

УДК 621.0+532.5

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_62

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВОГО МАССООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК БРС-ГПГ НА ВОДЯНОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Т.А. БоковаORCID: 0000-0002-7666-2866 e-mail: tatabo@bk.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Н.С. Волков**ORCID: 0000-0003-2256-0984 e-mail: Hortmetall@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Р. Маров**ORCID: 0000-0003-4398-5631 e-mail: marov_2011@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Г. Мелузов**ORCID: 0000-0002-3870-0905 e-mail: meluzov@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Т.К. Зырянова**ORCID: 0000-0002-5336-3556 e-mail: tanusha3111@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований работоспособности устройства ввода газообразных сред для задач технологии тяжелого жидкометаллического теплоносителя газового массообменного аппарата (ТЖМТ ГМА) применительно к инновационной реакторной установке средней и малой мощности БРС-ГПГ. Приведена схема новой экспериментальной установки на водяном теплоносителе, дано описание разработанных экспериментальных сменных участков, устанавливаемых для дробления водяного потока и введения воздушной составляющей. Представлена программа и методика выполнения экспериментальных исследований, включая фото- и видеofиксацию проведенных работ, а также их результаты. Разработаны научно-технические рекомендации, касающиеся особенностей конструкции и режимных параметров эксплуатации ГМА оригинальной конструкции, принципиально отличающегося от аналогов и предназначенного для регулировки окислительного потенциала ТЖМТ – Рb, Рb-Вi применительно к установке средней и малой мощности БРС-ГПГ. Результаты работы являются концептуально-методологической основой конструктивных решений газового массообменника в контурах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями.

Ключевые слова: реакторные установки, реакторы на быстрых нейтронах, технология тяжелого жидкометаллического теплоносителя, горизонтальный парогенератор, газовый массообменный аппарат, очистка тяжёлого жидкометаллического теплоносителя.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бокова, Т.А. Экспериментальные исследования эффективности газового массообменного аппарата для реакторных установок БРС-ГПГ на водяном теплоносителе / Т.А. Бокова, Н.С. Волков, А.Р. Маров, А.Г. Мелузов, Т.К. Зырянова // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 62-71.
DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_62

EXPERIMENTAL STUDIES TO CONFIRM THE EFFECTIVENESS OF THE GAS MASS TRANSFER APPARATUS FOR THE BRS-GPG ON A WATER COOLANT

T.A. Bokova

ORCID: 0000-0002-7666-2866 e-mail: tatabo@bk.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

N.S. Volkov

ORCID: 0000-0003-2256-0984 e-mail: Hortmetall@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.R. Marov

ORCID: 0000-0003-4398-5631 e-mail: marov_2011@mail.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.G. Meluzov

ORCID: 0000-0002-3870-0905 e-mail: meluzov@mail.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

T.K. Zyryanova

ORCID: 0000-0002-5336-3556 e-mail: tanusha3111@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The results of experimental and theoretical studies of the performance of the gaseous media input devices for the tasks of heavy liquid metal coolant gas mass transfer apparatus (HLMC GMTA) technology in relation to the innovative small and medium-sized reactor plants with horizontal steam generators (BRS-GPG) are presented. A diagram of a new experimental setup with water coolant is presented, and a description of the developed experimental replacement sections installed to crush the water flow and introduce an air component is given. The program and methodology for performing experimental studies are presented, including photo and video recording of the performed work, as well as their results. Scientific and technical recommendations on the design features and operating parameters of a gas mass transfer apparatus of an original design, which is fundamentally different from its analogues and intended to regulate the oxidation potential of HLMC – Pb, Pb-Bi, in relation to the small and medium-sized reactor plants BRS-GPG have been developed. The results of the study are the conceptual and methodological basis for design solutions for a gas mass exchanger in circuits with lead and lead-bismuth coolants.

Key words: reactor plant, fast-neutron reactor, heavy liquid metal coolant technology, horizontal steam generator, gas mass transfer apparatus, heavy liquid metal coolant purification.

FOR CITATION: T.A. Bokova, N.S. Volkov, A.R. Marov, A.G. Meluzov, T.K. Zyryanova. Experimental studies to confirm effectiveness of gas mass transfer apparatus for water coolant BRS-GPG reactor plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 62-71. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_62

Введение

В настоящее время в российской атомной энергетике реализуется уникальный инновационный проект «Прорыв», в рамках которого уделяется особое внимание установкам средней и малой мощности, в том числе, работающим на тяжелых жидкометаллических теплоносителях (ТЖМТ). Это направление требует глубокой проработки с применением инновационных методов экспериментальных исследований. Они дают импульс для развертыва-

ния разноплановых работ по разработке, проектированию, созданию и научному исследованию конструктивных решений узлов и механизмов реакторных установок (РУ) малой и средней мощности. Такие решения могут быть приняты с учетом многообразного опыта создания и эксплуатации как стендов-прототипов, так и уникальных транспортных установок проектов атомных подводных лодок 645 и 705К проектов, создаваемых и эксплуатирующихся в конце прошлого века. Сейчас разворачиваются работы по созданию РУ БРЕСТ, требующие, в свою очередь, решения проблемы очистки ТЖМТ газосодержащими смесями. Эксплуатация РУ с ТЖМТ, благодаря особым свойствам и характеру течения такого теплоносителя, требует особого подхода к технологии. Поддержание требуемого окислительного потенциала ТЖМТ с применением газового массообменного аппарата (ГМА), работа которого основана на принципе «падающих струй», выступает одной из приоритетных задач. Один из вариантов ее решения – создание ГМА для формирования двухкомпонентных потоков *газовая смесь – ТЖМТ* за счет энергии «падающих струй». Российскими и зарубежными специалистами разработано несколько вариантов систем технологии ТЖМТ (т.е. введения газовых смесей для очисток контуров с ТЖМТ). Среди них – твердотельный массообменный аппарат, массообменный аппарат пневмодозаторного типа, массообменный аппарат с газлифтным насосом и ряд других. Также для этой же цели нашли применение различные способы ввода газовых смесей H_2 и O_2 в теплоноситель: эжекция, обработка свободной поверхности теплоносителя, а также диспергация газа различными вариантами, в том числе, с помощью метода захвата газа с помощью «падающих струй», который реализуется ГМА.

В соответствии с общепринятой методологией проведения экспериментальных исследований на ТЖМТ, было решено провести испытания на водяном теплоносителе на модели части реакторного контура БРС-ГПГ для определения степени применимости данного ГМА к этой установке. Данный этап позволяет сделать начальные конструктивные решения аппарата более соответствующими дальнейшему ходу исследований на натуральных средах и параметрах. Предлагалось выполнение прозрачной макетной модели массообменника из органического стекла и на водяном теплоносителе для лучшего понимания происходящих процессов, а также для снижения финансовых затрат по сравнению с натурными экспериментами.

Требуют решения следующие основные задачи:

- определения местоположения массообменника в РУ с горизонтальными парогенераторами, исходя из создания пузырей наименьшего размера;
- разработки экспериментальной установки из органического стекла с водой в качестве теплоносителя, учитывая конструктивные особенности РУ БРС-ГПГ;
- подготовки ЧТД для создания узлов и механизмов экспериментальной установки;
- монтажа экспериментальной установки;
- написания программы и методики эксперимента;
- определения влияния ГМА на степень газонасыщения контура экспериментальной установки;
- анализа экспериментальных данных.

Планировалось получение массива качественных данных работоспособности массообменника при разных компоновках и режимах работы экспериментального стенда с применением фото- и видеокадров градиента концентраций «легкой» фракции в водяном теплоносителе.

1. Ввод окислительно-восстановительных газов в поток теплоносителя с помощью «падающих струй» применительно к реакторной установке БРС-ГПГ

Предлагаемая инновационная реакторная установка с горизонтальными парогенераторами имеет компоновку и циркуляцию ТЖМТ, позволяющую снизить его длину, а также исключить подъемно-спускные участки [2]. Минуя активную зону, теплоноситель направляется в горизонтальный парогенератор (пароперегревательную секцию), который имеет сво-

бодный уровень, далее в секцию испарителя, а потом, за счет напора главного циркуляционного насоса, опускается на вход активной зоны. Такая компоновка позволяет создать естественную циркуляцию теплоносителя, повышая тем самым безопасность РУ. При максимальной удельной мощности и небольших массогабаритных характеристиках возможно повышение безопасности реакторной установки.

2. Экспериментальные исследования по определению применимости газового массообменного аппарата

2.1. Конструктивная схема ГМА

Одной из задач, стоящих перед разработчиками РУ БРС-ГПП, является создание аппарата для очищения контура ТЖМТ путем ввода восстановительно-окислительной газообразной фазы для поддержания качества теплоносителя и контура в заданных пределах [3]. Научным коллективом кафедры «Атомные и тепловые станции» НГТУ им. Р.Е. Алексева был представлен вариант ГМА, работа которого основывается на принципе «падающих струй». При этом в теплоноситель планируется вводить любую газовую фазу и их комбинацию, в зависимости от состояния контура и стоящих задач перед эксплуатационным персоналом (рис. 1).

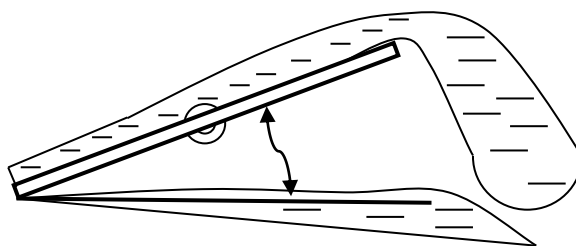


Рис. 1. Схематичное изображение массообменного аппарата для БРС-ГПП

Fig. 1. Schematic representation of a mass transfer apparatus for a BRS-GPG

Предлагаемое техническое решение включает в себя пластину, помещенную под уровень ТЖМТ, расположенную под углом навстречу направлению его течения.

2.2. Определение местоположения газового массообменного аппарата в реакторной установке с горизонтальными парогенераторами

Исходя из особенностей конструкции БРС-ГПП, а также на основе имеющегося опыта эксплуатации экспериментальных высокотемпературных стендов и установок, было определено место установки предлагаемого массообменного аппарата применительно к РУ БРС-ГПП [4]. Благодаря возможности подхвата пузырьков аргона или водорода, а также попадания и дробления их в циркуляторе установки, было выбрано место на входе в главный циркуляционный насос на линии выхода теплоносителя из ПГ и входа в ГЦН.

2.3. Экспериментальный стенд

Движение теплоносителя на вновь созданном и изготовленном стенде ФТ-17 (рис. 2) осуществляется следующим образом: посредством напора циркулятора, водяной теплоноситель направляется вниз по каналу (4), далее он идет по нижнему (5) участку, поднимаясь в подъемный канал (6), в котором размещен экспериментальный участок (2). Циркуляция замыкается на верхнем горизонтальном канале, падая в опускную часть (4) [5]. Экспериментальная установка создана с учетом масштабирования БРС-ГПП 1:1.

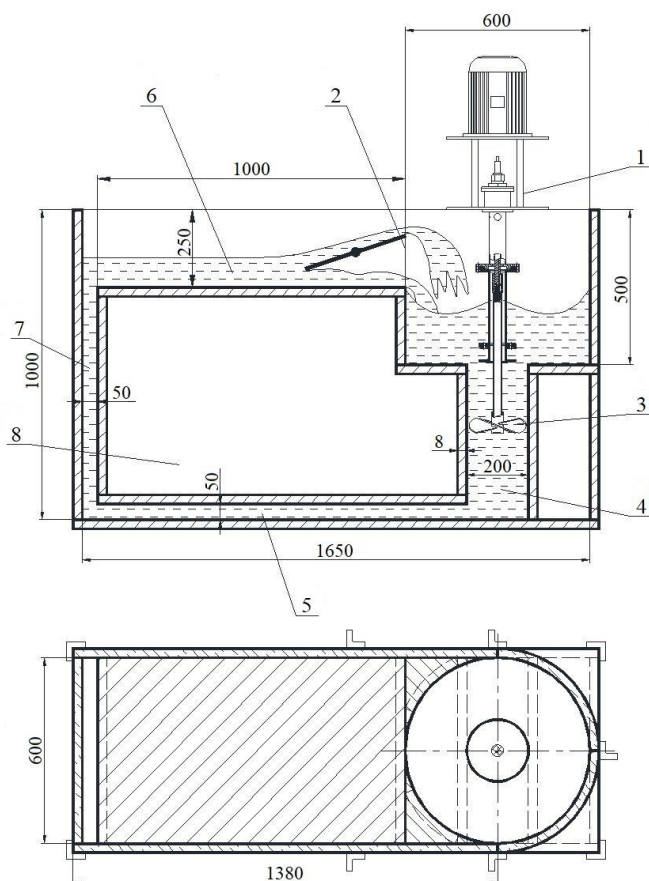


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки ФТ-17 НГТУ:
 1 – циркулятор, 2 – экспериментальный участок, 3 – рабочее колесо, 4 – опускающий канал,
 5 – нижний канал, 6 – верхний канал, 7 – подъемный канал, 8 – вытеснитель

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup FT-17 NNSTU:
 1 – circulator, 2 – experimental section, 3 – impeller, 4 – lowering channel,
 5 – lower channel, 6 – upper channel, 7 – lifting channel, 8 – displace

2.4. Методика проведения экспериментальных исследований

Исследовательские испытания проводились на стенде с моделированной входной частью ГЦН РУ БРС-ГПГ на водяном теплоносителе при температуре 25 °С. Экспериментальный участок представлял собой пластины разного размера и формы, которые устанавливались под различными углами в верхнюю горизонтальную часть установки (рис. 3, 4). Использовались пластины двух видов: первый тип крепления – с помощью петель, второй – с помощью реек. Движение водяного теплоносителя достигалось с помощью циркулятора, который был подключен к преобразователю частоты (ПЧ) для регулировки частоты вращения колеса. С помощью ПЧ выставлялась требуемая скорость теплоносителя в контуре [6, 7].

Программа-методика испытаний включала:

- обоснование эффективной работы пластин предложенной конфигурации ГМА на экспериментальном стенде;
- проектирование экспериментальной высокотемпературной установки для проведения работ со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями применительно к реакторной установке БРС-ГПГ с подобранными геометрией и местом установки пластинами, показавшими наилучший результат в дроблении пузырей;
- сравнение и анализ полученных результатов и формулировка обоснованных рекомендаций по конструкции и месте установки массообменного аппарата для контуров с ТЖМТ.

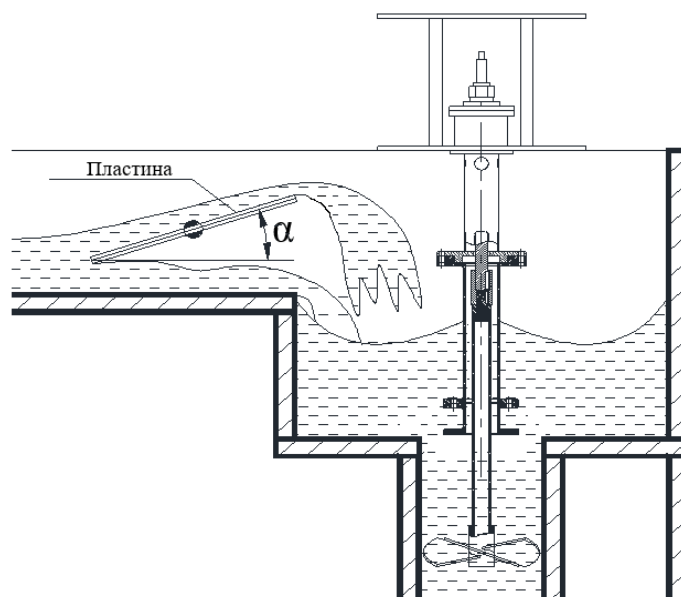


Рис. 3. Место установки массообменного аппарата в экспериментальном стенде ФТ-17 НГТУ

Fig. 3. Place of installation of the mass transfer apparatus in the experimental setup FT-17 NNSTU

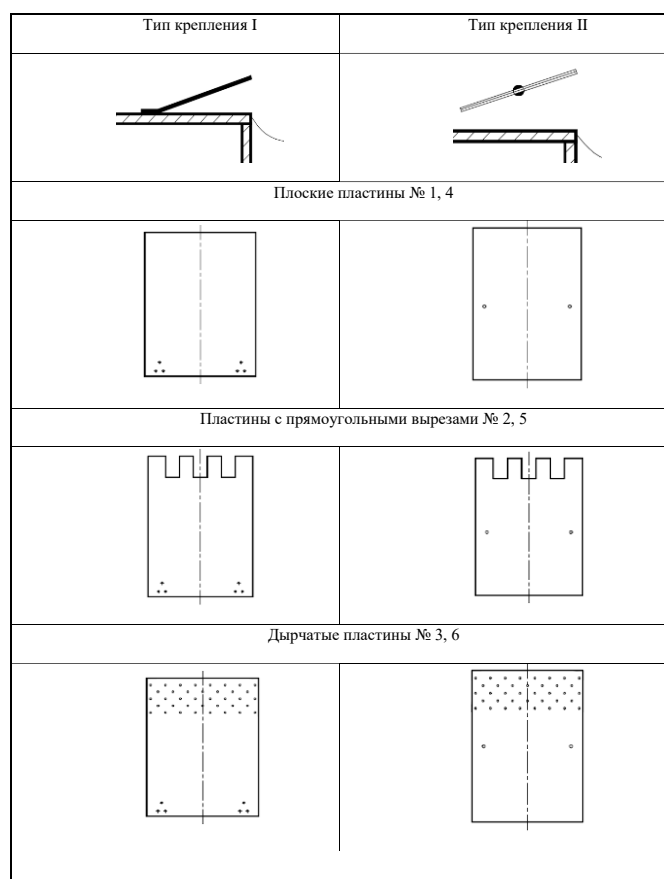


Рис. 4. Схема геометрии пластин газового массообменного аппарата для стенда ФТ-17НГТУ на водяном теплоносителе

Fig. 4. Scheme of the plate's geometry of a gas mass transfer apparatus for the setup FT-17 NNSTU with water coolant

Для определения скорости течения водяного теплоносителя использовался метод поверхностных поплавков: до момента начала испытаний производилась разметка верхнего лотка экспериментального стенда, отмечались начальная и конечная точки, определялся путь между ними. В первый момент производился сброс поплавка на поверхность воды до начальной точки с одновременной фиксацией секундомером, измерялось время прохождения всего участка до точки окончания. Этапы повторялись десять раз, определялось среднее арифметическое показание скорости потока воды.

2.6. Программа проведения испытаний

Испытания проводились в три основных этапа. На первом из них проводился пуск без массообменного аппарата, при этом велась видеофиксация, на втором этапе устанавливались поочередно пластины с петлевым креплением, и также проводилась видеофиксация, на третьем этапе исследовались пластины с реечным креплением. На втором и третьем этапах пластины устанавливались под углом α (рис. 3, 4), равным 10, 20 и 30° [8].

Фиксировалось состояние водо-воздушного потока непосредственно за установленными пластинами, определялась их эффективность. В качестве критериев эффективности выбраны размеры пузырей и скорость потока, что является наиболее важными факторами для работы массообменника в среде ТЖМТ. На рис. 5-7 показаны фото работы массообменного аппарата с пластиной с отверстиями петлевого типа крепления, расположенной под углом $\alpha=20^\circ$.



Рис. 5. Работа экспериментального стенда с водо-воздушным потоком

Fig. 5. Photo of the experimental setup with water-air flow in operation

Эффективность работы различных пластин при проведении испытаний было необходимо подтвердить независимым экспериментальным параметром, определяемым на представленном экспериментальном стенде, для чего был выбран параметр $S_{отн}$ – относительная площадь воздушной (газовой) фазы (%). Он показывает отношение площади воздушных пузырьков к площади водяного теплоносителя. Эта площадь может быть определена по фотографиям из видеосъемки, проводимой во время экспериментальных исследований.

Способ обработки фотографий на подъемном участке стенда показан на рис. 7. С помощью программного редактора фото он конвертируется в черно-белое изображение, на котором отчетливо видны пузыри воздуха в потоке воды (рис. 8).



Рис. 6. Фотография рабочего колеса циркулятора экспериментального стенда в действии
Fig. 6. Photo of the circulator impeller of the experimental setup in action



Рис. 7. Фотография подъемного участка стенда в момент снятия данных
Fig. 7. Photo of the lifting section of the setup at the time of data collection



Рис. 8. Фотография подъемного участка стенда после программной обработки

Fig. 8. Photo of the lifting section of the setup after software processing

Фотография и изображение обрезается в масштабном соотношении (исходя из габаритов экспериментальной установки) в том месте, где пузыри воздуха отчетливо различимы (рис. 9).



Рис. 9. Преобразованное изображение воздушных пузырей, подготовленное для обработки

Fig. 9. Converted image of air bubbles prepared for processing

Далее проводилась обработка фотографии с помощью графической программы, которая служит для анализа различных изображений, в том числе, для определения количественного определения габаритов объекта. Для получения наиболее исчерпывающей информации, было принято решение сделать выборку из пяти кадров. После обработки выборки, результаты предложены в табличном виде (рисунки 10).

Процентное соотношение площади пузырей к площади теплоносителя в контуре - Сотн, %							
Тип Геометрия	Петлевое			Шпилька			БЕЗ пластин, контроль
	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$	
Плоская	0,494	2,238	2,452	0,288	1,324	2,374	0,1
Отверстия	0,352	2,196	2,346	0,246	1,634	2,358	
Вырезы	0,364	1,956	2,454	0,296	1,31	2,384	
		Средн= 2,417			Средн= 2,372		

Рис. 10. Сводная таблица результатов обработки видеоматериалов

Fig. 10. Summary table of video processing results

Заключение

Выбор места установки массообменного аппарата применительно к РУ БРС-ГПП должен определяться особенностями компоновки реакторной установки БРС-ГПП, исходя из максимального эффекта разбиения «легкой фракции», вводимой в ТЖМТ. Выбранный участок (смоделированный в процессе выполнения работы) наиболее эффективен для расположения аппарата для очистки теплоносителя в рамках работ технологии ТЖМТ. По итогам работы можно сделать вывод об эффективной работе плоских пластин петлевого типа крепления с углом наклона $\alpha=20^\circ$ и $\alpha=30^\circ$.

Разработаны научно-технические рекомендации для конструктивных решений газового массообменника в контурах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Для качественного определения эффективности работы пластин различных конфигураций предложен параметр отношения площади газовой фазы к площади теплоносителя, определяемого по кадрам видеоряда: относительная площадь газовой фазы – $S_{отн}$ (%). Результаты работ будут использованы для обоснованного выбора методики проведения экспериментальных исследований газового массообменного аппарата на свинцовом и свинец-висмутовом теплоносителях.

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»).

Библиографический список

1. **Громов, Б.Ф.** Применение расплавов эвтектики свинец-висмут и свинца в качестве теплоносителя ЯЭУ / Б.Ф. Громов, В.И. Субботин, Г.И. Гошинский // Атомная энергия. 1992. Т. 73. Вып. 1. С. 19.
2. **Сорокин, А.П.** Экспериментальное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в реакторах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями / А.П. Сорокин, Ю.А. Кузина, А.И. Орлов // Вопросы атомной науки и техники. 2019. Вып. 1.
3. **Askhadullin, R.** Estimating the change of a mass exchanger productivity on account of oxygen resource decreasing / R. Askhadullin, A. Legkikh. // V international conference Heavy liquid metal coolant in nuclear technologies (HLMC-2018) 8-10 October 2018 Obninsk, Russia.
4. **Боков, П.А.** Исследование условий возникновения и характеристик кавитации в главный циркуляционных насосах реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.11 / П.А. Боков. – Нижний Новгород, 2015. – 177 с.
5. **Лаврова, О.В.,** Влияние термодинамической активности кислорода на границе раздела «сталь - теплоноситель» на массоперенос железа и хрома / О.В. Лаврова, А.Ю. Легких. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2023. № 3. С. 221-232.
6. **Иванов, К.Д.** Особенности окисления сталей в тяжелых жидкометаллических теплоносителях / К.Д. Иванов, С.А. Ниязов, А.А. Осипов. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2022. № 2. С. 76-88.
7. **Махов, К.А.** Исследование структуры и триботехнических характеристик пристенного слоя в потоке ТЖМТ применительно к элементам контуров с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ: дис. ... канд. техн. наук / К.А. Махов. – Нижний Новгород, 2015. – 164 с.
8. **Безносков, А.В.** Обоснованные технические решения реактора установок БРС-ГПП малой и средней мощности со свинцовыми свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, П.А. Боков, Н.С. Волков, А.А. Карбышев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 2. С. 42-48.

*Дата поступления
в редакцию: 10.06.2023*

*Дата принятия
к публикации: 11.11.2023*