

УДК 621.039

А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.Д. Зудин, А.В. Львов, А.О. Соловьёв, А.С. Черныш

**ПУТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КИСЛОРОДА
СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследование процессов, сопровождающих регулирование окислительного потенциала тяжелых жидкометаллических теплоносителей с использованием эжекции окислительных или восстановительных газовых смесей падающими струями теплоносителя на его свободный уровень с захватом мелкодисперсной фазы газа.

Ключевые слова: окислительный потенциал, свинцовый и свинец- вислоутовый теплоноситель, диспергация, модель, массообменник.

В настоящее время ведутся работы по проектированию и конструированию реакторных установок на быстрых нейтронах, охлаждаемых тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями – свинцом и свинцом-висмутом. Баковая компоновка реакторного контура БРЕСТ предполагает, что основное оборудование: активная зона, парогенераторы, насосы – погружены в общий бак с теплоносителем (той или иной геометрии). В контуре имеются развитые свободные поверхности теплоносителя в реакторном блоке в отличие от РУ АПЛ, в которых свободные уровни имелись только в емкостях, выполняющих роль компенсаторов объема (буферных емкостях и др.), и в сливных камерах главных циркуляционных насосов со щелевыми уплотнениями вала. Наличие развитых свободных поверхностей теплоносителя и существенно (в два–три раза) меньшие скорости теплоносителя в контуре создают условия для эффективной сепарации газовых пузырей из объема теплоносителя. В баковых компоновках энергоблоков АЭС с ТЖМТ гидравлическое сопротивление реакторного контура существенно меньше, чем сопротивление РУ петлевых компоновок АПЛ, поэтому у главных циркуляционных насосов (ГЦН) РУ типа БРЕСТ и СВБР 75/100 предусматривается установка осевых рабочих колес, имеющих существенно меньший напор, чем у центробежных и диагональных ГЦН АПЛ. Осевые насосы не могут обеспечивать эффективную прокачку ТЖМТ через эжекционные устройства, аналогично подобным устройствам в РУ АПЛ.

Эксплуатация систем со свинцовым теплоносителем и сплавами на его основе при температурах более 400-450°C может осуществляться только при наличии защитных покрытий на поверхностях конструкционных материалов (сталей). Необходимым условием формирования и доформирования защитных покрытий на основе соединений компонентов сталей с кислородом является наличие в ТЖМТ примеси термодинамически активного кислорода на уровне, способном обеспечивать образование и сохранение соединений соответствующих оксидов на поверхности материалов.

Особенностью расплавов свинца и свинца-висмута является их сравнительно высокая коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам. В связи с этим одной из важнейших проблем, возникающих при использовании данных теплоносителей, является обеспечение коррозионной стойкости контактирующих с ними материалов. В настоящее время основным методом, применяемым для защиты конструкционных сталей от коррозии в среде расплавов свинца и свинца-висмута, является кислородная пассивация конструкционных материалов. Пассивация заключается в формировании и поддержании на их поверхностях тонких (1-10 мкм), хорошо сцепленных с основой, плотных оксидных пленок, препятствующих развитию коррозионных процессов. При наличии таких пленок коррозионная стойкость конструкционных материалов многократно возрастает. Поскольку в этом методе пассивации основу защитных покрытий составляют оксидные соединения компонентов ста-

лей, то их стабильность определяется термодинамической активностью кислорода в теплоносителе. Основу защитных покрытий составляет смешанный оксид железа - магнетит Fe_3O_4 . При эксплуатации установок возможно снижение концентрации растворенного кислорода в расплаве до значений, равных или меньших равновесных с Fe_3O_4 , что приводит к разрушению пассивационных покрытий. С другой стороны, присутствие в контуре значительного количества кислорода нежелательно, так как это может привести к накоплению недопустимого количества оксидов теплоносителя, таким образом:

- при слишком низкой термодинамической активности кислорода ($< 10^{-4}$) в расплаве свинца-висмута или свинца не обеспечивается надежная антикоррозионная защита конструкционных сталей;
- при перенасыщении теплоносителя кислородом образуются шлаковые «блокады» на теплообменных участках контура, происходит нарушение проектных тепло-гидравлических характеристик циркуляционного контура, отклонение от штатных режимов эксплуатации, снижение ресурса работы оборудования.

Поэтому в процессе эксплуатации установок необходимо контролировать качество теплоносителя, поддерживая содержание растворенного кислорода на определенном уровне.

Целью проводимых работ являлась разработка научно-технических рекомендаций по конструктивным решениям, местам установки в контуре и режимам использования более простых и эффективных устройств регулирования окислительного потенциала в контурах со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями.

Практическая значимость: предполагается, что в результате проведенных исследований будет создано устройство, с помощью которого можно будет регулировать содержание кислорода в контуре, более простое, экономичное и эффективное, чем существующие на данный момент.

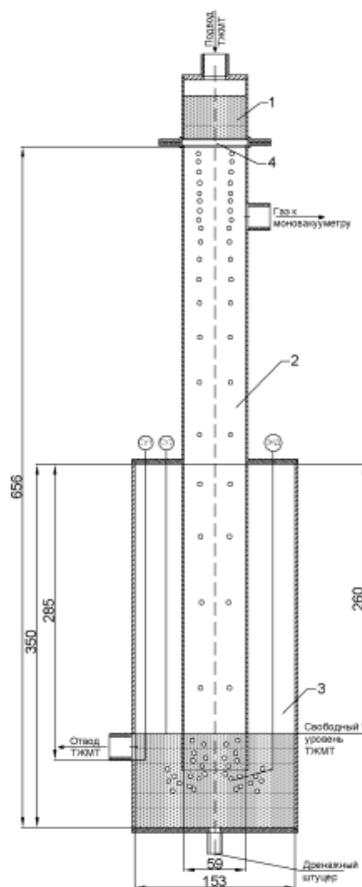


Рис. 1. Модель газового массообменника:

1 - напорная камера; 2 - вакуумная камера; 3 - приемная емкость; 4 - сменные пластины

На первом этапе проводились испытания газового массообменника МГМ2-ФТ3 в составе циркуляционного стенда со свинцовым теплоносителем в условиях, приближенных к натурным. Макетный образец газового массообменника МГМ2-ФТ3 предназначен для регулирования содержания примеси кислорода в свинцовом (свинец-висмутовом) теплоносителе, циркулирующем в составе соответствующего высокотемпературного жидкометаллического контура.

Газовый массообменник (рис. 1) содержит электрообогреваемый стальной цилиндрический корпус внутренним диаметром 59 мм, высотой 665 мм с жидкометаллическим теплоносителем и вакуумной камерой, в объеме которой падают струи жидкого металла, истекающие из сменной пластины с разным количеством отверстий и разными диаметрами отверстий, а также приемная емкость внутренним диаметром 153 мм, высотой 350 мм, в которую стекает жидкий металл. Сменные пластины имеют отверстия истечения $\varnothing 2, 3, 4, 5$ мм. Испытания проводились с пластиной с отверстиями истечения $\varnothing 4$ мм.

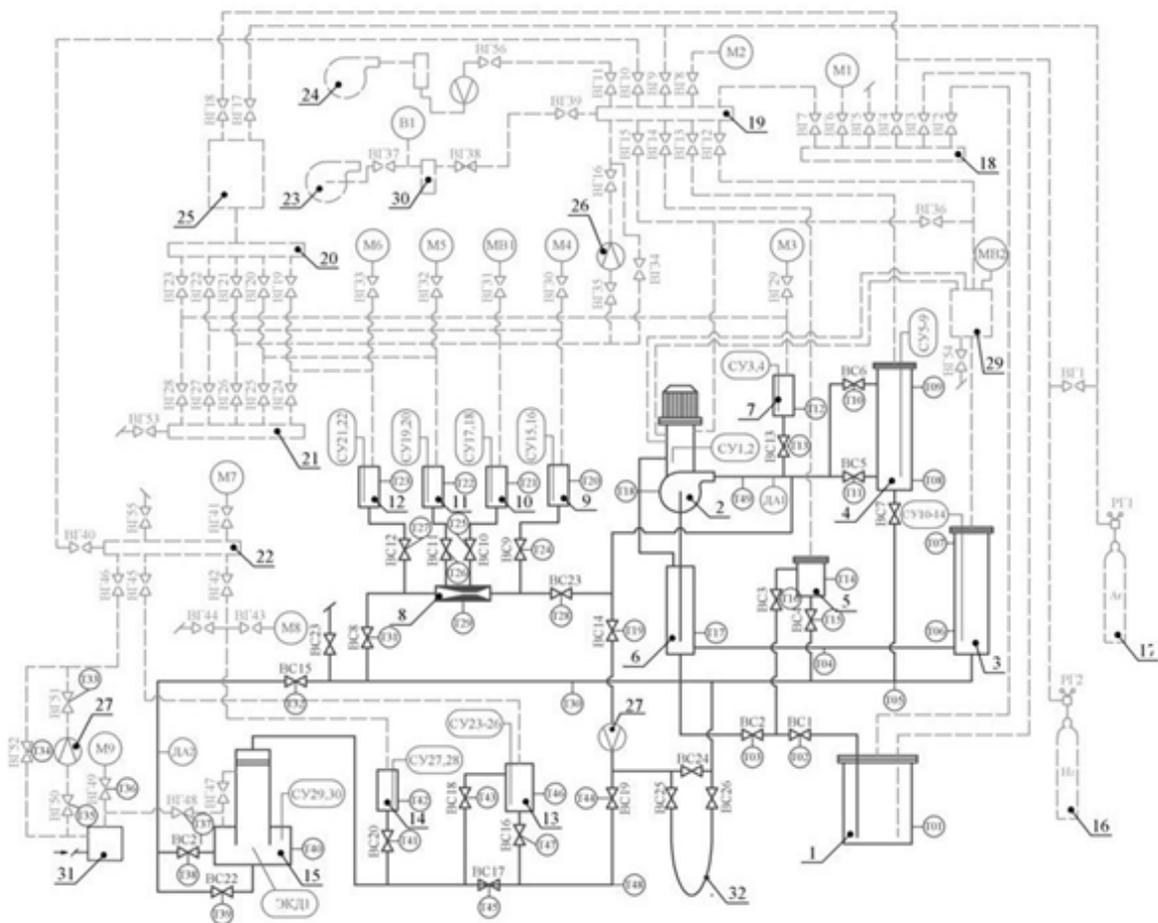


Рис. 2. Схема экспериментального стенда ФТ-3:

1 - бак плавильный; 2 - насос жидкометаллический; 3 - ёмкость сливная; 4 - ёмкость напорная; 5 - фильтр; 6 - патрубок всасывания; 7 - бачок отжимной насоса; 8 - эжектор; 9 - бачок отжимной входа в эжектор; 10, 11 - бачки отжимные эжектора; 12 - бачок отжимной выхода из эжектора; 13 - расходомерная ёмкость; 14 - бачок отжимной газового массообменника; 15 - газовый массообменник; 16 - баллон водородный; 17 - баллон аргоновый; 18 - коллектор высокого давления; 19 - коллектор низкого давления; 20 - коллектор высокого давления отжимных бачков эжектора; 21 - коллектор низкого давления отжимных бачков эжектора; 22 - газовый коллектор газового массообменника; 23 - вакуумный насос; 24 - компрессор; 25 - ёмкость газовая аккумулирующая; 26 - газовый расходомер; 27 - газовый расходомер газового массообменника; 28 - магнитный расходомер; 29 - холодильник; 30 - ловушка; 31 - увлажнитель; 32 - участок "экспресс-замораживания"

Сбоку напорной камеры расположен штуцер с трубой $\varnothing 23,0$ мм для подвода газа в вакуумную камеру. В приемной емкости установлены электроконтактные сигнализаторы уровня с подвижным центральным электродом. К напорной камере подключен трубопровод подвода теплоносителя от напора циркуляционного насоса. К приемной емкости подключен трубопровод отвода теплоносителя от газового массообменника к емкости насоса.

Результаты одной из серии экспериментов с подачей водорода в рабочую камеру газового массообменника (в газовой системе контура ТЖМТ – аргон) представлены на рис. 3, 4, 5.

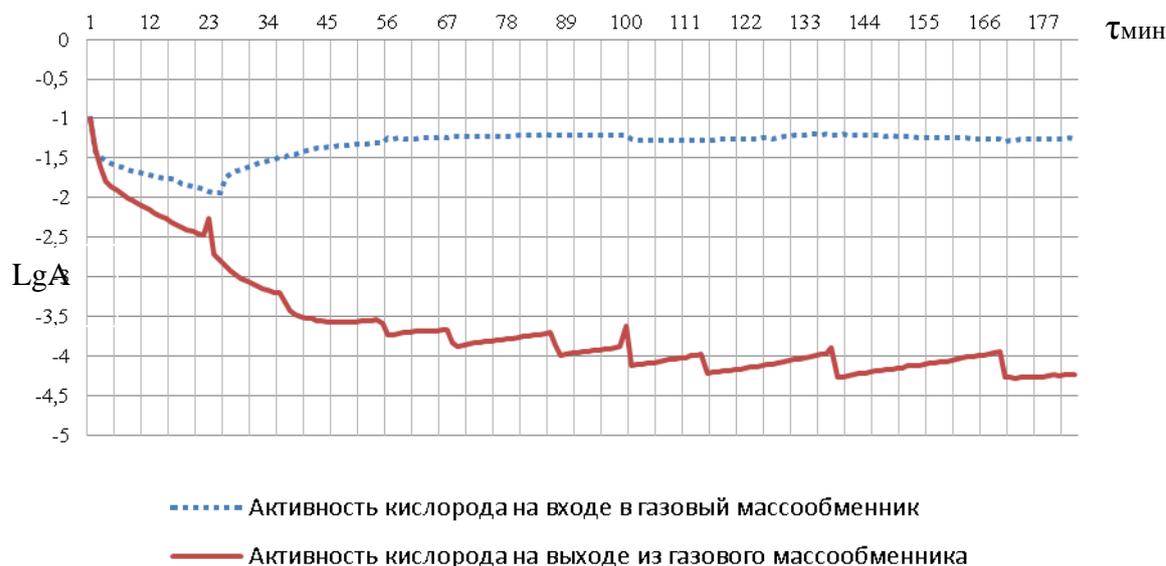


Рис. 3. Изменение окислительного потенциала теплоносителя в процессе эксперимента в серии испытаний на стенде ФТ-3 (температура теплоносителя 450-460°C, расход 0,8 м³/ч)

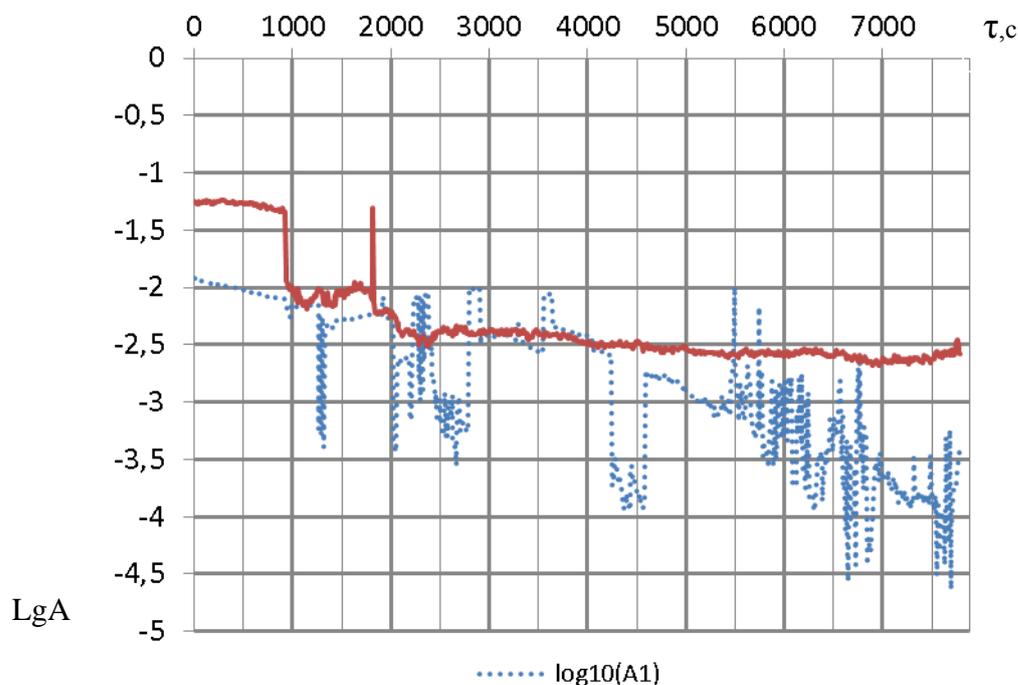


Рис. 4. Изменение окислительного потенциала теплоносителя в процессе эксперимента в серии испытаний на стенде ФТ-3 при подаче увлажненного водорода (температура теплоносителя 450-460°C, расход 0,78 м³/ч)

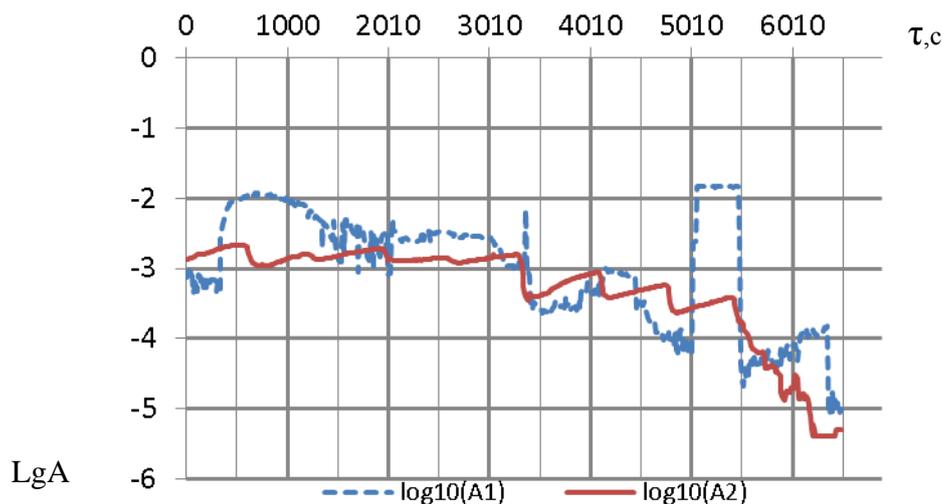


Рис. 5. Изменение окислительного потенциала теплоносителя в процессе эксперимента в серии испытаний на стенде ФТ-3 при подаче сухого водорода (температура теплоносителя 450-460°C, расход 0,78 м³/ч)

Обсуждение результатов показывает следующее.

На всех графиках можно видеть скачки активности кислорода, это можно объяснить налипанием на стенку датчика активности пузырей кислорода или шлака. Это является недостатком конструкции применяемого в экспериментах устройства измерения активности кислорода.

Сравнивая динамику раскисления ТЖМТ при подаче сухого и увлажненного водорода, мы видим более плавное изменение активности в экспериментах на увлажненном водороде, в отличие от скачкообразной кривой динамики раскисления на сухом водороде, где каждый скачок соответствовал подаче сухого водорода в эжекционную камеру газового массообменника. Также можно отметить, что при подаче увлажненного водорода процесс эжекции струй теплоносителя в газовой камере идет менее эффективно. По графикам видно, что через два часа после начала эксперимента активность кислорода при подаче увлажненного водорода меньше на порядок, чем активность на сухом водороде. Это объясняется наличием кислорода в увлажненном водороде. При подаче такого водорода динамика раскисления ТЖМТ замедляется окислительными процессами.

На втором этапе эксперимента исследовались характеристики способа регулирования концентрации кислорода в ТЖМТ путем взаимодействия теплоносителя со струями эжектирующих окислительных или восстановительных газовых смесей в газовой полости осевого насоса.

Решаемой задачей являлось создание экспериментального стенда (рис. 6) со свинцовым теплоносителем, снабженного линиями ввода восстановительной (водородосодержащей) газовой смеси для очистки реакторного контура от твердой фазы частиц оксида свинца, а также линией ввода окислительной (кислородосодержащей) газовой смеси для формирования и доформирования оксидных защитных покрытий на поверхностях конструкционных материалов контура. На верхних торцевых поверхностях труб постоянного напора насосов выполнены радиальные канавки формирования падающих струй теплоносителя, а надтрубное пространство труб постоянного напора сообщено с линиями подачи восстановительной и окислительной газовых смесей из газовой системы в газовый объем под свободный уровень теплоносителя. Сформировавшиеся струи теплоносителя захватывают пузырьки подаваемой газовой смеси в поток теплоносителя, что позволяет при необходимости, определяемой пока-

заниями датчика активности кислорода в свинце, вводить в контур либо окислительную газовую смесь для допассивации поверхностей контура, либо восстановительную газовую смесь для уменьшения содержания кислорода в ГЖМТ и (или) очистки теплоносителя и контура от твердой фазы оксидов теплоносителя.

Основные характеристики стенда ФТ-4 НГТУ

1. Теплоноситель – расплав свинца марки С0 ГОСТ 3778-98.
2. Масса теплоносителя $1 \cdot 10^4$ кг.
3. Температура свинцового теплоносителя – 450 – 500 °С, кратковременно 550 °С.
4. Расход теплоносителя, максимальный до $2.0 \cdot 10^3$ кг/ч (до 200 м³/ч).
5. Термодинамическая активность кислорода в свинцовом теплоносителе 10^{-5} - 10^{-4} до 10^0 плюс твердая фаза оксидов свинца.
6. Привод электронасоса – электродвигатель асинхронный, 2 шт., $n_{ном}$ =1500 об/мин и 3000 об/мин, $N_{ном}$ до 50 кВт, с частотным регулированием скорости вращения.
7. Мощность электро-нагревательных спиралей стенда, суммарная до 100 кВт, напряжение 380/220 В.
8. Подшипник скольжения электронасоса контура свинцового теплоносителя на первом этапе – гидростатический щелевого типа.
9. Рабочее колесо и выпрямляющий аппарат – сменные, 2 компонента ЦКБМ и 2 компонента НГТУ.
10. Газ в системе газа: аргон, водород, аргоно-водородная и аргоно-кислородная смеси.
11. Система обогрева оборудования и трубопровода контура свинцового теплоносителя – электрическая, нихромовыми спиралями с кордиеритовыми бусами.

Принципиальная схема и компоновка контура

В состав контура свинцового теплоносителя входят следующие основные элементы (рис. 6):

- электронасос стенда с установленной в нем моделью проточной части ГЦН;
- задвижка регулирования расхода теплоносителя в контуре;
- парогенератор (теплообменный модуль);
- расходомерное устройство с отжимными бачками;
- струевыпрямитель;
- трубопроводы Ду 200 мм основного циркуляционного контура;
- сильфонный компенсатор Ду 200 осевого типа;
- бачки отжимные для замера давления на входе в электронасос и в его напорной камере;
- плавбак (бак дренажный);
- фильтр механический;
- трубопроводы и арматура систем очистки, заполнения и дренажа свинцового теплоносителя;
- подсистема контроля и регулирования содержания кислорода в свинцовом теплоносителе и очистки контура и теплоносителя от нерастворенных оксидов свинца;
- контрольно-измерительные приборы, входящие в систему сбора обработки и предоставления информации.

Экспериментальный участок представляет линию ввода восстановительной (водородосодержащей) газовой смеси для очистки контура от твердой фазы частиц оксида свинца, а также линию ввода окислительной (кислородосодержащей) газовой смеси для формирования и доформирования оксидных защитных покрытий на поверхностях конструкционных материалов контура в объем над трубой постоянного напора насоса.

В ходе проведения эксперимента были получены динамики изменения активности кислорода при подаче восстановительных (рис. 7) и окислительных (рис. 8) газовых смесей. Температура свинца составляла 490°С, расход 120 м³/ч.

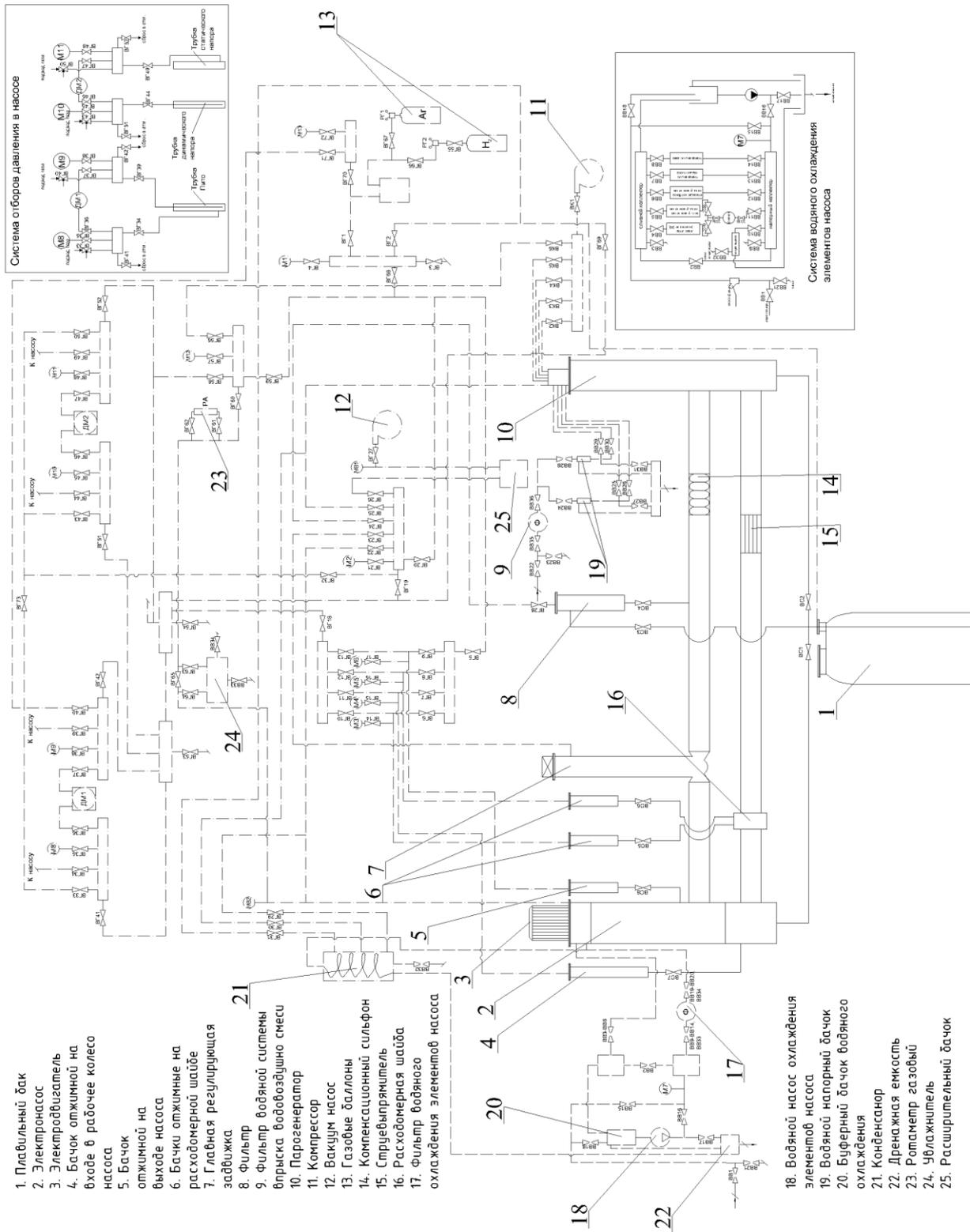


Рис. 6. Схема экспериментального стенда ФТ-4

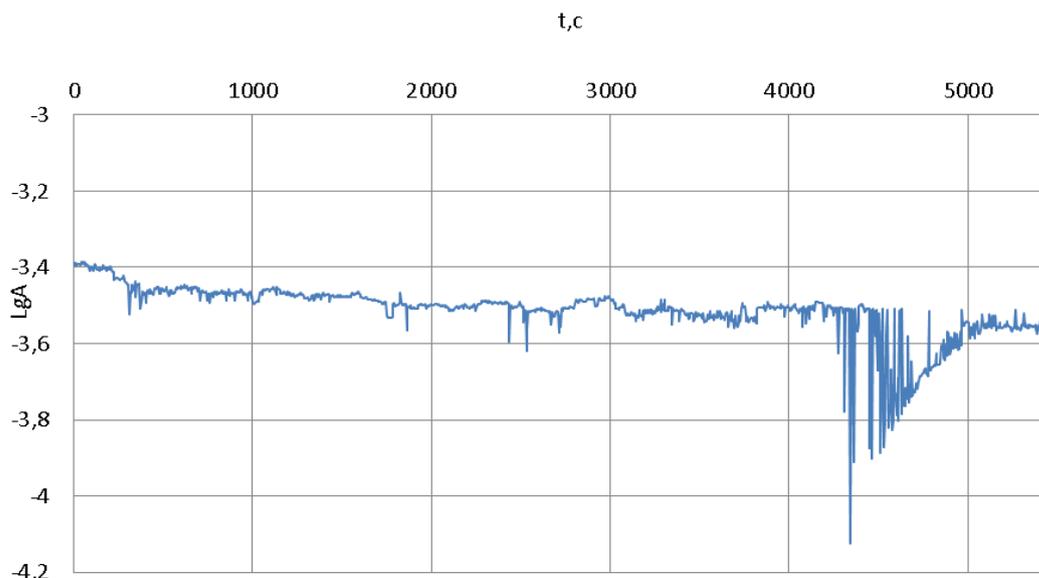


Рис. 7. Изменение окислительного потенциала теплоносителя в процессе эксперимента в серии испытаний на стенде ФТ-4 НГТУ при подаче сухого водорода (температура теплоносителя 450-500°С, расход свинца 120 м³/ч, расхода водорода 0,4 г/ч)

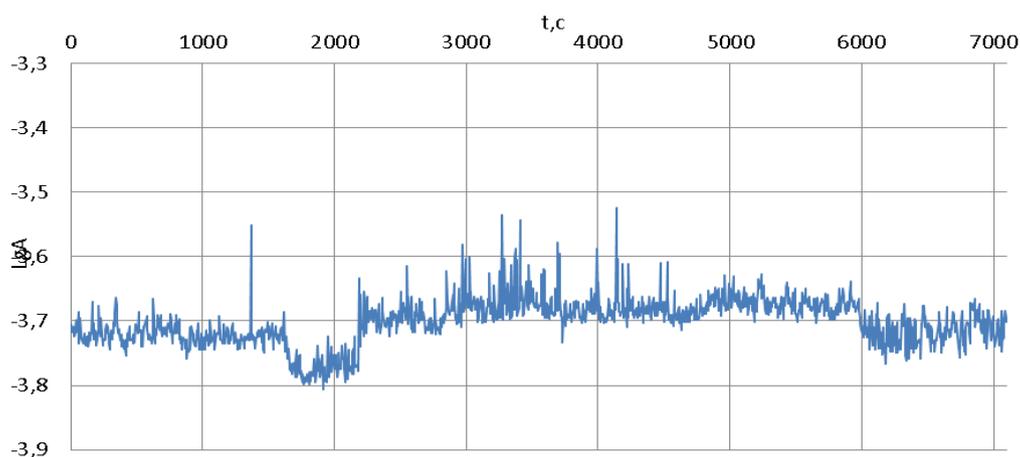


Рис. 8. Изменение окислительного потенциала теплоносителя в процессе эксперимента в серии испытаний на стенде ФТ-4 НГТУ при подаче кислорода (температура теплоносителя 490°С, расход свинца 120 м³/ч, расхода кислорода 36 г/ч)

Проведенные серии экспериментов подтвердили принципиальную возможность применения предложенного метода для поддержания заданного кислородного режима в энергетических контурах с ТЖМТ.

Преимущества данного метода:

- устройство формирует двухкомпонентный поток: жидкометаллический теплоноситель – газовые (газопаровые, восстановительные, нейтральные, окислительные) смеси с размерами пузырей 1.0 – 2.0 мм и менее;
- простота и малые массогабаритные показатели конструкции;
- отсутствие вращающихся частей и специальных электронагревателей, входящих в его состав;
- возможность использования осевых насосов, входящих в состав баковых реакторных контуров со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями для работы устройства;
- отсутствие каналов с малыми проходными сечениями (менее 3.0 мм) для исключения их забивания примесями;
- возможность принудительной продувки каналов устройства водородосодержащими газовыми средами;

- возможность замены устройства при «горячем» состоянии контура;
- возможность контроля расхода эжектируемого газа при пусконаладочных работах или постоянно в процессе эксплуатации.

В процессе исследования метода:

- создан стенд и проведены исследования на воде;
- создан стенд и проведены исследования на "малом" объеме свинца;
- создан стенд для проведения исследований на "большом" объеме свинца.

Данный тип устройства после проведенных соответствующих испытаний может быть рекомендован для реакторных установок БРЕСТ и СВБРР.

Библиографический список

1. **Безносков, А. В.** Оборудование, компоновка и режимы эксплуатации контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – М., 2011.
2. **Славинский, М.П.** Физико-химические свойства элементов / М.П. Славинский. – М. 1952.
3. **Мартынов, П.Н.** Процессы шлакообразования в свинцово-висмутовом контуре. Предупреждение и ликвидация последствий // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. ТЖМТ-98: программа и тезисы докладов конференции. – Обнинск. ГНЦ РФ ФЭИ, 1998. С. 53.

Дата поступления
в редакцию: 17.06.2014

A.V. Beznosov, T.A. Bokova, A.D. Zudin, A.V. Lvov, A.O. Soloviev, A.S. Chernysh

WAYS OF REGULATING THE THERMODYNAMIC ACTIVITY OXYGEN LEAD COOLANT

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

Purpose: This paper describes the study of the processes accompanying the regulation of oxidative capacity heavy liquid metal with ejection oxidizing or reducing gas mixtures falling jets on its free coolant level with the capture of fine gas phase.

Design/methodology/approach: To maintain the rated oxygen content in a HLHC melt, the NNSTU specialists offer a method of ejecting oxidizing and fuel-rich gas mixtures in the volume of the circulating coolant owing to falling HLHC jets, for example, from the main circulation pump (MCP) constant head tube. The falling coolant jets capture bubbles of the relevant gaseous mixture into the coolant flow, which enables, in case of any need determined by the oxygen-in-lead activity sensor, to introduce into the HLHC either an oxidizing gaseous mixture for additional passivation of the loop surfaces or a fuel-rich gas mixture for reducing the oxygen content in the HLHC and/or purifying the coolant and the loop from the solid phase of the coolant oxides.

Findings: In such a manner, regulation of the oxidizing potential and purification of the coolant and the loop from oxygen are carried out due to the jets formed in grooves on the end surfaces of the constant head tubes contacting the relevant gaseous mixture, and formation of an extended gas bubble surface contacting the coolant as a result of falling of the jets onto the coolant free surface.

Research limitations/implications: The paper contains research results for regulating the oxidizing potential of a lead coolant using the method under review on the NNSTU FT-4 bench during testing the MCP flow part models designed by the NNSTU. The method under review may be used in conjunction with oxygen input devices by means of dissolving tablets of HLHC oxides or as an alternative method.

Originality/value: Advantages of this method:

- Formation of two-component flow: liquid metal coolant - gas (gas-steam, recovery, neutral, oxidative) mixed with bubble size 1.0 - 2.0 mm or less;
 - Simplicity and small dimensions and weight design;
 - No moving parts and special electric heaters in its composition;
 - The use of axial flow pumps are part of the tank reactor circuits with lead and lead-bismuth coolant to operate the device;
 - Lack of channels with small flow passages (less than 3.0 mm) to prevent them clogging impurities;
 - The possibility of a forced purge device channels hydrogen-gas service;
 - The ability to control the flow of gas ejected during commissioning or permanently during operation.
- oxidizing potential, lead end lead-bismuth heat carrier, dispersant, model, mass-transfer apparatus

Key words: oxidation potential, lead and lead - bismuth coolant, dispersion make, model, massoobmennyyh.