

УДК 621.039

Т.А. Бокова, П.А. Боков, А.В. Безносков, А.В. Львов, Д.С. Рябов, А.С. Пегасина

**ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСЕЙ
В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ НА СТЕНДЕ ФТ-4 В НГТУ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Предмет, тема, цель работы: В НГТУ проводятся исследования, направленные на создание и отработку методов и средств поддержания качества теплоносителя для реакторных установок с ТЖМТ.

Метод или методологию проведения работы: Установка ФТ-4 имеет следующие подсистемы поддержания чистоты контура и регулирования содержания кислорода:

- с подключением к контуру теплоносителя газового массообменника;
- подсистема подачи водородо- и кислородосодержащих газовых смесей в поток теплоносителя в насосе через трубки Пито-Прандтля;
- подсистема подачи в газовый объем электронасоса вблизи трубы постоянного напора с использованием энергии изливающихся струй теплоносителя из трубы постоянного напора насоса стенда;
- подсистема «промывки» контура водородосодержащей смесью при сдrenированном теплоносителе;
- штатная газовая система контура ТЖМТ с подачей водородосодержащей газовой смеси над уровень теплоносителя в циркуляционном контуре.

Результаты и область их применения: 1. Проведенные экспериментальные исследования по очистке циркуляционного контура с высокотемпературным свинцовым теплоносителем, позволили сделать вывод об эффективности применяемого метода регулирования термодинамической активности кислорода.

2. Особенность физико-химических характеристик ТЖМТ создают необходимость для поддержания нормального эксплуатационного состояния циркуляционного контура и теплоносителя производить операции по восстановлению оксидных покрытий.

Выводы: В результате выполнения программы экспериментальных исследований показана высокая эффективность описанной в данной статье системы очистки контура с ТЖМТ и регулирования содержания кислорода в свинцовом теплоносителе.

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, экспериментальный контур, экспериментальные исследования, система регулирования, ввод в тяжёлый жидкометаллический теплоноситель, экспериментальная установка, водородосодержащая газовая смесь, кислородосодержащая газовая смесь/

В объеме контура РУ с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (Pb, Pb-Bi), расположенного под его свободным уровнем, всегда имеются поверхности конструкционных материалов, как правило, сталей, находящихся в контакте с теплоносителем, на поверхности которых могут высаживаться примеси [1, 2]. В контуре всегда имеются примеси - элементы и соединения. Основными местами образования скопления примесей в РУ являются: свободные поверхности теплоносителя; объем теплоносителя; поверхности твэл активной зоны; поверхности трубок и стенок парогенератора. Дисперсные частицы примесей размерами от миллиметров до микрон и менее находятся в потоке циркулирующего ТЖМТ и в объеме застойных участков контура. В результате процессов сепарации частиц примесей, имеющих плотность меньше, чем плотность ТЖМТ примеси концентрируются на свободных поверхностях теплоносителя и в верхних застойных участках контура.

В результате процессов массообмена и массопереноса значительная часть дисперсных примесей выходит в пристенную область: конструкционный материал – теплоноситель. Теоретически и экспериментально доказано, что пристенный слой циркуляционного контура является фильтром - естественным стоком примесей, при несмачивании поверхности ТЖМТ. При изменении режимов работы контура (скоростей и температур потоков и др.) происходит массообмен дисперсными примесями между всеми участками контура.

Газовая система является неотъемлемой частью контура ТЖМТ. Из газового объема системы, содержащиеся в ней реагенты, поступают к границе раздела сред, взаимодействуя

как с теплоносителем, так и с находящимися на его поверхности примесями [3, 4]. В свою очередь, дисперсные частицы могут поступать в газовый объем системы при барботаже.

В процессе нормальной эксплуатации контура, при аварийных ситуациях, технологических обработках, ремонтах происходит непрерывный массообмен между этими группами [5]. Возможно также изменение физико-химического состояния примесей внутри каждой группы, вследствие химических реакций (окисления, восстановления и др.) процессов перекристаллизации примесей в отложениях на стенках контура, на свободных поверхностях (рис. 1).

Существенным отличием эксплуатации циркуляционных контуров с высокотемпературным свинцовым теплоносителем стендов (установок) от реакторных контуров является тот факт, что вследствие частых разгерметизации оборудования стендов согласно программам испытаний, операций ремонтных и профилактических работ, частой подпитки аргоном, содержащим примесь кислорода и др. в контурах стендов, как правило, накапливаются оксиды свинца в виде отложений шлаков на свободных уровнях, на стенках, в застойных зонах. Для поддержания нормального эксплуатационного состояния контура и теплоносителя в контурах стендов необходимо достаточно часто производить операции по восстановлению оксидов свинца аргоноводородной смесью или водородом.

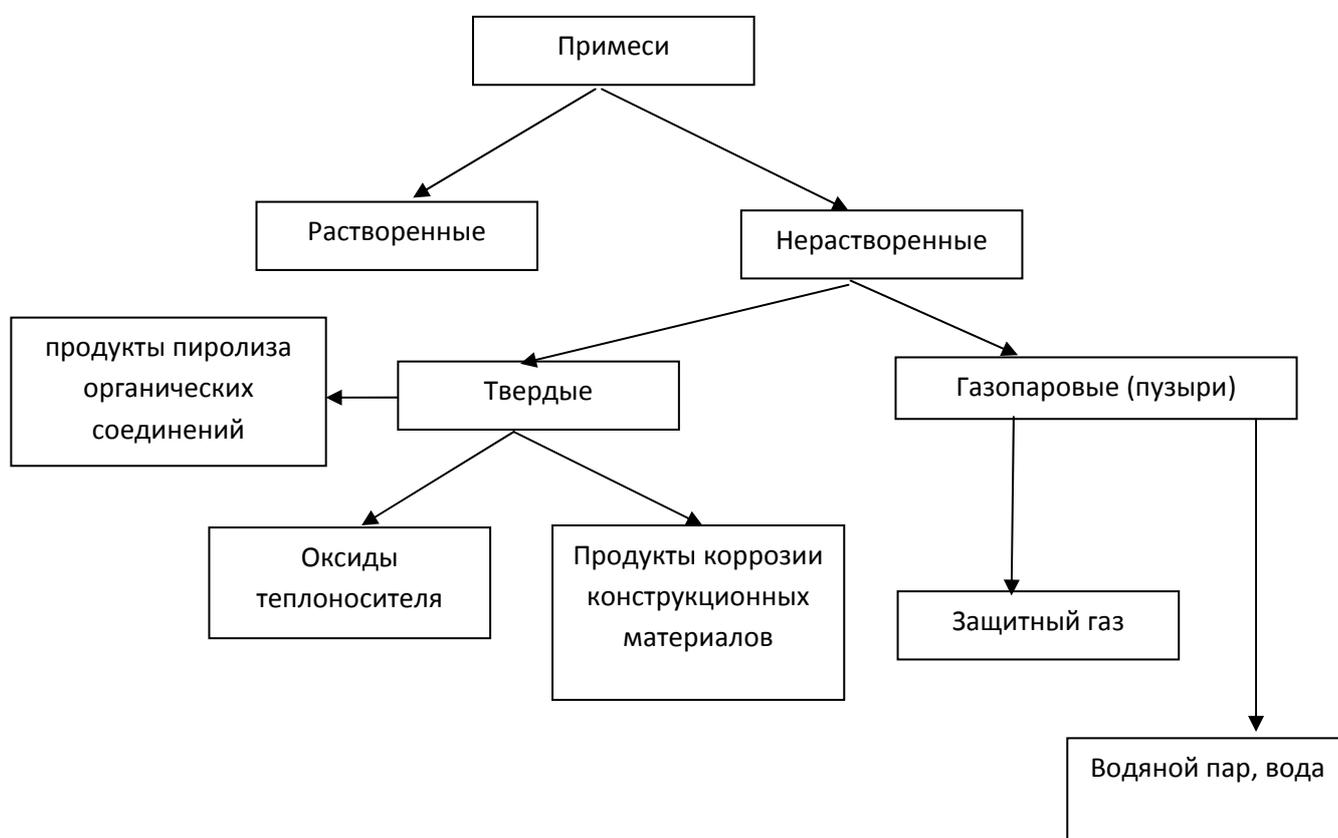


Рис. 1. Схема состояния примесей в контуре ТЖМТ

В реакторном контуре при отсутствии аварийного состояния «межконтурная неплотность ПГ» и отсутствии вскрытий объемов контура при ремонтах накопление оксидов свинца не прогнозируется. Наоборот, прогнозируется необходимость введения в теплоноситель и контур кислорода путем растворения твердой фазы оксидов свинца, введения газообразного кислорода в составе газовых смесей или др.

В процессе эксплуатации стенд ФТ-4 (рис. 2) имеет несколько мест, накапливающих большое количество оксидов теплоносителя или шлаков, требующих меры по восстановлению. При проведении эндоскопических осмотров было выявлено, что теплообменник является одним из таких «накопителей» шлаков.

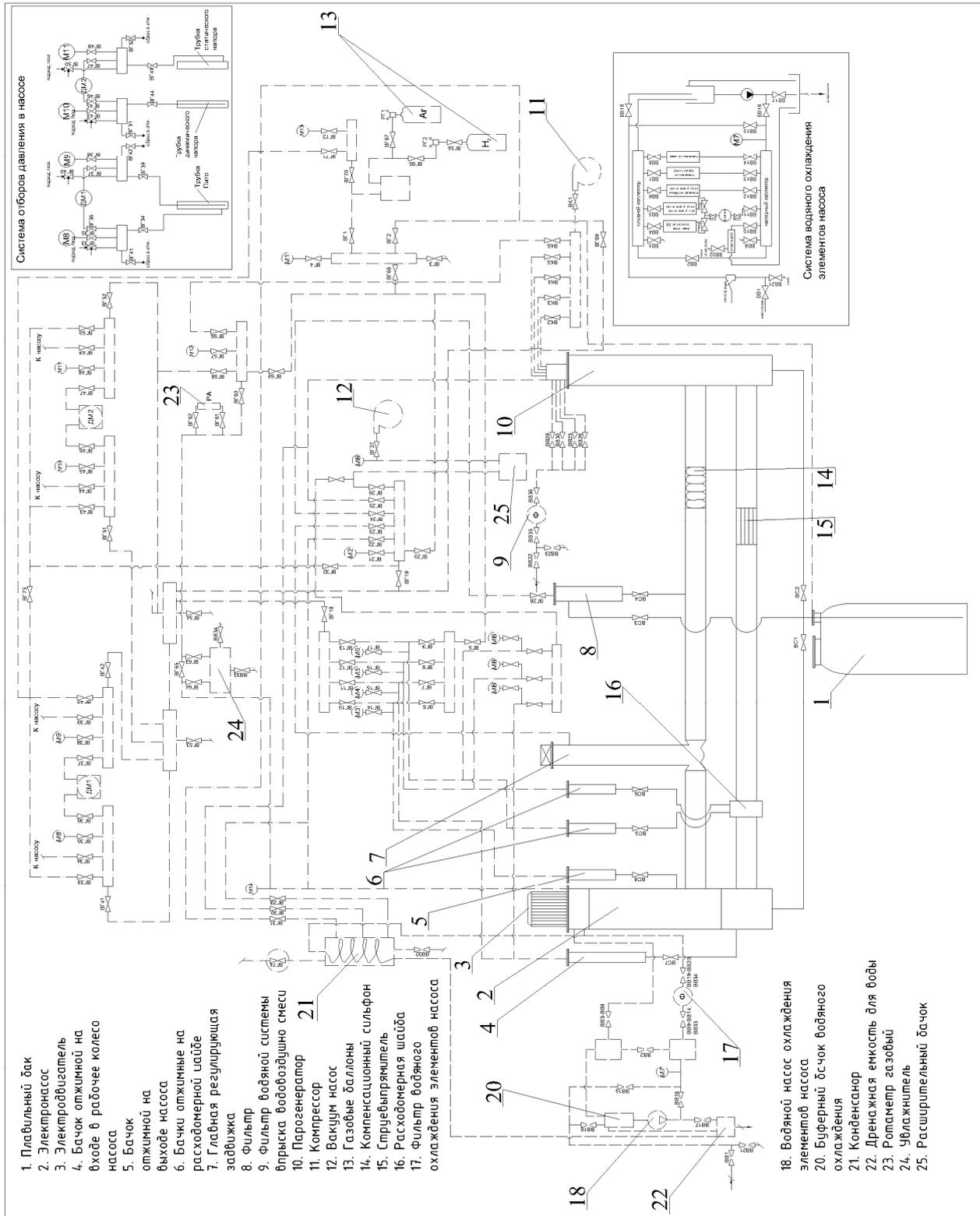


Рис. 2. Принципиальная схема стенда ФТ-4 НГТУ

Проведение процесса очистки теплоносителя и контура от шлаков путем введения в теплоноситель газообразного водорода, избавляет от присутствия таких отложений. Для определения количества кислорода в контуре ФТ-4 при его эксплуатации, проводится постоянный контроль его содержания в теплоносителе путём измерения термодинамической активности кислорода датчиками термодинамической активности кислорода.

В циркуляционном контуре стенда ФТ-4 в НГТУ предусматривается установка не менее двух датчиков термодинамической активности кислорода в свинцовом теплоносителе (поставки ГНЦ РФ ФЭИ), на линии от электронасоса до теплообменника.

В стенде ФТ-4 НГТУ применен газофазный метод регулирования термодинамически активного кислорода в ТЖМТ, рекомендованный ОКБМ, ОКБ ГП и ФЭИ для обеспечения эксплуатации всех реакторных установок серийных АПЛ проектов 705, 705К и стенда КМ-1.

В том случае, если в теплоносителе и в контуре содержание кислорода увеличивается сверх установленных норм, то в контур подается газообразная водородосодержащая смесь (или водород) до тех пор, пока кислород в теплоносителе не вернется в установленную норму, после чего подача газа-восстановителя прекращается.

В том случае, если в теплоносителе содержание кислорода уменьшается ниже установленных норм, то в контур подается газообразная кислородосодержащая смесь до тех пор, пока кислород в теплоносителе не вернется в установленную норму, после чего подача газа – окислителя прекращается.

Установка ФТ-4 имеет следующие подсистемы поддержания чистоты контура и регулирования содержания кислорода в нем:

- с подключением к контуру теплоносителя т.н. газового массообменника – устройства насыщающего газообразным водородом или кислородосодержащими смесями циркулирующий через него свинцовый теплоноситель за счет энергии струй, падающих из трубы постоянного напора в насосе на свободный уровень свинца и захватывающих газовые пузырьки в мелкодисперсной фазе (десятки и сотни микрометров) в объем теплоносителя;
- подсистема подачи водородо- и кислородосодержащих газовых смесей в поток теплоносителя в насосе через трубки Пито-Прандтля;
- подсистема подачи в газовый объем электронасоса вблизи трубы постоянного напора кислородосодержащих или водородосодержащих газовых смесей для регулирования содержания вводимого кислорода в свинец и очистки контура водородом от оксидов с использованием энергии изливающихся струй теплоносителя из трубы постоянного напора насоса стенда;
- подсистема «промывки» контура водородосодержащей смесью при сдrenированном теплоносителе;
- штатная газовая система контура ТЖМТ с подачей водородосодержащей газовой смеси над уровень теплоносителя в циркуляционном контуре.

Возможны другие способы регулирования содержания кислорода в теплоносителе на стенде ФТ-4 (установка твердотельного массообменника и др.).

Для условий рассматриваемого стенда вариант с подачей в газовый объем электронасоса вблизи трубы постоянного напора соответствующих газовых смесей является наиболее предпочтительным (рис. 3).

Эффективность «срабатывания» водорода из газовой смеси представлена на рис. 4. Работы по очистке контура от примесей оксидов теплоносителя заполнением контура водородосодержащей смесью газа при сдrenированном теплоносителе проводились в течении трех суток при температуре контура 450°С. В контур было подано около 200 г водорода и получено примерно 200 мл воды в конденсаторах.

Эффективность срабатывания водорода путём подачи водородосодержащей газовой смеси над уровнем теплоносителя в циркуляционном контуре представлена на рис. 5. Работы проводились в течении трех суток при температуре контура 430±10°С, скорость вращения вала насоса 800 об/мин, давление в контуре поддерживалось 0,1-0,3 кгс/см²(ати). В контур было подано примерно 250 г. водорода и получено около 800 мл воды в конденсаторах.

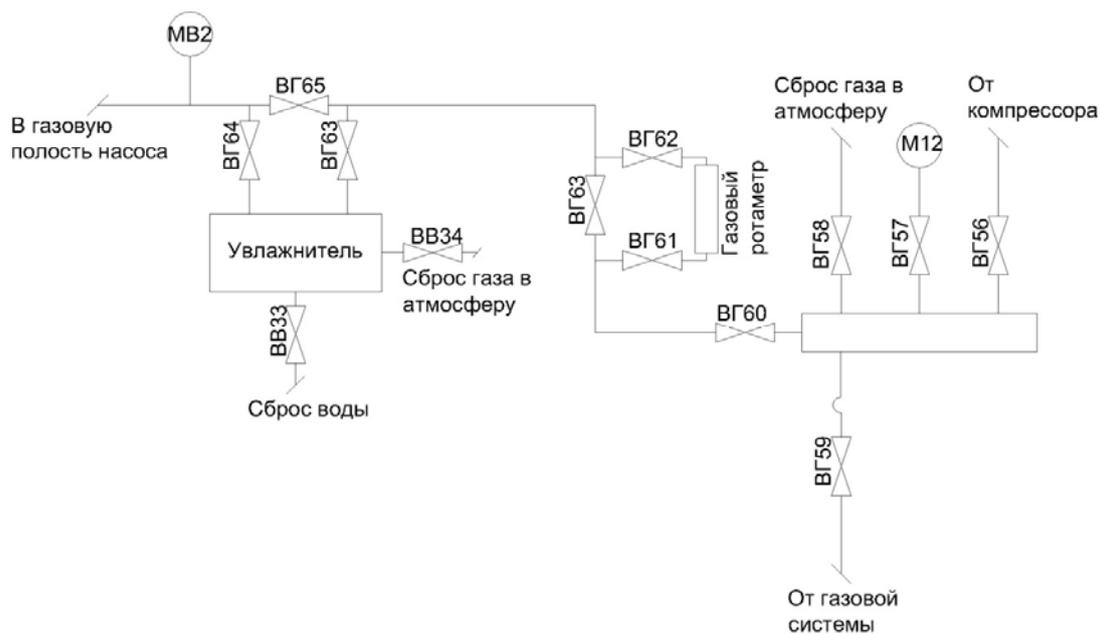


Рис. 3. Участок схемы газовой системы для подачи газа с увлажнителем

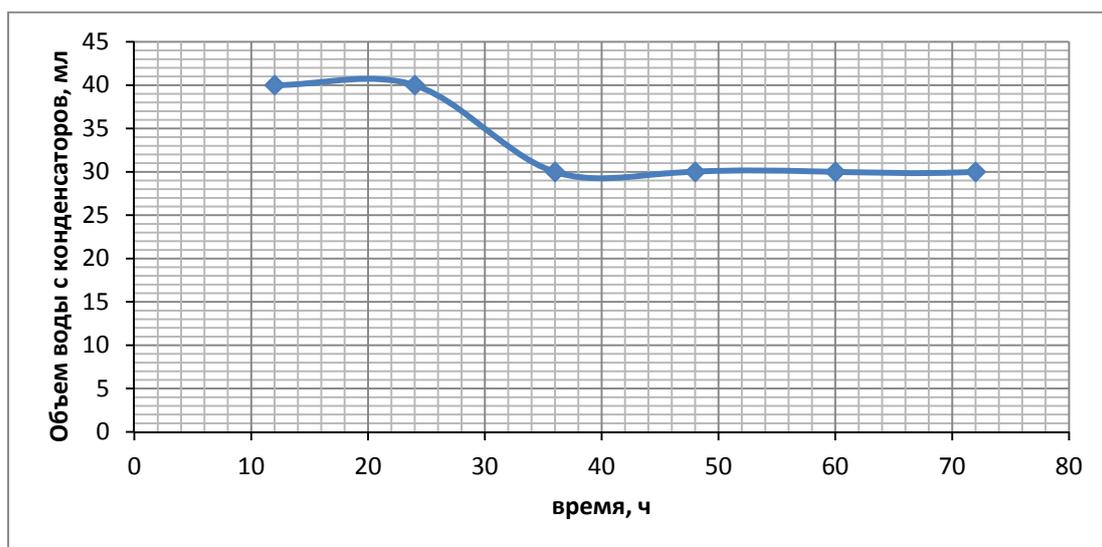


Рис. 4 Эффективность срабатывания водорода в течении «сухой» водородной регенерации

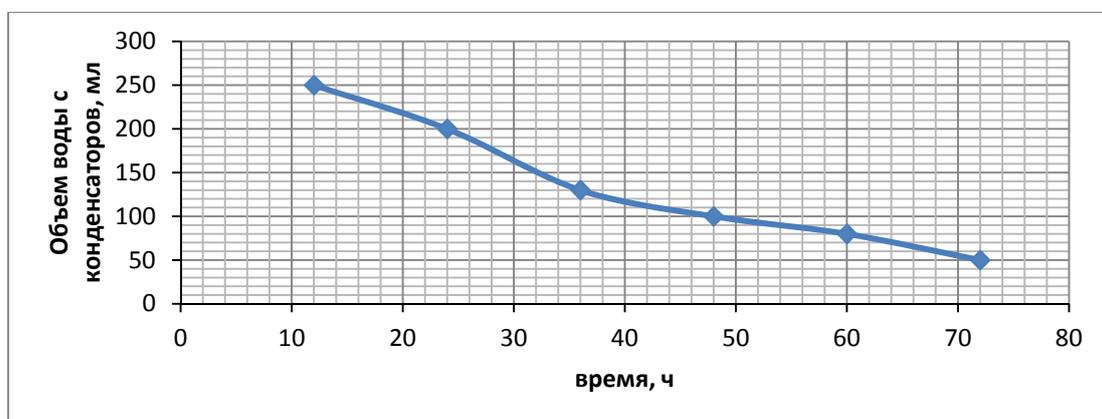


Рис. 5 Эффективность срабатывания водорода в течении водородной регенерации с циркуляцией теплоносителя

Продолжительный (более трех лет) опыт эксплуатации стенда ФТ-4 НГТУ в режимах испытаний и отработки моделей рабочих колес и выправляющих аппаратов конструкции и поставки ЦКБМ, а также других режимов, показал высокую эффективность имеющейся на стенде штатной системы очистки контура ТЖМТ от оксидов теплоносителя и регулирования содержания кислорода в свинцовом теплоносителе, необходимом для формирования и доформирования оксидных покрытий на поверхностях конструкционных материалов контура с ТЖМТ.

Библиографический список

1. Опыт эксплуатации ЯЭУ с жидкометаллическим теплоносителем на стенде КМ-1 / Б.В. Филатов [и др.] // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. ТЖМТ-98: тез. докл. конф. - ГНЦ РФ ФЭИ. Обнинск, 1998.
2. Исследование процессов массопереноса свинца в газовом контуре применительно к реакторному контуру БРЕСТ-ОД-300 : отчет по НИР (промежуточный) : Нижегород. гос. техн. ун-т (НГТУ) ; рук. Безносков А.В.; исполн.: В.А. Кирьянов [и др.]. – Н.Новгород, 1999. – 132 с. – № ГР 0194002164– Инв.№. 02.20.00.04123.
3. **Безносков, А.В.** К вопросу о массопереносе паров свинцового теплоносителя в реакторе БРЕСТ-ОД-300 / А.В. Безносков, В.А.Кирьянов, Н.Е. Фисейский // Атомная энергия ». – 2001. – Т. 90. – Вып. 1. – С. 12-17.
4. Исследование процессов массопереноса примесей-продуктов коррозии конструкционных материалов в реакторном контуре БРЕСТ-ОД-300. Регламент применения устройств очистки : отчет по НИР (промежуточный) : Нижегород. гос. техн. ун-т (НГТУ) ; рук. Безносков А.В.; исполн.: В.А. Кирьянов [и др.]. – Н.Новгород, 1999. – 68 с. - № ГР 0194002164, Инв.№ 02.20.00.04459.
5. Проблема технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (свинец-висмут, свинец) / Б.Ф.Громов, Ю.И.Орлов, П.Н.Мартынов, В.А. Гулевский // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. ТЖМТ-98: тез. докл. конф. - ГНЦ РФ ФЭИ Обнинск, 1998.

*Дата поступления
в редакцию 22.11.2017*

T.A. Bokova, P.A. Bokov, A.V. Beznosov, A.V. Lvov, D.S. Ryabov, A.S. Pegasina

CHARACTERISTICS OF SYSTEM OF REGULATION OF CONTENT OF IMPURITY IN THE LEAD HEAT CARRIER AT THE FT-4 STAND IN NGTU

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: NSTU conducts experimental studies to create a technique for the formation and shaping of oxide coatings on the surfaces of structural materials of the experimental plant circuit and a reactor plant with a heavy liquid-metal coolant.

Design/methodology/approach: Specialists of NSTU have created systems and subsystems for maintaining the purity of the circuit and regulating the oxygen content for the experimental installation of FT-4:

- with connection to the coolant circuit of the gas mass exchanger;
- subsystem of supplying hydrogen and oxygen-containing gas mixtures to the coolant flow in the pump through Pitot-Prandtl tubes;
- subsystem of the electric pump supply to the gas volume with the use of the energy of the incident coolant jets from the pump pipe of the experimental installation;
- subsystem of contour processing with a hydrogen-containing mixture in the absence of a coolant;
- a regular gas system of the HLMS circuit with the supply of a hydrogen-containing gas mixture above the coolant level in the circulation circuit.

Findings: As a result of experimental studies, the high efficiency of the described system for cleaning the circuit and regulating the oxygen content in the lead coolant is shown.

Research limitations/implications: The presented systems and subsystems for maintaining the purity of the circuit and controlling the oxygen content are recommended for installation in research circuits and reactor facilities with HLMS.

Originality/value: NSTU specialists for the first time proposed systems and subsystems for maintaining the purity of the circuit and regulating the oxygen content for a unique experimental installation of FT-4.

Key words: heavy liquid-metal coolants, experimental contour, experimental study, system of regulation, impurities in a heavy liquid-metal coolant, experimental installation, hydrogen containing gas mixture, oxygen-containing gas mixture.