих контролировать эти процессы. Рассмотрены процессы массообмена и массопереноса в контуре с учётом влияния образующихся примесей, влияющих на состояние системы. Предложены к использованию секторные системы контроля, позволяющие оперативно и достоверно проводить контроль примеси и их состава.

Ключевые слова: тяжёлые жидкометаллические теплоносители, мониторинг состояния электроизолирующих покрытий, контроль присутствия водяного пара, содержание примесей в теплоносителе

Адрес для переписки:

Мелузов А.Г.

Нижегородский государственный технический университет,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия
e-mail: mtntu@gmail.com

Address for correspondence:

Meluzov A.G.

Nizhny Novgorod State Technical University,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia
e-mail: mtntu@gmail.com

Для цитирования:

Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, Н.С. Волков, Р.В. Сумин,
М.Д. Погорелов, Т.К. Зырянова.

Приборы и методы контроля примесей в тяжёлых жидкометаллических теплоносителях.

Приборы и методы измерений.

2025. Т. 16. № 1. С. 55–62.

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-15-1-55-62

For citation:

Bokova TA, Meluzov AG, Volkov NS, Sumin RV, Pogorelov MD,
Zyryanova TK.

Devices and Methods for Impurities Control in Heavy Liquid Metal Heat Carriers.

Devices and Methods of Measurements.

2025;16(1):55–62. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-55-62

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-55-62

Devices and Methods for Impurities Control in Heavy Liquid Metal Heat Carriers

T.A. Bokova, A.G. Meluzov, N.S. Volkov, , R.V. Sumin, M.D. Pogorelov, T.K. Zyryanova

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia

Received 05.09.2024

Accepted for publication 26.12.2024

Abstract

One of the key problems in the operation of fast neutron reactors cooled by a heavy liquid metal coolant is the formation and accumulation of various deposits. These deposits complicate the process of equipment restoring during repair work. This leads to a shorter work life and a lower efficiency of the equipment as a whole. Except of core destruction cases, the processes of formation and movement of impurities in a circuit with a heavy liquid metal coolant proceed rather slowly over time. So that time from request to receiving of complete information about the system status is an important aspect of its work. The purpose of the work was to control the composition, quantity and condition of impurities in all possible states (present as a solution in the heavy liquid metal coolant, passivated conglomerates on the inner surfaces of the contour, as well as on the free surface of the heavy liquid metal coolant). As well as the development of a set of devices that allows controlling of these processes. The paper considers the processes of mass transfer in the circuit, taking into account the influence of the resulting impurities affecting the state of the system. Sectoral control systems are proposed for use, which make it possible to quickly and reliably monitor impurities and their composition.

Keywords: heavy liquid metal coolant, monitoring of the standing of electrical insulating coatings, control of the presence of water vapor, the content of impurities in the coolant

Адрес для переписки:

Мелузов А.Г.
Нижегородский государственный технический университет,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия
e-mail: mtntu@gmail.com

Address for correspondence:

Meluzov A.G.
Nizhny Novgorod State Technical University,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia
e-mail: mtntu@gmail.com

Для цитирования:

Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, Н.С. Волков, Р.В. Сумин,
М.Д. Погорелов, Т.К. Зырянова.
Приборы и методы контроля примесей в тяжёлых
жидкометаллических теплоносителях.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 55–62.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-15-1-55-62

For citation:

Bokova TA, Meluzov AG, Volkov NS, Sumin RV, Pogorelov MD,
Zyryanova TK.
Devices and Methods for Impurities Control in Heavy Liquid Metal
Heat Carriers.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):55–62. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-55-62

Введение

При эксплуатации контуров с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) происходят процессы массообмена и массопереноса примесей. Они постоянны во времени, что позволяет оптимизировать проведение контроля с выбором группы примесей, а также выбрать максимально информативные зоны контроля контура ТЖМТ [1].

Стандартные операции включают в себя следующие процессы:

- формирование и доформирование защитных покрытий;
- формирование электроизоляционных покрытий;
- вывод продуктов износа конструкционных материалов;
- очистка теплоносителя от сформированных оксидов ТЖМТ.

Это требует получения достоверной и быстрой информации о состоянии теплоносителя, структуре и состоянии примесей в реакторных и исследовательских контурах ТЖМТ.

Полученную информацию разделяют по 2 категориям – оперативную и неоперативную. При получении информации от нескольких секунд до десятков минут её считают оперативной. Неоперативная информация требует значительно большего времени, достигающего до нескольких часов и более.

Цель работы – контроль состава, количества и состояния примесей во всех возможных состояниях (присутствующих в виде раствора теплоносителя, пассивированных на внутренних поверхностях контура, а также на свободной поверхности теплоносителя), разработка комплекса устройств, позволяющего контролировать данные процессы.

Система постоянного слежения за состоянием примесей в тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе, контуре и системе инертного газа

В контурах ТЖМТ реакторов деления используются различные системы контроля за составом примесей и их массопереносом по системам контура.

Для получения оптимальной информации обо всех параметрах контура ТЖМТ используют 2 вида контроля:

- приборы, контролирующие появление и состав радионуклидов в ТЖМТ и инертном газе;
- датчики контроля нейтронного бета и гамма-излучения.

Расположение датчиков возможно как внутри контура, так и за его пределами. Оптимальна установка вблизи свободной поверхности теплоносителя, где наблюдается гравитационная сепарация примеси из тела теплоносителя, проходящего зону реактора [2].

При наличии компоновки блочного типа оптимальна система секторного контроля с установленными датчиками нейтронного излучения, расположенными в шахте реактора напротив выходных каналов из активной зоны.

При проведении контроля водяного пара и воды в ТЖМТ и инертном газе должны выполняться ряд требований:

- избегать свободных уровней ТЖМТ, где нет прямой связи с газовым объёмом контура через воздушный клапан;
- области, где происходит сепарация пара в контуре ТЖМТ, должны быть минимизированы;
- контроль водяного пара и воды в ТЖМТ и защитном газе проводят с помощью конденсаторов пара.

Комплексный подход по контролю примесей в контуре ТЖМТ реакторов деления даёт надёжность и безопасность в эксплуатации системы.

Так же концентраторы пара позволяют обнаружить и контролировать возникновение и развитие межконтурной неплотности парогенератора [3].

Установка конденсатора пара

Оптимально расположить конденсатор пара (КП) в зоне установки сепарационных устройств (над свободным уровнем ТЖМТ). При этом требуется объединение газового объёма с приёмным объёмом паровой смеси. Конструктивно объединяют через штуцер с предохранительным устройством, в состав которого входит мембрана разрывного действия. Мембрана выполняет соединение газовой области с системой фильтров, после которых идёт сброс давления в атмосферу. Такой метод хорошо себя зарекомендовал при аварийной ситуации с “большой” течью парогенератора.

Контроль паровой смеси

При образовании пара газовой смеси в трубопроводе с ТЖМТ её контроль и выявление основано на применении электромагнитных или магнитных датчиков. Принцип действия и компоновка этих датчиков схожи с принципом работы расходомера в ТЖМТ контуре. Контроль за присутствием паровоздушной смеси проводится в местах установки воздушников парогенераторов. Максимальную эффективность показала установка таких устройств, когда реакторный контур имеет интегрированную компоновку с автономно установленными корпусами генераторов.

Использование ультразвуковых датчиков

Проведение испытаний при формировании аварийного режима "межконтурной неплотности парогенератора" показали недостаточную информативность применяемых ультразвуковых датчиков по определению парогазовой фазы в потоке теплоносителя. Датчики давали много ложных сигналов, что приводило к невозможности получения адекватной информации. Происходило затухание ультразвуковых сигналов в области пристенного течения однокомпонентного потока ТЖМТ [4].

Контроль водяного пара

Хорошо показало себя применение влагомеров, установленных в объёме защитного газа. Однако, при пусконаладочных работах с раскрытием контура возможно фиксирование увеличения влажности газа при повышении температуры из-за присутствия конденсата, попавшего при монтажных работах.

Уровнемеры

Уровнемеры хорошо себя зарекомендовали при контроле уровня свободной поверхности ТЖМТ. Также они могут применяться как инструмент для наблюдения за поступлением водяного пара при межконтурной неплотности парогенератора отследить можно по изменению уровня свободной поверхности. Утверждение о наличии водяного пара в ТЖМТ можно основывать на получении информации о постепенном возрастании или колебании уровня свободной поверхности теплоносителя в соответствии с изменением давления в контуре.

Также возможно проконтролировать присутствие водяного пара в контуре ТЖМТ опосредовано с помощью показаний от датчика давления, расположенного в газовой системе, но существует ряд факторов, мешающих эффективно оценивать присутствие паров воды в контуре ТЖМТ, это:

- низкий расход рабочего тела;
- эффективная сепарации водяного пара на свободных уровнях ТЖМТ;
- компенсация сепарированного пара;
- достаточно резкое повышение давления газа в системе [5].

Хроматографические исследования примесей, разделённых в защитном газе, проводятся на постоянной основе или периодически. Это позволяет иметь оперативный и информативный контроль примесей в ТЖМТ.

Для отбора проб линия отбора с побудителем расхода устанавливается параллельно в циркуляционной трубе контура, в самых "информативных" местах газовой системы. В контуре отвода тепла от blankets, дивертора токамака требуется поддержание электроизоляционных покрытий. Состояние покрытий требует постоянного контроля. Это осуществляется с помощью установленных в контуре ТЖМТ приборов для измерения сопротивлений электроизоляционных покрытий. Данные приборы располагаются по всему энергетическому контуру с ТЖМТ для дублирования информации о состоянии системы [6]. Схема устройства представлена на рисунке 1. Образцы погружаются непосредственно в поток теплоносителя, обычно используется 2 образца, но лучше себя показала схема с использованием 3 образцов (электродов). Материал выбирается в соответствии с материалом основного контура с ТЖМТ. С помощью вводимого реагента (аргона с добавлением кислорода, CO₂, водяного пара), происходит формирование и изменение электроизоляционных покрытий.

Схема измерений электрического сопротивления защитных изолирующих покрытий на циркуляционном контуре представлена на рисунке 2.

Используемая нами данная конструкция показала ряд преимуществ:

- практически одинаковые условия обтекания стенок трубы;
- одинаковое обтекание торцевых поверхностей гермовводов.

При этих условиях формируется качественное покрытие, что гарантирует высокую точность контроля [7].

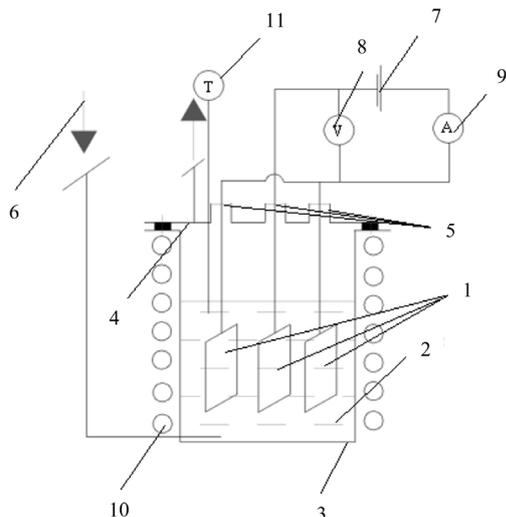


Рисунок 1 – Трёхэлектродная схема устройства контроля электросопротивления защитных и электроизолирующих покрытий на поверхностях образцов конструкционных материалов: 1 – образец с покрытием; 2 – тяжёлый жидкометаллический теплоноситель; 3 – корпус устройства; 4 – крышка; 5 – гермовводы; 6 – ввод реагента; 7 – источник стабилизированного постоянного тока; 8 – вольтметр; 9 – амперметр; 10 – электрообогрев; 11 – термопара

Figure 1 – Three-electrode diagram of a device for monitoring the electrical resistance of protective and insulating coatings on the surfaces of structural materials' samples: 1 – coated sample; 2 – heavy liquid metal coolant; 3 – device body; 4 – cover; 5 – hermetic leads; 6 – reagent input; 7 – source of stabilized direct current; 8 – voltmeter; 9 – ammeter; 10 – electric heating; 11 – thermocouple

В работе данное устройство показало и отрицательные свойства:

- разрушение изоляторов при термоударах;
- увеличение погрешности измерения по причине малой площади торца термовводов;
- падение надёжности изоляторов в условиях высоких температур (500–600 °С) [8].

Как показал опыт эксплуатации стэндов с ТЖМТ (свинец и его сплавы), при температурах 400–450 °С и выше требуется формирования защитного покрытия. Формируется покрытие на поверхности стали методом введения кислорода (термодинамически активного кислорода) в контур теплоносителя ТЖМТ. Контроль термодинамически активного кислорода в ТЖМТ проводится с помощью установленных датчиков активного кислорода (ДАК).

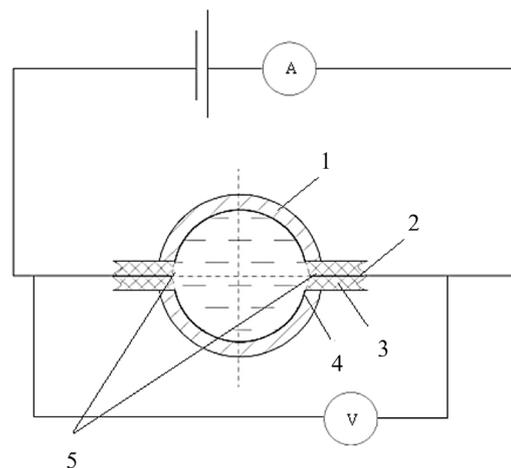


Рисунок 2 – Схема устройства контроля электросопротивления защитных и электроизолирующих покрытий в трубопроводе с циркулирующим тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем: 1 – стенка трубопровода; 2 – гермоввод; 3 – изолятор; 4 – покрытие на стенке трубы; 5 – покрытие на торцах гермовводов

Figure 2 – Scheme of the device for monitoring the electrical resistance of protective and insulating coatings in a pipeline with circulating heavy liquid metal coolant: 1 – pipeline wall; 2 – hermetic duct; 3 – insulator; 4 – coating on the pipe wall; 5 – coating on the ends of the hermetic ducts

Датчик состоит из колбы, изготовленной из твёрдого электролита (диоксид циркония плюс примесь оксида иттрия) (рисунок 3).

Внутри колбы ДАК расположена среда (эталон). Задано постоянным во времени содержание кислорода (свинец плюс оксид свинца на поверхности). С внешней стороны колба ДАК омывается потоком теплоносителя. Использование ДАК основано на изменении электродвижущей силы (ЭДС), возникающей за счёт перемещения ионов термодинамически активного кислорода через стенку колбы. Перемещение происходит от ТЖМТ, омывающего внешнюю поверхность колбы датчика, до внутреннего эталона, расположенного внутри колбы датчика. Когда содержание примеси различается от эталонной (внутри колбы), то возникает направляемый поток ионов кислорода [9]. Вследствие чего между омывающим теплоносителем и эталоном ДАК возникает ЭДС, которую измеряют с использованием потенциометра с высоким внутренним сопротивлением.

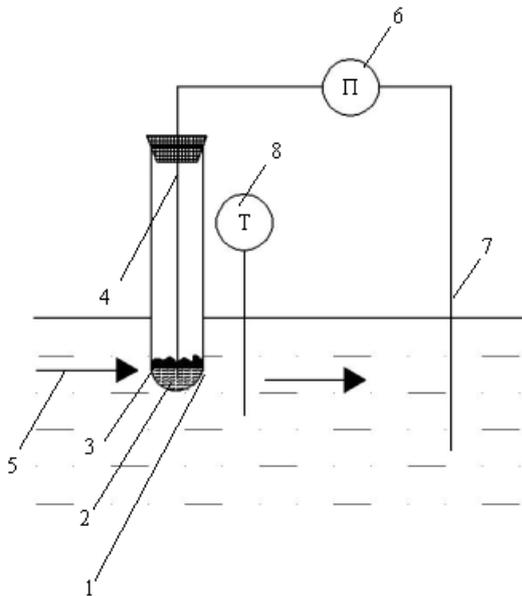


Рисунок 3 – Схема устройства контроля содержания примеси термодинамически активного кислорода с эталоном из свинца, насыщенного кислородом (датчик активного кислорода): 1 – стенка твёрдого электролита; 2 – свинец (висмут); 3 – оксид свинца; 4, 7 – электроды; 5 – контролируемый жидкометаллический теплоноситель; 6 – потенциометр с высоким внутренним сопротивлением; 8 – датчик температуры тяжёлого жидкометаллического теплоносителя вблизи гальванического концентрационного элемента

Figure 3 – Scheme of a device for monitoring the content of an impurity of thermodynamically active oxygen with a standard of lead saturated with oxygen (active oxygen sensor): 1 – solid electrolyte wall; 2 – lead (bismuth); 3 – lead oxide; 4, 7 – electrodes; 5 – controlled liquid metal coolant; 6 – potentiometer with high internal resistance; 8 – temperature sensor of a heavy liquid metal coolant near a galvanic concentration cell

Изъятие проб "на вынос"

Кроме перечисленных методов контроля состояния контуров и теплоносителя, хорошо зарекомендовал себя метод отбора проб "на вынос" с дальнейшим исследованием в специализированной лаборатории. В этом случае можно исследовать образец пробы на содержание радионуклидов, железа, хрома, никеля, углерода, кислорода, примеси газов в защитном инертном газе [10].

Важно выполнить ряд требований к устройству отбора проб и его расположению в контуре ТЖМТ:

– необходимо иметь несколько точек отбора проб, расположенных в оптимальных зонах потока теплоносителя;

– температура пробы должно соответствовать температуре теплоносителя;

– не допускается изменять концентрацию и фазовое состояние примесей при отборе проб;

– пробы должны содержать 50–150 г ТЖМТ, причём одновременно требуется получать отбор не менее 6–10 штук проб;

– контейнер должны легко очищаться, выдерживать множество циклов "замораживание – размораживание".

В разных системах экспериментальных контуров с ТЖМТ использовались разные пробоотборники. Общим для них был ряд требований:

– пробы имели требуемую дозированность, забор производился в атмосфере инертного газа;

– пробоотборники имели конусообразную конструкцию;

– отбор проб производился строго из участка движения потока теплоносителя.

Такой вариант пробоотборного устройства (рисунок 4) широко применяется в системах свинец-висмутового теплоносителя [11].

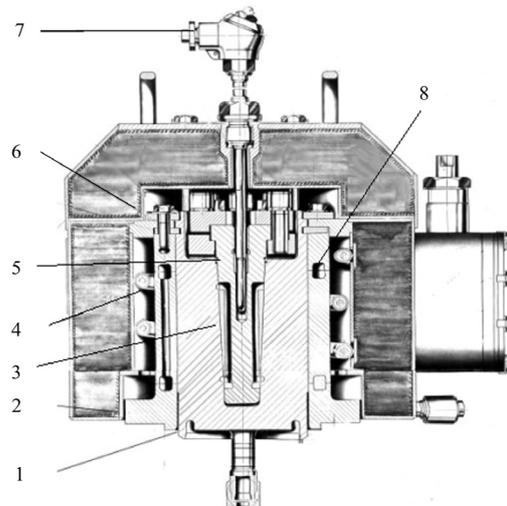


Рисунок 4 – Пробоотборник для отбора проб с извлечением застывших проб из конических объёмов, выполненных в корпусе пробоотборника: 1 – корпус; 2 – теплоизоляция и биологическая защита; 3 – проба тяжёлого жидкометаллического теплоносителя; 4 – электронагреватель; 5 – выемная ёмкость; 6 – съёмная крышка; 7 – термопара; 8 – камера охлаждения

Figure 4 – Sampler for sampling with the extraction of frozen samples from conical volumes made in the body of the sampler: 1 – housing; 2 – thermal insulation and biological protection; 3 – heavy liquid metal coolant sample; 4 – electric heater; 5 – removable container; 6 – removable lid; 7 – thermocouple; 8 – cooling chamber

Данная конструкция, представленная на рисунке 4, показала длительную работоспособность и простоту изъятия проб. С помощью её возможно отбирать пробы без опасности попадания внешней атмосферы в изолированный контур энергетической установки.

Заключение

Разработана концепция системы мониторинга контура тяжеловодного теплоносителя, основанная на анализе изменения концентрации примесей в теплоносителе и системе защитного газа. Установлено, что длительная эксплуатация таких контуров требует оперативного отслеживания отклонений от нормального режима, повреждений тепловыделяющих элементов и прогнозирования работоспособности. Показано, что анализ изменения концентрации примесей в теплоносителе и системе защитного газа является научно обоснованным методом выявления отклонений и прогнозирования дальнейшего развития событий. Мониторинг примесей является ключевым механизмом для своевременного выявления проблем и предотвращения аварийных ситуаций. Перспективой дальнейших исследований является разработка алгоритмов для прогнозирования развития событий на основе полученных данных и интеграция системы мониторинга в единую информационную систему установки.

Благодарности

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023–0005 “Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах”).

Список использованных источников

1. Безносков А.В. Оборудование энергетических контуров с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – Нижний Новгород, 2012.
2. Безносков А.В. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАт, 2007. – С. 434.

3. Мельников В.И. Экспериментальное исследование микроволнового рефлексрадарного уровнемера жидкометаллического теплоносителя / Бокова Т.А. [и др.]. Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2022. – № 1. – С. 79–89. DOI: 10.26583/пре.2022.1.07

4. Суворов Г.П. Опыт создания, эксплуатации стенда 27/ВТ / Г.П. Суворов, О.В. Кузько, М.И. Бутреев // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. ТЖМТ-98: сб. докладов конференции. – Обнинск, 1999. – С. 70–79.

5. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. Сборник докладов конференции в 2-х томах. – Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – Т. 1. – С. 14–17.

6. Безносков А.В. Экспериментальное исследование процессов, сопровождающих аварийное поступление органических соединений (масел) в свинец-висмутовый и свинцовый теплоносители / А.В. Безносков, И.В. Каратушина // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. Нижний Новгород, 2007. – № 3–2. – С. 58–67.

7. Асхадуллин Р.Ш. Методы регулирования содержания кислорода в ТЖМТ / Р.Ш. Асхадуллин, А.Н. Стороженко, А.Ю. Легких // Акционерное общество «ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт имени А.П. Лейпунского», Обнинск, Россия. Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. – 2017. – № 5. – С. 32–43.

8. Замыкание топливного цикла ядерной энергетике на базе реакторов на быстрых нейтронах: сб. докладов конференции (11–12 октября 2018 г., Томск). М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. – С. 328.

9. Безносков А.В. Оборудование энергетических контуров с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова // НГТУ им. Р.Е. Алексева. Нижний Новгород, 2011. – С. 536.

10. Федорович Е.Д. Аналитический обзор опыта эксплуатации и современных разработок ядерных энергетических установок средней и малой мощности с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 2 (Современные разработки) / Е.Д. Федорович, Н.П. Курдюков // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия; АО «Санкт-Петербургское Морское Бюро Машиностроения «Малахит». – Россия, Сосновый Бор, Научно-технический сборник “Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок.” – 2020. – Т. 21. – № 3. – С. 10–31.

11. Посажеников А.М. Очистка защитного газа от аэрозолей тяжелых жидкометаллических теплоносителей // А.М. Посажеников [и др.]. //

АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского». Обнинск, Россия, Журнал Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. – 2015. – № 2. – С. 102–119.

Acknowledgments

The presented results were obtained within the framework of the state assignment in the field of scientific activity (topic no. FSWE-2023–0005 "Features and specifics of the use of heavy liquid metal coolants in fast neutron reactor installations").

References

1. Beznosov AV, Bokova TA. Equipment of power circuits with heavy liquid metal coolant in nuclear power engineering. N. Novgorod, 2012.

2. Beznosov AV, Dragunov YuG, Rachkov VI. Heavy liquid metal heat carriers in nuclear power engineering. M.: IzdAt. 2007:434 p.

3. Melnikov VI [et al.]. Experimental study of a microwave reflexology level meter of a liquid metal coolant. Proceedings of higher educational institutions. Nuclear power engineering. 202241:79-89.

DOI: 10.26583/pre.2022.1.07

4. Suvorov GP, Kuzko OV, Bugreev MI. Experience in the creation and operation of stand 27/VT. Heavy liquid metal heat carriers in nuclear technologies. TJMT-98: collection of conference reports. Obninsk, 1999:70-79.

5. Heavy liquid metal heat carriers in nuclear technologies. A collection of conference reports in 2 volumes. Obninsk, SSC RF-FEI. 1999;1:14-17.

6. Beznosov AV, Karatushina IV. Experimental study of the processes accompanying the emergency intake of organic compounds (oils) in lead-bismuth and lead heat carriers. Nuclear Power Engineering. Nizhny Novgorod. 2007;(3-2):58-67.

7. Askhadullin RSh, Storozhenko AN, Lung AYu. Methods of regulating the oxygen content in TZHMT. Joint-Stock Company "SSC RF - Physics and Energy Institute named after A.I. Leypunsky". Obninsk, Russia, Journal Issues of Atomic Science and Technology. Series: nuclear reactor constants. 2017;(5):32-43.

8. Closure of the fuel cycle of nuclear power based on fast neutron reactors: collection of conference reports (October 11-12, 2018, Tomsk). Moscow: Publishing House of JSC NIKIET, 2020:328.

9. Beznosov AV, Bokova TA. Equipment of power circuits with heavy liquid metal heat carriers in nuclear power engineering: textbook. NSTU named after R.E. Alekseev. Nizhny Novgorod. 2011:536 p.

10. Fedorovich ED, Kurdyukov NP. Analytical review of the operational experience and modern developments of medium and low-power nuclear power plants with liquid metal coolant. Part 2 (Modern developments). St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. Russia; JSC "St. Petersburg Marine Bureau of Mechanical Engineering "Malachite". Russia, Sosnovy Bor, Scientific and Technical collection "Technologies for ensuring the life cycle of nuclear power plants". 2020;21(3):10-31.

11. Posazhennikov AM, Yagodkin IV, Papovyants AK, Grishin AG, Isaev AYu. Purification of protective gas from aerosols of heavy liquid metal heat carriers JSC "SSC RF - Physics and Energy Institute named after A.I. Leypunsky". Obninsk, Russia, Journal of Atomic Science and Technology. Series: nuclear reactor constants. 2015;(2):102-119.