

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ ВОДОРОДНОЙ ОЧИСТКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ КОНТУРАМ С ТЯЖЕЛЫМИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

В.В. Ульянов, П.Н. Мартынов, В.А. Гулевский, А.С. Фомин, Ю.А. Тепляков

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск

Р

Рассмотрена проблема загрязнения циркуляционных контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями шлаковыми отложениями на основе оксида свинца. Для решения проблемы применяется метод водородной очистки, заключающийся во введении смеси $\text{Ar-H}_2\text{O-H}_2$ непосредственно в поток циркулирующего теплоносителя. Устройством, используемым для водородной очистки, является механический (дисковый) диспергатор газа. Разработана методика его испытаний, проведена водородная очистка циркуляционного контура стенда ТТ-2М при помощи диспергатора. Результаты исследований позволяют рекомендовать диспергатор к использованию в первых контурах перспективных реакторных установок на быстрых нейтронах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями.

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, циркуляционный контур, диспергатор газа, водородная очистка, датчик активности кислорода.

Key words: heavy liquid metal coolant, the circulation loop, gas dispergator, hydrogen purification, oxygen sensor activity.

Проблеме взаимодействия тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) с водородом, водой и водяным паром долгое время во всем мире уделяется пристальное внимание, т.к. расплав свинца и его сплав с висмутом рассматриваются в качестве перспективных теплоносителей для коммерческих атомных электростанций с реакторными установками (РУ) на быстрых нейтронах, а в последнее время эта тема стала особенно актуальной.

Многолетние исследования и богатый опыт эксплуатации Pb-Bi- и Pb-контуров показали, что в них неизбежно происходит поступление примесей в ТЖМТ, взаимодействие этих примесей между собой, с компонентами теплоносителей и конструкционными материалами, транспортировка и локализация продуктов этих взаимодействий. Состав, физическое состояние и количество примесей во многом зависят от стадии и условий эксплуатации контуров. На

© В.В. Ульянов, П.Н. Мартынов, В.А. Гулевский, А.С. Фомин, Ю.А. Тепляков, 2013

этапе создания контура происходит взаимодействие Pb (Pb-Bi) и конструкционных материалов с атмосферой. При эксплуатации контура после заполнения его ТЖМТ дополнительное количество примесей образуется за счет растворения компонентов конструкционных материалов. Дополнительное воздействие могут вносить течи парогенераторов. Однако основное количество примесей образуется за счет взаимодействия ТЖМТ и контура с кислородом воздуха, которое происходит в ситуациях, связанных с разгерметизацией контура (при замене оборудования, датчиков контроля параметров работы и других узлов, а также при проведении ремонтных работ) [1, 2].

Первоначально отсутствовали способы очистки ТЖМТ от примесей на основе PbO, которые составляют большую часть всех нерастворимых примесей. Также важной задачей было поддержание качества теплоносителя после очистки. Для решения этих проблем был разработан метод водородной очистки теплоносителя, основанный на введении смесей водорода и водяного пара непосредственно в поток ТЖМТ.

Сущность такого ввода заключается в подаче в объем ТЖМТ газовой фазы (химически активной по отношению к нерастворимым примесям на основе PbO) при помощи специального устройства, диспергирующего его в потоке теплоносителя. Образуется двухкомпонентный поток ТЖМТ-газ. При его циркуляции по контуру происходит доставка восстановительной газовой фазы к локальным участкам поверхностей контура, в том числе и местам концентрации примесей, отложений. При взаимодействии отложений на основе PbO с полученной мелкодисперсной газовой фазой происходит восстановление Pb со значительным или полным разрушением отложений. Дополнительное разрушение отложений происходит за счет

- растворения отложений в раскисленном водородом теплоносителе;
- динамического воздействия двухкомпонентного потока на отложения вследствие дополнительных касательных и нормальных напряжений вблизи стенок контура, возникающих при движении двухкомпонентного потока.

Дисперсные частицы разрыхляющихся и разрушающихся отложений примесей за счет эффекта флотации могут «высаживаться» на границы раздела газовая фаза-ТЖМТ и далее транспортироваться с этим пузырьком в составе двухкомпонентного потока или непосредственно потоком ТЖМТ. Затем происходят сепарация всех взвешенных в теплоносителе примесей на его зеркале и завершающее полное восстановление свинца из этих примесей. При этом продукт водородного восстановления (Pb) возвращается в объем ТЖМТ.

В период с 1968 по 1999 гг. проведено огромное количество исследований [2] в области применения водорода пара в технологии тяжелого теплоносителя (ТТТ). Их результаты позволили обосновать технологию обращения с ТЖМТ Pb-Bi-контуров транспортных РУ. Транспортные РУ были петлевой конструкции, т.е. имели протяженные трубопроводы, относительно высокие скорости циркуляции и небольшие объемы ТЖМТ. Компенсатор объема контуров транспортных РУ был проточный с расходом ТЖМТ от 1,0 до 2,0 % основного расхода. Значения средних скоростей в контуре петлевой РУ в номинальном режиме достигали от 2,5 до 3 м/с, в режиме водородной очистки от 0,7 до 1,5 м/с. Нижний предел скорости ТЖМТ при проведении очистки определен в результате целого комплекса исследований, показавших отсутствие транспортировки газовой фазы при скоростях ниже 0,6 м/с [4].

В настоящее время в рамках федеральной целевой программы «Ядерные энерго-

технологии нового поколения на период 2010–2015 гг. и на перспективу до 2020 г.» ТЖМТ исследуются с точки зрения применимости в гражданской атомной энергетике (одним из результатов этой программы будет являться построение опытно-демонстрационных образцов реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым и со свинцово-висмутовым теплоносителями).

Особенность создаваемых РУ в том, что они являются установками моноблочной (баковой) или условно баковой (усовершенствованной петлевой) конструкции. Условия работы, режимы образования отложений и режимы применения средств ТТТ транспортных РУ и разрабатываемых РУ существенно отличаются (в последних невозможно применение устройств и режимов, разработанных для транспортных РУ). Таким образом, возникла необходимость проведения целого комплекса исследований, направленных на обоснование технологии применения смесей водорода и водяного пара для обеспечения безаварийной работы перспективных РУ усовершенствованной петлевой и моноблочной конструкции.

Как показал анализ методов диспергирования газа и организации двухкомпонентного потока [3], наиболее важными ограничениями при организации эффективной обработки ТЖМТ и первого контура РУ усовершенствованной петлевой и моноблочной конструкции являются значительная протяженность вертикальных опускных каналов и течений и малые значения ($< 0,2$ м/с) скоростей ТЖМТ в них. При таких скоростях ТЖМТ в опускных течениях размер газовых пузырей, получаемых с использованием устройств формирования двухкомпонентного потока, должен быть не более 300 мкм (пузыри большего размера будут сепарироваться, а пузыри требуемого размера и менее будут захватываться теплоносителем и циркулировать в составе двухкомпонентного потока ТЖМТ-газ).

Было проведено расчетное сравнение [3] возможных методов и устройств диспергирования газовой фазы в жидкостях и организации двухкомпонентного потока жидкость-газ, а на основании результатов теоретического сравнения целый ряд таких устройств был исследован экспериментально. В результате для дальнейших исследований был выбран созданный на базе ГНЦ РФ-ФЭИ механический (дисковый) диспергатор газа (ДГ).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАВШЕЕСЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Главной задачей проведенных исследований являлось экспериментальное доказательство эффективности процессов технологии ТЖМТ при использовании двухкомпонентных потоков ТЖМТ-мелкодисперсная окислительно-восстановительная газовая фаза, а именно, проведение водородной очистки циркуляционного контура экспериментального стенда ГНЦ РФ-ФЭИ при помощи разработанного механического диспергатора газа (рис. 1).

Действие диспергатора газа основано на дроблении газовых пузырей в жидкости при попадании их в поток с большим градиентом скоростей. В таком потоке благодаря неравномерности сил скоростного напора, приложенных к элементам поверхности, происходит разрушение больших пузырей на более мелкие. Создание высокоградиентного потока жидкости в диспергаторе осуществляется в зазоре между вращающимся и неподвижным дисками. Степень дисперсности газовой фазы прямо зависит от градиента скоростей в потоке. Увеличение градиента скоростей осуществляется уменьшением зазора между дисками или увеличением линейной скорости относительного движения дисков. При прочих равных условиях насыщение теплоносителя газом происхо-

дит благодаря специальным лопастям, расположенным на плоскости вращающегося диска (рис. 2).

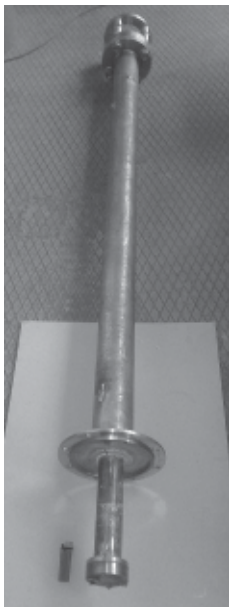


Рис. 1. Диспергатор газа

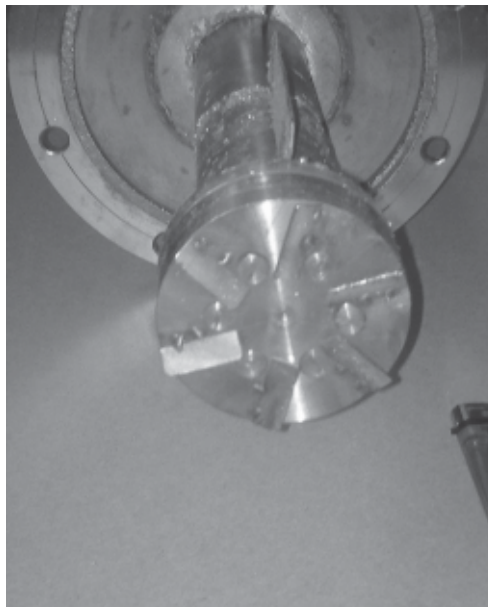


Рис. 2. Вращающийся диск с лопастями

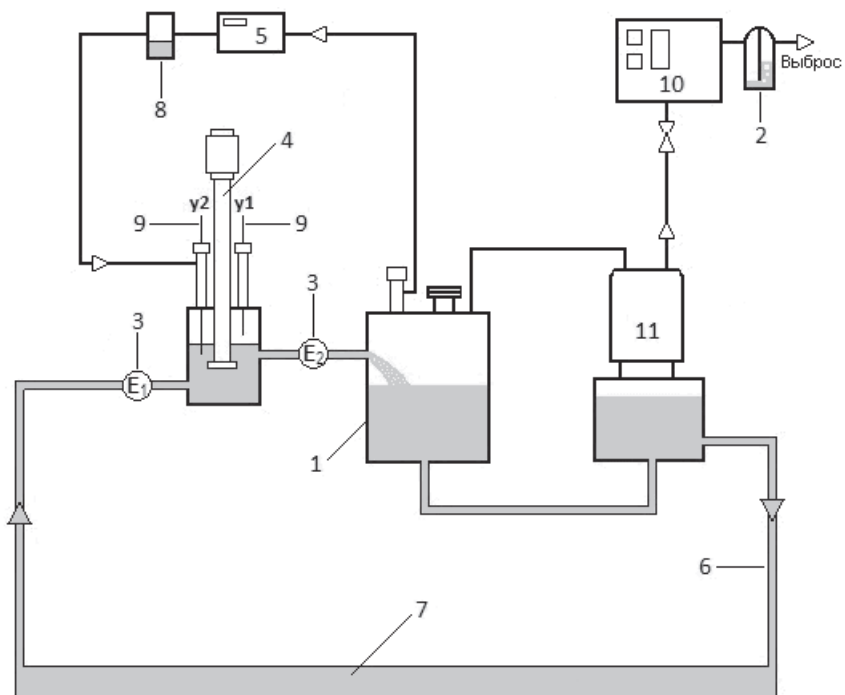


Рис. 3. Схема стенда ГНЦ РФ-ФЗИ с рабочим участком испытаний диспергатора газа: 1 – буферная емкость; 2 – гидрозатвор; 3 – датчики активности кислорода; 4 – диспергатор газа; 5 – измеритель расхода газа; 6 – контур циркуляции сплава; 7 – ТЖМТ; 8 – увлажнитель газа; 9 – верхний и нижний уровнемеры; 10 – хроматограф; 11 – главный циркуляционный насосный агрегат

Рабочий участок для проведения водородной очистки циркуляционного жидкометаллического контура был смонтирован непосредственно перед буферной емкостью,

на участке с низкой линейной скоростью течения теплоносителя. Схема рабочего участка, на котором размещался диспергатор газа, приведена на рис. 3.

Водородную очистку проводили при следующих параметрах:

- теплоноситель в стенде – эвтектический сплав свинца с висмутом;
- расход теплоносителя через рабочий участок от 0,35 до 0,55 м³/ч (что соответствует скорости течения теплоносителя от 0,2 до 0,3 м/с);
- температура теплоносителя ~ 390°С;

Для данного интервала скоростей линейного течения теплоносителя предварительно были отработаны наиболее оптимальные режимы эксплуатации диспергатора газа:

- глубина погружения нижнего (вращающегося) диска ДГ под уровень теплоносителя составляла от 0,1 м;
- частота вращения вала ДГ составляла от 30 Гц.

В процессе проведения водородной очистки использовались следующие устройства измерения и контроля:

- газовый хроматограф «Газохром-2000» для периодического измерения концентрации водорода в восстановительной смеси «Ar-H₂O-H₂»;
- электронный измеритель расхода газа;
- контактные уровнемеры для контроля уровня погружения вращающегося диска диспергатора газа;
- датчики контроля кислорода, размещенные на входе и на выходе рабочей емкости ДГ.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ДИСКОВОГО ДИСПЕРГАТОРА

Результаты работы дискового диспергатора газа (скорость отработки водорода при поведении водородной очистки) в ходе экспериментальных исследований приведены на рис. 4, где для сравнения даны реальные скорости отработки водорода на том же стенде ГНЦ РФ-ФЭИ при эжекционной водородной очистке (результат 1999 г.) и при поверхностной водородной очистке (результат 2011 г.).

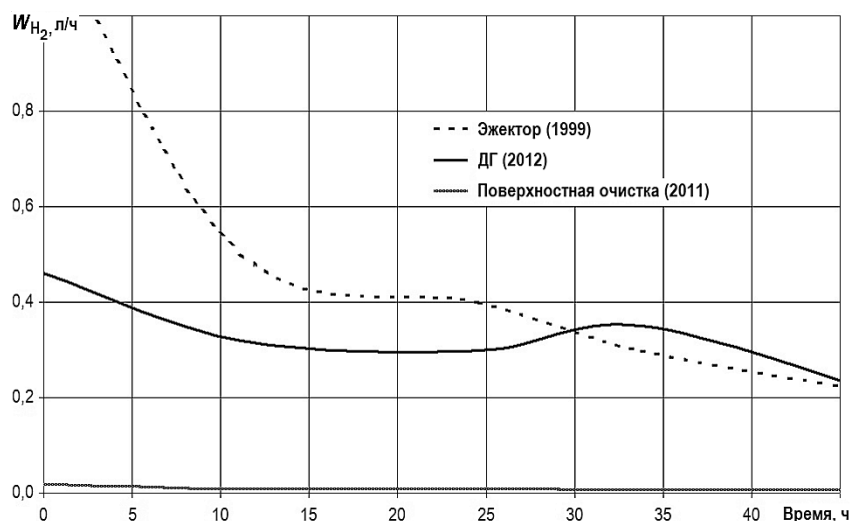


Рис. 4. Скорость отработки водорода при эжекционной поверхностной водородной очистке, а также при комплексной водородной очистке с использованием диспергатора газа

Из рисунка видно, что скорость отработки водорода при использовании дискового ДГ несоизмеримо больше скорости отработки водорода при поверх-

ностной водородной очистке и сопоставима (незначительно ниже) со скоростью отработки водорода при эжекционной водородной очистке. При этом эжектор установлен в оптимальном месте (напорное течение теплоносителя на всасе главного циркуляционного насосного агрегата), в то время как в месте установки дискового ДГ скорость течения теплоносителя составляла всего 0,2–0,3 м/с, что имитировало опускные участки реакторных установок баковых конструкций с низкими скоростями течения теплоносителя.

Ненулевая скорость отработки водорода при работе дискового ДГ является подтверждением того, что пузыри водорода контактировали со шлаковыми отложениями стенда, т.е. диспергатор создавал пузыри размером не более 200 мкм (скорость всплытия таких пузырей соответствует опускной скорости течения ТЖМТ в стенде ~ 0,2 м/с), которые циркулировали по контуру в составе двухкомпонентного потока ТЖМТ-газ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диспергатор газа исследованной конструкции способен работать в качестве штатного устройства водородной очистки в циркуляционных контурах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. При этом скорость процесса водородного восстановления сопоставима со скоростью процесса эжекционной (общепринятой и отработанной для петлевых циркуляционных контуров с тяжелыми теплоносителями) водородной очистки.

Дисковый диспергатор газа может быть рекомендован к использованию не только в исследовательских стендах, но и в первых контурах реакторных установок с теплоносителями Pb и Pb-Bi.

Исследования поддерживаются Министерством науки и образования Российской Федерации (ГК № 16.526.12.6008).

Литература

1. Мартынов П.Н., Орлов Ю.И. Процессы шлакообразования в свинцово-висмутовом контуре. Предупреждение и ликвидация критических ситуаций / Международная конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999, Т.2. – С. 608–619.
2. Степанов В.С., Драгунов Ю.Д., Кумаев В.М. и др. Паропроизводящая установка БМ-40/А. Опыт создания и эксплуатации / Международная конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999, Т.2. – С.88–91.
3. Мартынов П.Н., Гулевский В.А., Ульянов В.В. и др. Гидродинамические проблемы технологии ТЖМТ в РУ петлевой и моноблочной конструкции // ВАНТ, Серия «Физика ядерных реакторов». Москва, 2008, вып. 4. – С. 15–33.
4. Ульянов В.В., Гулевский В.А., Мартынов П.Н., Орлов Ю.И., Фомин А.С. Водородная очистка поверхностей циркуляционных контуров в моноблочных РУ с теплоносителями Pb-Bi и Pb // Новые промышленные технологии, 2011, №1. С. 18–21.

Поступила в редакцию 14.01.2013.

ABSTRACTS OF THE PAPERS**УДК 621.311:621.039**

Nuclear power of direct conversion in space missions of the 21-st century \ Yarygin V.I.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 16 pages, 2 tables, 23 illustrations. References, 30 titles.

The short review of a current state of the scientific research and development activity in the field of creation of the space nuclear power plants (SNPP) submegawatt and megawatt class with thermoelectric and thermionic converters the thermal energy to electric for transport power modules and interorbital tows is submitted. The analysis of the main results received at the creation of SNPP of the first generation (SNAP-10A, BUK, TOPAZ) is carried out and the main tasks and problems of the development of SNPP of the second generation are covered.

Topical issues of the use of SNPP and nuclear power propulsion systems for space exploration and the comparison of the characteristics of SNPP of direct and machine conversion of energy are considered.

УДК 621.039

The simulation of the process of sodium freezing in the tubes for the optimization of fast breeder reactor units maintenance \ Tashlykov O.L., Naumov A.A. Sheklein S.E.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 6 pages, 5 illustrations. References, 8 titles.

The peculiarities of the repair works of the fast breeder reactor NPP sodium systems are considered. The requirements for the sodium melting exclusion inside the equipment and piping during their opening and repair are given. The results of the sodium cooling process simulation with SolidWorks software are given. The advantages of quick-mounting (quick-detachable) device for sodium freezing by works execution at radioactive sodium systems are shown.

УДК 621.039

The choice of locking medium of the shaft seal of main circulation pumps reactor facility with lead and lead-bismuth coolants \ Beznosov A.V., Novinsky E.G., Lvov A.V., Bokov P.A., Bokova T.A.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 6 pages, 1 tables, 3 illustrations. References, 4 titles.

The paper discusses possible applications of locking media: oil, or high purity water in a rotating shaft seal system main circulation pumps (MCP) of the main circuit with fast reactors cooled by lead and lead-bismuth coolant. The analysis was performed based on the need to optimize the operating parameters of the seal and bearing in mind the possible impact of the medium on the locking performance characteristics of the reactor circuit, as in normal operation and in case of emergency admission of significant amounts of oil or condensate water from the rotating shaft seal system MCP to the reactor circuit.

УДК 621.039.534

Research processes and devices hydrogen purification applied to the circulation loop with the heavy liquid metal coolants \ Ulyanov V.V., Martynov P.N., Gulevsky V.A., Fomin A.S., Teplyakov U.A.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 6 pages, 4 illustrations. References, 4 titles.

The article deals with the problem of pollution circulation circuits with heavy liquid metal coolant slag deposits on the basis of lead oxide. As a solution to the above problem, the method of purification of hydrogen, comprising administering a mixture of Ar-H₂O-H₂ directly into the flow of the circulating heavy liquid metal coolant. As the device is used for hydrogen purification proposed mechanical (disk design) gas dispergator. A program of its method of testing conducted hydrogen purification circulation loop stand TT-2M with gas dispergator. Based on these results the gas dispergator can be recommended not only for research stands, but also for the first contours of promising reactors with heavy liquid metal coolant.

УДК 620.9+544(075)

The study of hydrogen generation in the interaction of aluminum with aqueous solutions \ Milinchuk V.K.,