

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-242-250

Эксплуатационные характеристики исследовательских и испытательных стендов и установок с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями

Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, Н.С. Волков, А.Р. Маров, А.В. Львов

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

Поступила 29.05.2023

Принята к печати 23.10.2023

Тема исследовательских стендов на тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе в данное время переживает второе рождение. Построены экспериментальные стенды, к примеру, *LILLA SCK SEN* (Центр ядерных исследований в Бельгии, г. Мол). Это один из наиболее известных стендов, который использует тяжёлые жидкометаллические теплоносители. Но достаточно полного описания компоновки оборудования и применения конкретных решений для контроля и поддержания работоспособности стендов на тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе не публикуется в открытой печати. Скорее всего это связано со спецификой производства. Целью работы являлось проведение комплексного обзора применения разнопланового оборудования в этой тематике. Это позволит более эффективно планировать состав новых исследовательских стендов на тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе и избежать ненужных ошибок при их эксплуатации. Тяжёлые жидкометаллические теплоносители атомных энергетических установок такие как свинец, эвтектический сплав свинец-висмут, сплавы свинец-литий, галлий существенно отличаются по своим физико-химическим свойствам от традиционных и хорошо изученных, таких как водяной теплоноситель, натрий, калий и газовые теплоносители (гелия и др.).

Ключевые слова: тяжёлые жидкометаллические теплоносители, PbBi, циркуляционные исследовательские стенды, расходомерное устройство, сопла Вентури

Адрес для переписки:

Мелузов А.Г.

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

Address for correspondence:

Meluzov A.G.

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

Для цитирования:

Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, Н.С. Волков, А.Р. Маров, А.В. Львов.
Эксплуатационные характеристики исследовательских
и испытательных стендов и установок с тяжёлыми
жидкометаллическими теплоносителями.
Приборы и методы измерений.
2023. Т. 14. № 4. С. 242–250.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-242-250

For citation:

Bokova TA, Meluzov AG, Volkov NS, Marov AR, Lviv AV.
Operational Characteristics of Research and Test Benches
and Installations with Heavy Liquid Metal Heat Carriers.
Devices and Methods of Measurements.
2023;14(4):242–250. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-242-250

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-242-250

Operational Characteristics of Research and Test Benches and Installations with Heavy Liquid Metal Heat Carriers

T.A. Bokova, A.G. Meluzov, N.S. Volkov, A.R. Marov, A.V. Lviv

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

Received 29.05.2023

Accepted for publication 23.10.2023

Abstract

The topic of research stands on heavy liquid metal coolants is currently undergoing a rebirth. Experimental stands have been built, for example, *LILLA SCK CEN* (Center for Nuclear Research in Belgium, Mol). This is one of the most famous stands that uses heavy liquid metal heat carriers. But a sufficiently complete description of the equipment line-up and the application of specific solutions for monitoring and maintaining the operability of the stands at the heavy liquid metal coolants is not published in the open press. Most likely, this is due to the specifics of research where there is a sufficient amount of secrecy. The aim of the work was to conduct a comprehensive review of various equipment use in this field. This will make it possible to plan more efficient composition of new research stands at heavy liquid metal coolants and avoid unnecessary mistakes when operating them. Heavy liquid metal heat carriers of nuclear power plants such as lead, eutectic lead-bismuth alloy, lead-lithium, gallium alloys differ significantly in their physicochemical properties from traditional and well-studied, widely used water, sodium, as well as liquid salt heat carriers, potassium, gases (helium, etc.).

Keywords: HLMC, PbBi, circulation research stands, flow-measuring device, Venturi nozzles

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, А.Р. Маров, А.В. Львов.
Эксплуатационные характеристики исследовательских
и испытательных стендов и установок с тяжёлыми
жидкометаллическими теплоносителями.
Приборы и методы измерений.
2023. Т. 14. № 4. С. 242–250.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-242-250

For citation:

Bokova TA, Meluzov AG, Volkov NS, Marov AR, Lviv AV.
Operational Characteristics of Research and Test Benches
and Installations with Heavy Liquid Metal Heat Carriers.
Devices and Methods of Measurements.
2023;14(4):242–250. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-242-250

Введение

В процессе проведения опытно-конструкторских работ неизбежно возникает необходимость проведения сравнительных испытаний в натуральных условиях принимаемых конструкторских решений, экспериментального обоснования оптимальных решений, их характеристик. На завершающих стадиях работ для обоснования принимаемых технических решений необходимо проведение испытаний полномасштабного оборудования в натуральных условиях их работы.

Целевое назначение стендов и установок с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями

Исследовательские (экспериментальные) стенды предназначены для проведения исследований характеристик и свойств теплоносителей, а также процессов в оборудовании и системах с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ), обосновывающих проектные и эксплуатационные решения энергетических установок с этими теплоносителями.

Исследовательские испытания на этих стендах производятся согласно программам и методикам испытаний, разрабатываемых в соответствии с действующей нормативной документацией [1].

По основному целевому, функциональному назначению исследовательские стенды условно подразделяются на следующие:

- теплофизические стенды, предназначенные для исследования специфических характеристик теплообмена между ТЖМТ и контактными теплообменными поверхностями [2, 3];

- гидродинамические стенды, предназначенные для исследования специфических гидравлических и гидродинамических характеристик потоков ТЖМТ. Исследоваться могут характеристики однокомпонентных потоков ТЖМТ в каналах различной геометрии, характеристики гидродинамической неустойчивости в параллельных каналах и др. Особую область составляют стенды для исследований двухкомпонентных потоков при технологических обработках контуров потоками ТЖМТ – газ (газопаровая смесь), а также стенды для изучения явлений, сопутствующих аварийным процессам,

«межконтурная неплотность парогенератора с различной величиной расхода воды, пара, газа, подаваемого в поток ТЖМТ;

- материаловедческие стенды, предназначенные для исследования коррозионного и эрозионного воздействия ТЖМТ на конструкционные материалы, стойкости конструкционных материалов в этих теплоносителях в диапазоне рабочих условий энергетических установок с ТЖМТ, включая ресурсные испытания материалов [3];

- стенды для исследования триботехнических характеристик – трения, износа, смазки контактных поверхностей в среде ТЖМТ. Перспективными можно рассматривать стенды и проводимые на них исследования, в которых одной контактной поверхностью является поверхность конструкционного материала, а другой – поверхность, контактирующей с ней ТЖМТ;

- стенды для исследования специфических свойств ТЖМТ имеют достаточное количество отличительных особенностей от свойств традиционно используемых теплоносителей энергетических контуров установок атомной энергетики (воды, натрия и др.).

К ним относятся:

- фундаментальные физические свойства (плотность, вязкость, теплоёмкость и др.);

- поверхностные свойства (краевой угол смачивания, поверхностное натяжение и др.), определяемые как самими теплоносителями, так и контактирующими с ними средами (газы, пары и др.) и материалами (стали, оксидные покрытия и др.);

- условия возникновения и характер кавитационных процессов в диапазоне рабочих условий атомных энергетических установок и др. [4];

- стенды для исследования физико-химических процессов, происходящих в системах с ТЖМТ (кинетических характеристик процессов окисления и восстановления ТЖМТ и содержащихся в них примесей, процессов массообмена и массопереноса примесей и др.);

- другие стенды и установки для проведения комплексных исследований.

Особенности создания и эксплуатации стендов и установок с расплавами Pb и PbBi

Стенды и установки с ТЖМТ отличаются повышенной сложностью, обуславливаемой

специфическими физико-химическими свойствами этих теплоносителей. Их эксплуатация также отличается повышенной сложностью, т. к. разогретый, заполненный жидкометаллическим теплоносителем контур требует непрерывного поддержания многих параметров, к примеру, поддержания всех участков с теплоносителем при температуре, превышающей температуру застывания теплоносителя, т. е. он требует непрерывной круглосуточной работы, независимо от того проводятся на нём в данный момент исследования, испытания или нет.

Нижний предел температур участков контура с ТЖМТ, обеспечиваемый системой обогрева, должен превышать температуру застывания теплоносителя. Верхний предел температур участка контура с ТЖМТ определяется условиями испытаний и стойкостью материалов в теплоносителе.

Средняя скорость потока ТЖМТ определяется условиями испытаний и работоспособностью соответствующих элементов, контактирующих в теплоносителе. В проточной части лопатных насосов скорость ТЖМТ может достигать 20 м/с и более, в трубопроводах и каналах контура скорость обычно принимается 1,0–3,5 м/с и менее.

Давление в отдельных участках контура ТЖМТ в общем случае складывается из давления защитного газа над свободной поверхностью теплоносителя, высоты заглубления участка под свободный уровень ТЖМТ и соответствующего напора насоса в условиях испытаний на соответствующем участке контура. Давление в системе защитного газа (аргон, гелий) невелико и составляет 0,1–2,0 кгс/см² (0,01–0,20 МПа). Высота заглубления участка под свободный уровень ТЖМТ определяется габаритами оборудования и компоновкой контура и составляет от десятых долей метра столба ТЖМТ (десятых долей кгс/см² или сотых долей МПа) до метров столба ТЖМТ. В аварийных процессах (межконтурная неплотность парогенератора и др.) локальное давление на участке контура может существенно повышаться и превышать рабочее давление в несколько раз.

В процессе эксплуатации контуров с ТЖМТ существенное значение имеет содержание и состав примесей в теплоносителе. В контурах ТЖМТ установок и стендов традиционно основной по массе примесью являются оксиды

свинца и висмута при использовании эвтектики. Это объясняется тем, что контуры стендов разуплотняются и контактируют с атмосферой воздуха согласно программам испытаний несравнимо чаще, чем контур реакторной установки, аварийное разуплотнение которого является одной из «тяжёлых» аварий.

В процессе эксплуатации контура с ТЖМТ в теплоноситель поступают продукты коррозии сталей – железо, никель, хром и др., которые окисляются, могут образовывать более сложные соединения и, как правило, концентрируются совместно с оксидами теплоносителя на его свободных поверхностях и в пристенных областях контура. При повышенных температурах теплоносителя (450–500 °С) ресурсная работоспособность сталей обеспечивается за счёт формирования и доформирования защитных покрытий на поверхностях контакта твёрдого и жидкого металлов. При температурах меньших 400 °С работоспособность сталей обеспечивается без каких-либо дополнительных мероприятий.

Циркуляционные исследовательские стенды включают в себя, как правило, базовую часть, а также сменяемые экспериментальные участки. В состав базовой части входят:

- система заполнения и дренирования в составе дренажного (плавильного) бака, механического фильтра очистки, на линии подачи ТЖМТ в контур, трубопроводов ТЖМТ и газа, арматуры, КИП;

- насос циркуляционный лопаточный или электромагнитный, что определяется функциональным назначением стенда;

- расходомер магнитный или электромагнитный с последовательно установленным расходомерным баком, по которому периодически производится тарировка магнитного или электромагнитного расходомера;

- система защитного газа (аргона, гелия, азота) с баллонами, редукторами, конденсатором пара и др.

Конструктивное исполнение экспериментальных участков определяется их назначением.

Сдаточные стенды с ТЖМТ предназначены для отработки вариантов натуральных конструкций энергетического контура ТЖМТ с целью определения оптимальной конструкции оборудования и режимов её эксплуатации.

На сдаточных стендах производится подтверждение всех характеристик испытываемого

оборудования реакторной установки требованиям соответствующего технического задания. Подтверждение получаемых результатов и их приёмку осуществляет соответствующая комиссия, как правило, из различных организаций, включая Генерального проектанта и Главного конструктора энергетической установки. Сдаточные испытания оборудования энергетических установок проводятся согласно соответствующим документам (программам и методикам или др.) этих испытаний, разрабатываемых согласно соответствующим документам (ГОСТ и др.). Конструктивное выполнение сдаточных стендов должно обеспечивать проведение соответствующих испытаний в условиях, максимально приближённых к условиям работы оборудования в натуральных условиях энергетических установок. При невозможности проведения испытаний полномасштабного изделия, например, парогенератора, принимается решение о проведении испытаний его полномасштабного (натурного) элемента, например, секции парогенератора.

Принципиальные схемы сдаточных стендов однозначно определяются функциональным назначением конструкций, особенностями испытуемого оборудования. В состав типового оборудования этих стендов входит дренажный (плавильный) бак, фильтр механический на линии подачи ТЖМТ из плавильного бака в контур, система по газу контроля и управления присутствия кислорода в жидкометаллическом теплоносителе, а также контура жидкометаллического теплоносителя от оксидов. Обычно, типичной процедурой на таких стендах является операция контурной пассивизации – создание оксидных слоёв на поверхностях конструктивных материалов, взаимодействующих с ТЖМТ. Типичными являются системы энергообеспечения, включающие настраиваемые системы электрообогрева трубопроводов и оснащения контура ТЖМТ и прочие потребители электроэнергии стенда; системы контроля, управляющие оборудованием и настройки параметров стенда; автоматизированные комплексы сбора, обработки и передачи информации; системы охлаждения оснащения стенда.

Стенды для испытаний моделей (макетов) механизмов и оборудования контура ТЖМТ предназначены для отработки на моделях в уменьшенном масштабе крупногабаритных

механизмов и оборудования. Метод испытаний и отработки сложного дорогостоящего оборудования на их моделях широко применяется в различных областях техники. Экономически целесообразнее, технически проще и быстрее выполнить опытно-конструкторские работы по экспериментальному определению оптимальных вариантов конструкций механизмов и оборудования контура ТЖМТ (главных циркуляционных насосов и др.) на моделях, учитывая высокую стоимость создания и эксплуатации стендов с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями.

Состав базовой типовой части стендов (установок) для испытаний моделей механизмов и оборудования аналогичен составу базовой части исследовательских (экспериментальных) стендов, с последовательным подключением к нему вариантов моделей одного и того же или различного оборудования (комплексов) реакторной установки с ТЖМТ.

Статические установки являются технически наиболее простыми, по сравнению с другими установками с ТЖМТ. Как правило, в таких установках проводятся исследования коррозионных и других массообменных процессов в среде ТЖМТ. Независимо от конструкции в них практически всегда присутствует естественная циркуляция ТЖМТ.

Статические установки (их иногда называют ампульными) выполняются в виде сосудов, заполненных ТЖМТ и имеющих свободную поверхность теплоносителя. Газовый объём над уровнем жидкого металла используется как компенсатор температурных расширений объёма ТЖМТ, а также для ввода в него тех или иных реагентов, согласно программе испытаний. Под свободный уровень в объёме ТЖМТ размещают образцы из исследуемых материалов, иногда образец погружают в объём ТЖМТ не полностью. Образцы могут прикрепляться к крышке ёмкости с ТЖМТ с помощью специальных элементов, исключающих перемещение образцов в ёмкости или обеспечивающих такое перемещение.

Приборы контроля параметров контура

Составной частью установки или стенда с жидкометаллическим контуром должны быть первичные датчики для контроля параметров,

которые являются частью как контура, так и компьютеризированной системы для сбора, обработки и отображения информации. В контур со свинцовым теплоносителем могут входить первичные датчики таких устройств контроля параметров как:

– погружные термопары для измерения температуры потока Рb или РbVi теплоносителей, расположенные в активном потоке;

– термопары на поверхности труб циркуляционного контура, а также на поверхности внешних стенок оборудования для контроля и управления температурными режимами устанавливаются в районе каждой нагревательной секции и часто имеют вторые дублирующие термопары [5];

– приборы для контроля расхода тяжёлого металлического теплоносителя (расходомерные шайбы) в главном циркуляционном контуре;

– если используются лопастные насосы, требуется установка датчика числа оборотов электронасоса. Устройство является неотъемлемой частью преобразователя частоты, который, в свою очередь, используется для управления асинхронным электродвигателем электронасоса. Кроме того, он также включает в себя датчик, предназначенный для мониторинга крутящего момента данного электронасоса;

– датчик измерения статического и динамического давления потока свинцовых или свинец-висмутовых теплоносителей;

– электроконтактные индикаторы уровня в отжимных резервуарах;

– датчики термодинамической активности кислорода в свинцовых теплоносителях обеспечивают контроль и регулирование активности кислорода в системе и устанавливаются на напорных трубопроводах [6];

– вольтметры и амперметры, соединённые с силовыми кабелями электродвигателей электронасосов.

Расходомерное устройство

Одним из важнейших приборов контроля для стендов и установок с ТЖМТ является расходомерное устройство. В отличие от прочих приборов, например, для измерений температуры, применяемые, как правило, унифицированными, принцип работы расходомерного устройства должен в полной мере отражать все особен-

ности и свойства тяжёлых жидкометаллических теплоносителей. Расходомер служит для замера расхода ТЖМТ учитывая температуру потока. Как правило, конструктивные особенности стендов и установок с ТЖМТ позволяют применять только расходомерные устройства с переменным перепадом давления. К данному типу относятся расходомеры с диафрагмой, расходомеры в виде сопла или сопла Вентури. Остальные виды расходомеров, такие как электромагнитные, кориолисовые, объёмные и др. могут быть использованы в сдаточных стендах ввиду больших диаметров трубопроводов, больших значений температур и расходов.

При выборе и оптимизации расходомера необходимо применять следующие нормы и стандарты:

1. ГОСТ 8.586.1 – 2005 (ИСО 5167 – 1:2003) Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Принципы и методы измерения. М. 2007.

2. ГОСТ 8.586.2 – 2005 (ИСО 5167 – 2:2003) Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Диафрагмы. Технические требования. М. 2007.

3. ГОСТ 8.586.3 – 2005 (ИСО 5167 – 3:2003) Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Сопла и сопла Вентури. Технические требования. М. 2007.

4. ГОСТ 8.586.4 – 2005 (ИСО 5167 – 1:2003) Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Методика выполнения измерений. М. 2007.

Один из методов измерения расхода свинцовых теплоносителей состоит в использовании сужающей поток диафрагмы. Часть потенциальной энергии теплоносителя преобразуется в кинетическую. Это приводит к увеличению средней скорости потока и уменьшению статического давления там, где стоит диафрагма. Изменение параметров потока (перепад давления) возникает в результате увеличения скорости, что может служить мерой расхода свинцового теплоносителя. Чем больше расход, тем больше разница в давлении. Такой подход к измерению расхода обеспечивает высокую точность и надёжность

результатов. Сужающая диафрагма обладает рядом преимуществ, включая простоту изготовления и установки, а также возможность применения в широком диапазоне чисел Рейнольдса [7]. Из ГОСТ 8.586.1-2005 следует, что такие диафрагмы могут быть установлены на диаметрах трубопроводов от 50 до 1000 мм. Из всех применяемых устройств сужения потока диафрагмы обладают наименьшей неопределённостью коэффициента истечения. Однако, при эксплуатации возникает одна существенная проблема – притупление входной кромки диафрагмы. Этот процесс, вероятнее всего, ускоряется при работе в высокотемпературной среде свинцового теплоносителя [8]. В процессе работы со временем происходит затупление входной кромки диафрагмы, при этом возникает дополнительная увеличивающаяся неопределённость коэффициента истечения. Также надо учитывать, что потери давления на диафрагмах намного больше потерь на других сужающих устройствах. Установка диафрагмы не требует протяжённых прямых участков трубопровода до и после неё. Для более комфортной эксплуатации узла диафрагмы предлагается отказаться от узла уплотнения и перейти на усиковый шов, что позволяет быстро провести замену изношенного затупленного узла [9].

Также в качестве сужающего устройства можно выбрать сопло, которое легко монтировать и которое может использоваться в широком диапазоне значений числа Рейнольдса. Согласно ГОСТ 8.586.3-2005, этот тип диафрагмы правильной устанавливается на диаметрах трубопроводов от 50 до 500 мм.

Одним из преимуществ сопла в качестве сужающего устройства является сравнительно меньшая потеря давления, чем у расходомера с диафрагмой. Также большим преимуществом соплового расходомера, по сравнению с диафрагменным, является его уменьшенная линейная (соосно с трубопроводом) длина. Длина диафрагменного расходомера $1,3 D$, сопла – $2/3 D$.

Метод с установкой трубы Вентури для измерения расхода свинцового теплоносителя основан на создании с помощью сопла местного сужения потока, при этом часть потенциальной энергии которого переходит в кинетическую энергию. Тогда средняя скорость потока в месте его сужения повышается, а статическое давление становится менее статического

давления до трубы Вентури. Чем больше разность давления (перепад), тем больше расход среды, т. е. перепад давления может показывать изменение расхода. Сопло в качестве сужающего устройства может быть предпочтительней исходя из того, что оно достаточно простое в установке и может использоваться при большом разбросе чисел Рейнольдса. Сужающее сопло, на основании ГОСТ 8.586.3-2005, применяют на диаметрах трубопроводов от 65 до 500 мм. Одно из преимуществ такого сужающего устройства – меньшие потери давления по сравнению с расходомерами на основе диафрагмы [10]. Недостатком расходомерного соплового устройства является увеличенная длина самого устройства, которая при прочих равных параметрах контура имеет больший линейный (соосный с трубопроводом) размер, а также сложность конструкции, по сравнению с диафрагменным расходомером. Длина диафрагменного расходомера $1,3 D$, трубы Вентури – $4,5 D$.

Заключение

Для получения адекватных экспериментальных данных при эксплуатации научно-исследовательских стендов и установок с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями требуется учитывать ряд важных требований, предъявляемых для их эксплуатации. Исходя из представленного материала, можно сделать ряд выводов:

- при определении характеристик исследовательских и испытательных стендов и установок с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями на первом этапе необходимо охарактеризовать их целевое назначение, для каких целей и задач они будут применяться;

- при проектировании и эксплуатации исследовательских и испытательных стендов и установок с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями следует учитывать особенности химических и физических свойств расплавов тяжёлых металлов;

- при выборе приборов контроля параметров контура необходимо опираться на номенклатуру устройств, пригодных и предназначенных для работы в условиях эксплуатации на исследовательских, испытательных стендах и установках с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями.

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. Зродников А.В., Ефанов А.Д., Орлов Ю.И., Мартынов П.Н., Троянов В.М., Русанов А.Е. Технология тяжелых жидкометаллических теплоносителей свинец-висмут и свинец // Атомная энергия. 2004. Т. 97, вып. 2. С. 98-103.

2. Beznosov A.V., Bokova T.A., Bokov P.A. «Horizontal steam generators for low and medium-powered reactor installations cooled with lead and lead-bismuth coolants». Steam Generators: Design, Types and Applications. 2017. С. 1-134.

3. Рачков В.И., Сорокин А.П., Жуков А.В. Теплогидравлические исследования жидкометаллических теплоносителей в ядерных энергетических установках // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 56. № 1. С. 121-136.

DOI: 10.7868/S0040364418010143

4. Дроздов Ю.Н., Макаров В.В., Пучков В.Н. Обоснование износостойкости оборудования АЭС с жидкометаллическими теплоносителями. Трибология – машиностроению // Труды десятой юбилейной Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов. 2014. С. 40-41.

5. Гулевский В.А., Орлов Ю.И., Ефанов А.Д., Мартынов П.Н., Левченко Ю.Д., Ульянов В.В. Гидродинамические проблемы технологии ТЖМТ в РУ петлевой и моноблочной конструкций // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2008. № 4. С. 15-33.

6. Легких А.Ю., Скоморохов А.Н., Садовничий Р.П. Неопределенность растворимости кислорода в жидком свинце // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2019. № 3. С. 252-260.

DOI: 10.55176/2414-1038-2019-3-252-260

7. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Под. Ред. П.Л. Кириллова, ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск, 2005.

8. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. 3-е изд., испр. и доп. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016.

9. Bokova T.A., Bokov P.A., Volkov N.S., Markov A.R., Baranova L.V. Experimental study of the state

of the wall area in the annular gap in the system "rotating shaft – HLMC – bracket wall" Proceedings of the R.E. Alekseev NSTU. 2021. No. 3 (134). Pp. 57-67.

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_3_57

10. Beznosov A.V., Bokova T.A., Makhov K.A., Shumilkov A.I., Albagachiev A.Y., Drozdov Y.N. Friction in the annular gaps between the control rods and housing of the brest reactor Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. № 4. С. 279-284.

DOI: 10.3103/S1068798X16040031

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. Zrodnikov AV, Efanov AD, Orlov YuI, Martynov PN, Troyanov VM, Rusanov AE. Technology of heavy liquid metal heat carriers lead-bismuth and lead. Atomic energy. 2004;97(2):98-103.

2. Beznosov A.V., Bokova T.A., Bokov P.A. Horizontal steam generators for low and medium-powered reactor installations cooled with lead and lead-bismuth coolants. Steam Generators: Design, Types and Applications. 2017:1-134.

3. Rachkov V.I., Sorokin A.P., Zhukov A.V. Thermohydraulic studies of liquid metal heat carriers in nuclear power plants. Thermophysics of high temperatures. 2017;56(1):121-136. **DOI:** 10.7868/S0040364418010143

4. Drozdov YuN, Makarov VV, Puchkov VN. Justification of wear resistance of NPP equipment with liquid metal heat carriers. Tribology – mechanical engineering. Proceedings of the tenth anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference with the participation of foreign specialists. 2014:40-41.

5. Gulevsky VA, Orlov YuI, Efanov AD, Martynov PN, Levchenko YuD, Ulyanov VV. Hydrodynamic problems of TMT technology in loop and monoblock structures. Issues of atomic science and technology. Series: Physics of Nuclear Reactors. 2008;4:15-33.

6. Legkih AY, Skomorokhov AN, Sadovnichy RP. Uncertainty of oxygen solubility in liquid lead. Issues of atomic science and technology. Series: Nuclear reactor constants. 2019;3:252-260.

DOI: 10.55176/2414-1038-2019-3-252-260

7. Kirillov PL (ed). Thermophysical properties of nuclear engineering materials. SSC RF FEI, Obninsk, 2005.

8. Levich VG. Physico-chemical hydrodynamics. 3rd ed. Izhevsk: Institute of Computer Research; 2016.

9. Bokova TA, Bokov PA, Volkov NS, Markov AR, Baranova LV. Experimental study of the state of the wall area in the annular gap in the system "rotating shaft – HLMC – bracket wall" Proceedings of the R.E. Alekseev NSTU. 2021;134(3):57-67.

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_3_57

10. Beznosov AV, Bokova TA, Makhov KA, Shumilkov AI, Albagachiev AY, Drozdov YN. Friction in the annular gaps between the control rods and housing of the brest reactor Russian Engineering Research. 2016;36(4):279-284.

DOI: 10.3103/S1068798X16040031