

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБОСНОВАНИЕ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОГО КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА В ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯХ (Pb, Pb-Bi)

Р.Ш. Асхадуллин, П.Н. Мартынов, В.И. Рачков, А.Ю. Легких
ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск

P

Представлены подходы и результаты расчетно-экспериментальных исследований в обоснование конструкций массообменных аппаратов с твердофазным источником кислорода (оксидом свинца). Исследовались характеристики массообменных аппаратов с собственным побудителем расхода теплоносителя через реакционную емкость и пневмодозаторного типа (с дискретным принципом работы). Экспериментальные исследования характеристик массообменных аппаратов проводились на циркуляционном неизотермическом стенде с теплоносителем Pb-Bi (ГНЦ РФ-ФЭИ). Расчеты выполнялись с использованием эмпирических температурных зависимостей растворимости кислорода и коэффициентов скорости растворения оксида свинца в Pb-Bi. Растворение оксида свинца в массообменном аппарате рассматривалось как процесс физического растворения твердого тела. В результате исследований получены зависимости для термодинамической активности кислорода на выходе из массообменного аппарата и для производительности аппаратов от режима работы. Показано, что результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными. Выполненная работа подтверждает возможность расчетной оценки характеристик массообменных аппаратов, что крайне важно при создании массообменного аппарата для конкретного объекта, например, реакторной установки, с целью подбора оптимальной конструкции и функциональных параметров.

Ключевые слова: термодинамическая активность, кислород, растворимость, свинец, свинец-висмут, оксид, теплоноситель, массообменный аппарат, твердофазный метод.

Основные преимущества тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ), такие как негорючесть, отсутствие больших давлений в первом контуре, хорошие теплофизические и ядерно-физические свойства, позволяют рассматривать их в перспективных проектах реакторов на быстрых нейтронах.

Особенностью теплоносителей свинец и свинец-висмут 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 [1].

Для защиты конструкционных сталей от коррозии в среде расплава свинца и свинца-висмута применяется кислородная пассивация. Пассивация заключается в формировании и поддержании на поверхностях сталей тонких (1 – 10 мкм), хорошо сцепленных с основой, плотных оксидных пленок. При наличии таких пленок коррозионная стойкость конструкционных материалов значительно возрастает. Поскольку в этом методе пассивации основу защитных покрытий составляют оксидные соединения компонентов сталей, то одним из основных параметров, определяющих их стабильность, является термодинамическая активность (ТДА) кислорода в теплоносителе [2].

Для обеспечения условий формирования и поддержания целостности защитных оксидных покрытий, а также для предотвращения случаев зашлаковки контура твердофазными отложениями на основе оксида свинца в процессе эксплуатации установок с ТЖМТ необходимо поддерживать ТДА кислорода на определенном уровне. При слишком низком уровне ТДА кислорода в расплаве свинца-висмута или свинца не обеспечивается надежная антикоррозионная защита конструкционных сталей, т.к. могут диссоциировать защитные покрытия. При перенасыщении теплоносителя кислородом возможно образование шлаковых «блокад» на теплообменных участках контура, нарушение проектных характеристик циркуляционного контура, отклонение от штатных режимов эксплуатации, снижение ресурса работы оборудования.

Специалистами ГНЦ РФ-ФЭИ были разработаны метод и средство регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ. Разработанный метод основан на использовании процесса растворения твердофазного оксида свинца, помещаемого в поток теплоносителя, и называется твердофазным методом регулирования. Его техническая реализация осуществляется с помощью специально разрабатываемых устройств – массообменных аппаратов (МА), которые являются важной составной частью комплекса средств технологии ТЖМТ. Основной частью МА является реакционная емкость, в которой размещается засыпка из гранулированного оксида свинца. В реакционной емкости обеспечивается взаимодействие оксида свинца с теплоносителем основного контура. Твердофазное средство окисления, контактируя тяжелым жидким металлом, растворяется, обогащая его кислородом. Растворенный кислород транспортируется по всему контуру с основным потоком теплоносителя [2, 3].

В работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований в обоснование конструкций массообменного аппарата пневмодозаторного типа (с дискретным принципом работы) и аппарата с собственным побудителем расхода теплоносителя через реакционную емкость.

Работа МА пневмодозаторного типа основана на использовании газового поршня [9]. Данный аппарат подает растворенный кислород в основной контур порциями. За каждый цикл работы массообменного аппарата подается одна порция растворенного кислорода. Один рабочий цикл МА выглядит следующим образом (рис.1): компрессор забирает из газового объема стенда инертный газ, который через газовую трубу нагнетается в массообменный аппарат и вытесняет расплав, обогащенный кислородом, из реакционной емкости МА в основной контур установки. После подачи порции расплава из МА компрессор отключается, газ перетекает обратно в газовый объем стенда, т. е. давление выравнивается и расплав возвращается в реакционную емкость.

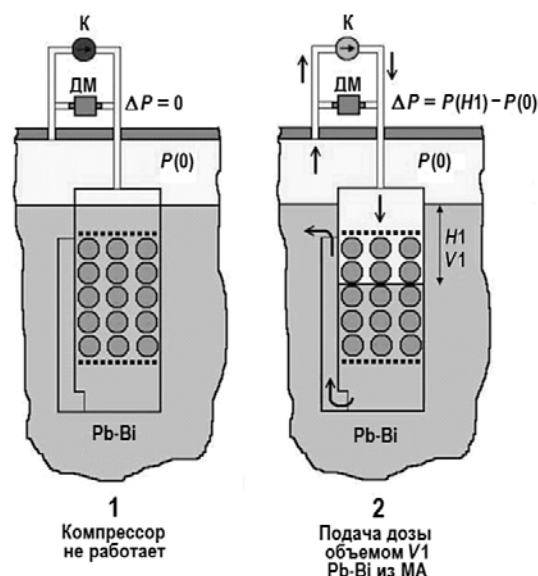


Рис. 1. Условная схема работы МА пневмодозаторного типа

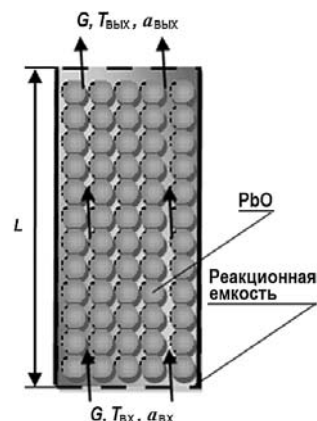


Рис. 2. Условная схема реакционной емкости МА с собственным побудителем расхода

Для исследований массообменного аппарата с собственным побудителем расхода теплоносителя использовался лабораторный МА со встроенным осевым насосом. В данном устройстве при включении насоса за счет создаваемого перепада давлений теплоноситель движется через реакционную емкость, взаимодействуя с размещенным в ней гранулированным оксидом свинца. При взаимодействии с ним теплоноситель обогащается кислородом. Растворенный кислород распространяется по контуру с основным потоком теплоносителя. Регулирование производительностью МА, т.е. количеством подаваемого из аппарата кислорода в единицу времени, осуществляется путем изменения расхода теплоносителя через реакционную емкость. Схема работы МА поясняется на рис. 2.

Экспериментальные исследования характеристик массообменных аппаратов проводились на циркуляционном неизотермическом стенде со свинцово-висмутовым теплоносителем «ТТ-2М» (ГНЦ РФ-ФЭИ). Измерение ТДА кислорода производились лабораторными датчиками активности кислорода (ДАК) на основе твердого оксидного электролита (разработка ГНЦ РФ-ФЭИ). Параметры экспериментальных образцов массообменных аппаратов представлены в табл. 1.

К настоящему времени исследована растворимость кислорода в расплавах свинца и свинца-висмута, а также исследована кинетика растворения оксидов свинца в данных расплавах. Получены эмпирические зависимости для определения растворимости кислорода в рассматриваемых тяжелых жидких металлах и зависимости для расчета кинетических характеристик процесса растворения рассматриваемых оксидов в тех или иных температурных и гидродинамических условиях [4, 5].

Наличие вышеуказанных данных дает возможность разрабатывать расчетные методики для определения характеристик МА.

Одной из основных характеристик МА является его производительность по кислороду. Для расчета производительности МА необходимо знать как концентрацию или ТДА кислорода на выходе из аппарата, так и скорость насыщения теплоносителя кислородом в реакционной емкости аппарата. ТДА кислорода на выходе из МА в свою очередь зависит от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем, кинетических характеристик процесса растворения PbO, конструкции и режима работы аппарата [6].

Таблица 1

Параметры экспериментальных образцов МА

Наименование параметра	Значение параметра
МА пневмодозаторного типа	
Геометрические параметры реакционной емкости (РЕ) МА: внутренний диаметр РЕ, мм высота РЕ, мм диаметр гранул PbO, мм порозность засыпки	80 260 8 0,4
Температура теплоносителя, °C	390
Количество циклов работы МА в единицу времени, цикл/ч Соответствующее время взаимодействия PbO с теплоносителем в одном цикле, с	240 – 20 15 – 180
МА с собственным побудителем расхода	
Геометрические параметры реакционной емкости: диаметр, мм высота слоя засыпки, мм диаметр гранул, мм порозность засыпки	114 500 9 0,45
Температура теплоносителя, °C	400
Расход теплоносителя, м³/ч	0,1 – 0,45
Параметры насоса: тип мощность электродвигателя, Вт частота вращения, об./мин	осевой 750 0 – 1350

В расчетах МА принимаются следующие допущения.

1. Растворение оксида свинца в ТЖМТ рассматривается как процесс физического растворения твердого тела.

2. При рассмотрении процесса растворения кислорода в расплаве свинца-висмута за стандартное состояние выбирают состояние насыщения, т.е. состояние, в котором достигнута предельная растворимость кислорода в расплаве (C_s). Предполагается, что зависимость концентрации растворенного кислорода (C) от ТДА ($a_{[O]}$) выражается соотношением

$$a_{[O]} = C / C_s . \quad (1)$$

3. При растворении PbO коэффициент скорости растворения (K_p) не изменяется при изменении размера гранул.

4. Гранулы имеют шарообразную форму и не изменяют своей формы в процессе растворения.

В основе расчета лежит основной закон кинетики физического растворения твердых тел, в соответствии с которым плотность потока вещества с поверхности растворения пропорциональна концентрационному недонасыщению раствора [3]. Этот закон можно представить выражением

$$\frac{dm}{S_p d\tau} = K(C_s - C) , \quad (2)$$

где S_p – площадь поверхности растворения; C_s – концентрация насыщения; C – концентрация вещества в растворе; K – коэффициент скорости растворения.

Определяя скорость растворения оксида свинца как массу кислорода, покидающего твердую фазу PbO в единицу времени, а также учитывая соотношение (1), закон можно записать в виде

$$-\frac{dm_{[O]}}{d\tau} = K_p \cdot (1 - a_{[O]}) \cdot S_p, \quad (3)$$

где $K_p = K \cdot C_s$; C_s – концентрация насыщения расплава кислородом.

Каждой схеме организации процесса растворения соответствует определенное уравнение материального баланса, связывающее концентрацию вещества в растворе с массой вещества, остающегося в твердом состоянии. Такое балансовое уравнение позволит совместно с уравнением кинетики образовать замкнутую систему и решить задачу о кинетике растворения в условиях принятой схемы.

Для растворения гранулированного оксида свинца в МА балансовое уравнение имеет вид

$$m_{O[O]} - m_{[O]} = V_{\text{тепл}} \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot (C_{[O]} - C_0), \quad (4)$$

где $m_{O[O]}$, $m_{[O]}$ – масса кислорода в начальный и конечный моменты времени в твердом PbO, кг; C , C_0 – текущая и начальная концентрации кислорода в расплаве в реакционной емкости МА, массовых долей; $\rho_{\text{тепл}}$ – плотность теплоносителя, кг/м³; $V_{\text{тепл}}$ – объем теплоносителя в реакционной емкости МА, м³.

За элементарное время $d\tau$ масса кислорода в твердом PbO уменьшится на $dm_{[O]}$, концентрация кислорода в расплаве при этом изменяется на dC , тогда балансовое уравнение примет вид

$$dm_{O[O]} = V_{\text{тепл}} \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot dC_{[O]}. \quad (5)$$

Основными принятыми в технике и технологии обобщенными характеристиками зернистого слоя являются порозность (ε) и удельная поверхность зернистого слоя (A). Порозность, обозначаемая через ε , – это доля объема, не занятого элементами зернистого слоя. Значение ε зависит от формы элементов, характера упаковки в слое и не зависит от абсолютной величины геометрически подобных элементов слоя [8].

Используя понятия порозности и удельной поверхности, применительно к МА на основании решения уравнений (3) и (5) можно получить ТДА кислорода на выходе из МА:

$$a_{[O]\text{вых}} = 1 - (1 - a_{[O]\text{вх}}) \cdot \exp\left(-\int_0^{\tau_k} \left(\frac{K_p \cdot A}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot C_s}\right) d\tau\right), \quad (6)$$

где $a_{[O]\text{вх}}$, $a_{[O]\text{вых}}$ – ТДА кислорода в теплоносителе на входе в МА и на выходе из него соответственно; $\rho_{\text{тепл}}$ – плотность теплоносителя, кг/м³; K_p – коэффициент скорости растворения, кг/(м²·с); ε – порозность засыпки; A – удельная поверхность засыпки, м²/м³; C_s – предельная растворимость кислорода, массовых долей; τ_k – время взаимодействия теплоносителя с оксидом свинца, с.

В основу расчета коэффициента скорости растворения (K_p) могут быть положены экспериментально подтвержденные критериальные зависимости, характеризующие скорость растворения шарового зернистого слоя PbO при обтекании тяжелым теплоносителем [2]:

$$\text{свинец-висмут} \quad Sh = 3,8 \cdot 10^{-2} \cdot Re^{0,70} \cdot Sc^{0,67}, \quad (7)$$

$$\text{свинец} \quad Sh = 8,7 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,42} \cdot Sc^{0,83}, \quad (8)$$

где Sh – число Шервуда; Re – число Рейнольдса; Sc – число Шмидта.

Связь Sh и K_p определяется из соотношения

$$K_p = Sh \cdot D \cdot C_s \cdot \rho_{\text{тепл}} / l, \quad (9)$$

где K_p – коэффициент скорости растворения, кг/(м²·с); D – коэффициент диффузии кислорода в свинце-висмуте, м²/с; C_s – концентрация насыщения расплава свинца-висмута кислородом, в массовых долях; $\rho_{\text{тепл}}$ – плотность расплава свинца-висмута, кг/м³; l – характерный размер для шарового зернистого слоя, м.

При известной ТДА кислорода производительность МА с дискретным принципом работы, например, пневмодозаторного типа, вычисляется по формуле

$$q = \rho_{\text{тепл}} \cdot V_{\text{тепл}} \cdot C_s \cdot a_{[O]_{\text{вых}}} \cdot N, \quad (10)$$

где q – производительность МА, кг/ч; $a_{[O]_{\text{вых}}}$ – ТДА кислорода на выходе из МА, соответствующая режиму работы аппарата; $V_{\text{тепл}}$ – объем теплоносителя в реакционной емкости МА, м³; N – количество циклов работы МА в единицу времени, циклов/ч.

Применительно к МА пневмодозаторного типа под временем взаимодействия PbO с теплоносителем понимают время нахождения расплава в реакционной емкости устройства в одном цикле работы, которое определяет количество циклов работы МА. Упомянутые параметры связаны соотношением

$$N = 3600 / \tau_k, \quad (11)$$

где τ_k – время взаимодействия оксида свинца с теплоносителем в одном цикле, с; N – количество циклов работы аппарата при заданном τ_k , циклов/ч.

Производительность МА с собственным побудителем расхода теплоносителя через реакционную емкость при известном расходе может быть вычислена по простой формуле

$$q = G \cdot C_s \cdot a_{[O]_{\text{вых}}}, \quad (12)$$

где G – массовый расход теплоносителя через реакционную емкость МА, кг/с; $a_{[O]_{\text{вых}}}$ – ТДА кислорода в теплоносителе на выходе МА.

При рассмотрении МА с непрерывным расходом теплоносителя параметр τ_k в формуле (6) имеет смысл времени взаимодействия слоя теплоносителя при его прохождении реакционной емкости от входа до выхода, которое при известном расходе теплоносителя находится из соотношения

$$\tau_k = L \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot S_{\text{МА}} \cdot \varepsilon / G, \quad (13)$$

где G – массовый расход теплоносителя через МА; $S_{\text{МА}}$ – площадь сечения реакционной емкости МА; L – высота слоя засыпки реакционной емкости МА к моменту времени Δt .

В работе были выполнены

- экспериментальное определение характеристик МА пневмодозаторного типа и МА с собственным побудителем расхода теплоносителя с использованием экспериментальных образцов, описанных выше (см. табл. 1);

- расчетное определение характеристик МА пневмодозаторного типа по описанной в статье методике;

- расчеты параметров МА с собственным побудителем расхода, которые выполнялись как по представленной методике, так и с использованием вычислительной программы GRIFMA, представляющей собой однофазный однокомпонентный трехмерный тепло-гидравлический код [6].

В результате расчетно-экспериментальных исследований была определена зависимость ТДА кислорода на выходе из МА пневмодозаторного от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем за цикл работы. Полученная расчетная зависимость ТДА кислорода от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем достаточно хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований (рис. 3).

Значения производительности МА, полученные расчетным и экспериментальным путем, представлены на рис. 4. Расчетная кривая совпадает с экспериментальными дан-

ными с приемлемой точностью.

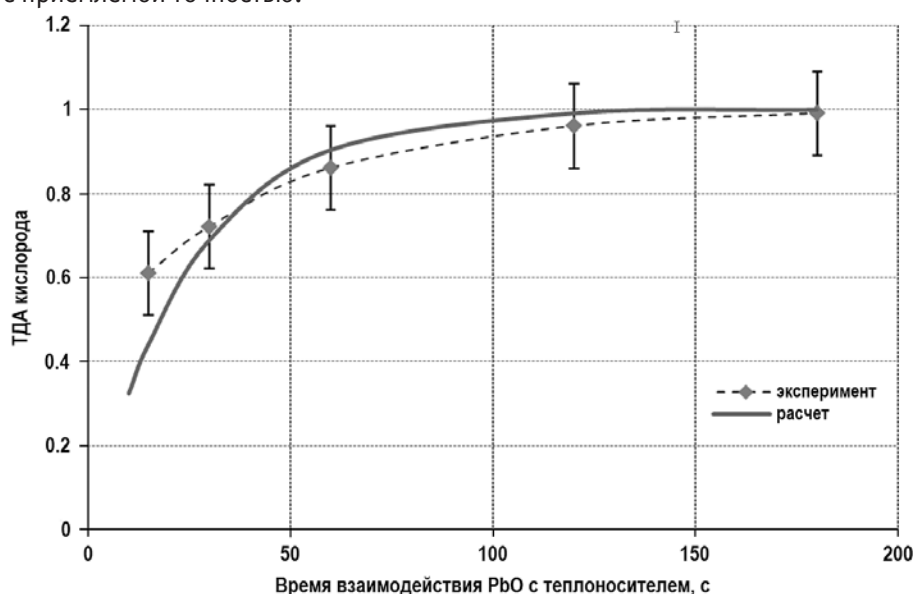


Рис. 3. Результаты расчетного и экспериментального определения ТДА кислорода на выходе из МА пневмодозаторного типа при температуре 390 °С

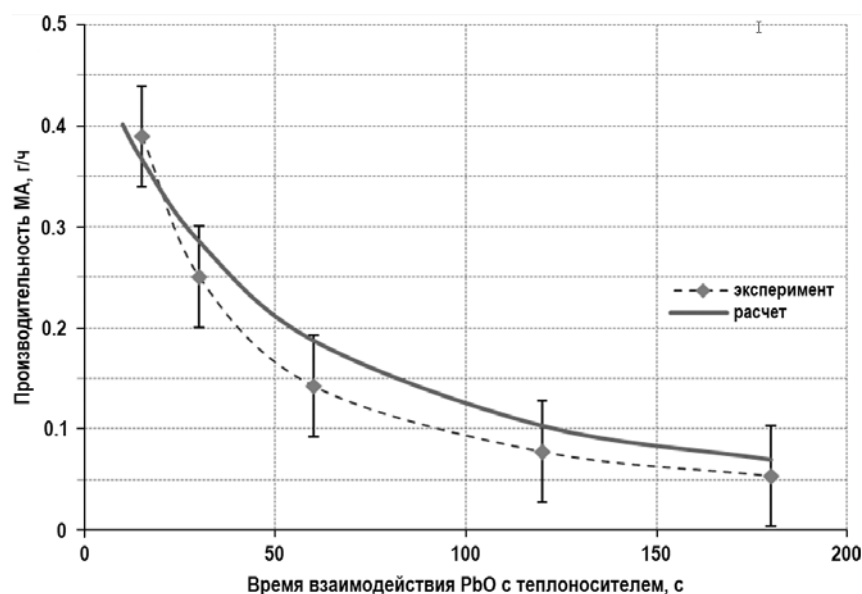


Рис. 4. Результаты расчетного и экспериментального определения производительности образца МА пневмодозаторного типа при температуре 390 °С

Результаты расчетно-экспериментального определения зависимостей ТДА кислорода на выходе из МА и его производительности от расхода теплоносителя через реакционную емкость аппарата для МА с собственным побудителем расхода теплоносителя приведены на рис. 5.

Из сравнения результатов расчетов и эксперимента следует, что характеристики МА, полученные по программе GRIFMA, ниже экспериментальных данных в среднем на ~ 10%, оценка по методике расчета отличается в большую сторону от экспериментально полученных значений в среднем на ~ 12%. В целом можно сделать вывод, что результаты

расчета и эксперимента согласуются удовлетворительно.

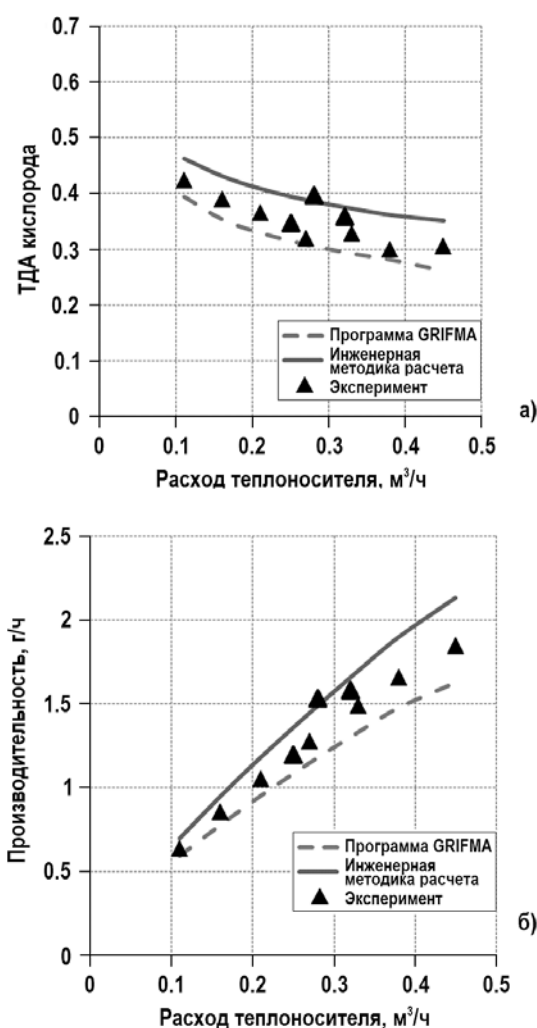


Рис. 5. Результаты расчетного и экспериментального определения ТДА кислорода на выходе из МА (а) и производительности (б) МА с собственным побудителем расхода при температуре 400 °С

При использовании МА и ДАК возможна полная автоматизация процесса контроля и регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ, которая играет в технологии ТЖМТ значительную роль, поскольку требуется непрерывное поддержание требуемого кислородного потенциала теплоносителя при эксплуатации установок с ТЖМТ. Автоматизация процесса поддержания заданного кислородного режима в ТЖМТ реализуется с помощью системы автоматизированного контроля и регулирования ТДА кислорода, разрабатываемой ГНЦ РФ-ФЗИ. В данной системе необходимая подпитка теплоносителя растворенным кислородом осуществляется массообменным аппаратом, который является исполнительным элементом системы. Проведенные испытания прототипов вышеупомянутой системы с рассмотренными в данной статье МА в стендовых условиях подтверждают стабильное поддержание ТДА кислорода в ТЖМТ в заданных пределах и перспективность данного направления разработок [5]. В качестве примера на рис. 6 представлены результаты поддержания заданного кислородного режима с помощью системы автоматизированного контроля и регулирования ТДА кислорода с массообменным аппаратом пневмодозаторного типа.

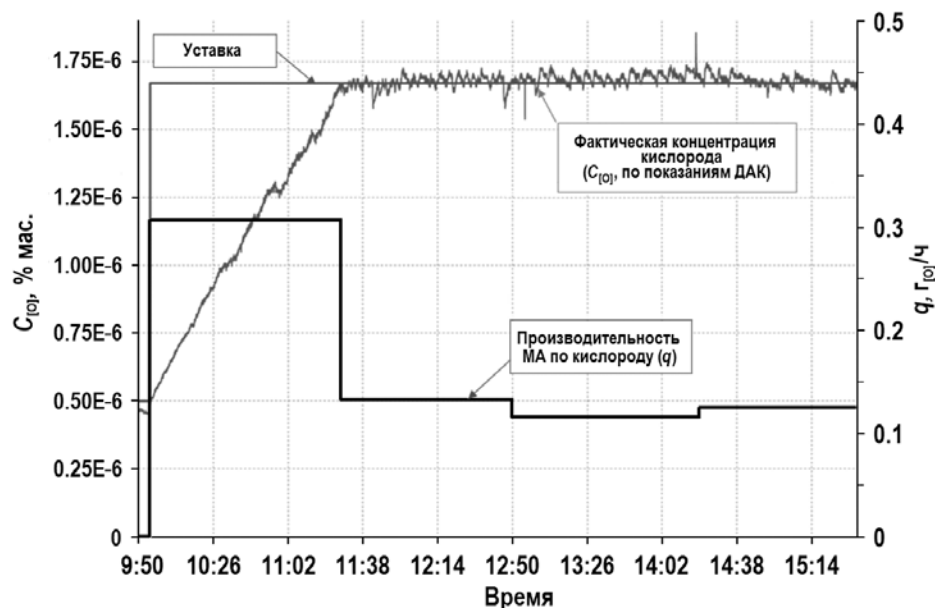


Рис. 6. Результаты поддержания заданного кислородного режима с помощью автоматизированной системы с МА пневмодозаторного типа

Выполненная работа подтверждает возможность расчетной оценки характеристик массообменных аппаратов, что крайне важно при создании МА для конкретного объекта, например, реакторной установки, с целью подбора оптимальной конструкции и параметров ее работы.

В результате работы было получено, что при заданных параметрах реакционной емкости производительность МА пневмодозаторного типа составляет от $\sim 0,05$ до $\sim 0,4$ г_[O]/ч (при температуре 390 °С). Производительность МА с собственным осевым насосом варьируется в диапазоне от $\sim 0,5$ до ~ 2 г_[O]/ч (при температуре 400 °С). Массообменные устройства, обеспечивающие данную производительность, без существенного изменения конструкции могут использоваться на исследовательских циркуляционных стендах с ТЖМТ. На базе рассмотренных массообменных устройств с учетом масштабного фактора могут быть созданы конструкции МА для перспективных реакторных установок на быстрых нейтронах с ТЖМТ (СВБР, БРЕСТ и др.).

Литература

1. Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю. и др. Автоматизированная система управления термодинамической активностью кислорода в свинцовом и свинцово-висмутовом теплоносителях. / Сборник научных трудов. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2011. – С. 188 – 191.
2. Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Симаков А.А. и др. Твердофазная технология регулирования кислорода в тяжелых жидкометаллических теплоносителях. // Новые промышленные технологии. ЦНИЛОТ. – 2004. – №3. – С. 30-34.
3. Патент 2246561 РФ, МПК C23F 11/00. Способ поддержания коррозионной стойкости стального циркуляционного контура со свинецсодержащим теплоносителем и массообменное устройство для его реализации (варианты) / П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин, А.А. Симаков и др. 2005.
4. Громов Б.Ф., Шматко Б.А. Физико-химические свойства расплавов свинец-висмут. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1996. – №4. – С. 35-41.
5. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies // OECD/NEA Nuclear Science Committee, 2007. ISBN 978-92-64-99002-9. – 693 p.

6. Легких А.Ю., Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш. Расчет массообменных аппаратов для обеспечения заданного кислородного режима в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – №1. – С. 80-91.

7. Аксельруд Д.А., Молчанов А.Д. Растворения твердых веществ. – М.: Химия, 1977. – 272 с.

8. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.

9. Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю., Симаков А.А. Экспериментальные исследования усовершенствованного массообменного аппарата с твердофазным источником кислорода применительно к технологии теплоносителя 44,5%Pb-55,5%Bi. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – №4. – С. 161-168.

10. Безносов А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике. – М.: ИздАТ, 2007. – 433 с.

Поступила 19.12.2013 г.

Авторы

Асхадуллин Радомир Шамильевич, заместитель директора Института инновационных технологий по науке и технологиям (ИИТ), ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

E-mail: raskhadullin@ippe.ru

Мартынов Петр Никифорович, заместитель генерального директора, директор ИИТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук, профессор.

E-mail: pmartinov@ippe.ru

Рачков Валерий Иванович, научный руководитель ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН.

E-mail: vrachkov@ippe.ru

Легких Александр Юрьевич, научный сотрудник лаб. 100, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

E-mail: alegkikh@ippe.ru

CALCULATION AND EXPERIMENTAL RESEARCH IN SUPPORT OF MASS EXCHANGERS FOR PROVIDING SPECIFIC OXYGEN REGIME IN HEAVY LIQUID METAL COOLANTS (Pb, Pb-Bi)

Askhadullin R. Sh., Martynov P. N., Rachkov V. I., Legkikh A. Yu.

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk, Kaluga reg., Russia

ABSTRACT

At this paper approaches and results of computational and experimental studies in support of mass exchangers design with solid oxygen source is described. The performance of mass exchangers with the in-built pump and pneumatic type (discrete operating principle) is studied. Experimental studies of the performance mass exchangers was carried on a facility with a non-isothermal circulating coolant Pb-Bi (SSC RF-IPPE). The calculations were performed using empirical temperature dependences of oxygen solubility and dissolution rate coefficients of lead oxide in the Pb-Bi. Dissolution of lead oxide in the mass exchange apparatus was seen as a process of physical dissolution of the solid. The studies obtained dependence thermodynamic activity of oxygen at the outlet of the mass exchanger and its performance on the regime. It is shown that the calculation results are in good agreement with experimental data. Executed work confirms the possibility of estimation performance mass-exchangers, which is extremely important in creating mass-exchangers for a particular object, for example, the nuclear power plant, in order to select an optimal design and parameters of its work.

Key words: thermodynamic activity, oxygen, solubility, lead, lead-bismuth, oxide, coolant, mass exchanger, solid-phase method.

REFERENCES

1. Martynov P.N., Ashadullin R.Sh., Legkikh A.Yu. e.a. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya termodinamicheskoy aktivnost'yu kisloroda v svincovom i svincovovismutovom teplonositelyah. Sbornik nauchnykh trudov [Automated control system for thermodynamic activity of oxygen in lead and lead-bismuth coolant. Proceedings]. Obninsk: SSC RF-IPPE, 2011, pp. 188–191. (in Russian)
2. Martynov P.N., Ashadullin R.Sh., Simakov A.A. e.a. Tverdogaznaya tehnologiya regulirovaniya kisloroda v tyazhelykh zhidkometallicheskih teplonositelyah [Solid-phase technology of management by oxygen in heavy liquid-metal coolants]. *Novye promyshlennyye tehnologii*. 2004, no. 3, pp. 30–34.
3. Martynov P.N., Ashadullin R.Sh., Simakov A.A., e. a. *Sposob podderzhaniya korrozionnoj stojkosti stal'nogo cirkulyacionnogo kontura so svinecsoderzhashchim teplonositelem i massoobmennoe ustroystvo dlya ego realizacii (varianty)* [A method of maintaining the corrosion resistance of the steel circulation loop with lead-containing coolant and mass transfer device for its implementation (options)]. Patent RF, no. 2246561, MPK C23F 11/00, 2005.
4. Gromov B.F., Shmatko B.A. Fiziko-himicheskie svoystva rasplavov svinec-vismut [Physico-chemical properties of lead-bismuth melts]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 1996, no. 4, pp. 35–41.
5. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, OECD/NEA Nuclear Science Committee, 2007. ISBN 978-92-64-99002-9. – 693 p.

6. Legkih A.Yu., Martynov P.N., Ashadullin R.Sh.. Raschet massoobmennyyh apparatov dlya obespecheniya zadannogo kislorodnogo rezhima v tyazhelom zhidkometallicheskom teplonositele [Calculation of the mass-transfer apparatus for a given oxygen regime in a heavy liquid metal coolant]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2013, no. 1, pp. 80–91.
7. Aksel'rud D.A., Molchanov A.D. *Rastvoreniya tverdyh veshchestv* [Dissolve solids]. Moscow, Himiya Publ. 1977, 272 p.
8. Aerov M.E., Todes O.M., Narinskij D.A. *Apparaty so stacionarnym zernistym sloem: Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty* [Apparatus with stationary granular layer: Hydraulic and thermal basics of working]. Leningrad, Himiya Publ. 1979, 176 p.
9. Martynov P.N., Ashadullin R.Sh., Legkih A.Yu., Simakov A.A. Eksperimental'nye issledovaniya usovershenstvovannogo massoobmennogo apparata s tverdogaznym istochnikom kisloroda primenitel'no k tehnologii teplonositelya 44,5%Pb-55,5%Bi [Experimental researches of advanced mass exchanger with solid-phase oxygen source in respect to technology of coolant 44,5%Pb-55,5%Bi]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2009, no. 4, pp. 161–168.
10. Beznosov A.V., Dragunov Yu.G., Rachkov V.I. *Tyazhyolye zhidkometallicheskie teplonositeli v atomnoj energetike* [Heavy liquid metal coolants in nuclear power]. Moscow, IzdAt Publ. 2007, 433 p.

Authors

Askhadullin Radomir Shamil'evich, Deputy Director,
Institute of Innovative Technologies (IIT),
FSUE «SSC RF-IPPE», Cand. Sci. (Engineering).
E-mail: raskhadullin@ippe.ru

Martynov Pyotr Nikiforovich, Deputy Director General, Director, IIT,
FSUE «SSC RF-IPPE», Dr. Sci. (Engineering), Professor.
E-mail: pmartinov@ippe.ru

Rachkov Valery Ivanovich, Research Supervisor, FSUE «SSC RF-IPPE»,
Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding member of the Russian
Academy of Science.
E-mail: vrachkov@ippe.ru

Legkikh Aleksandr Yur'evich, Researcher, FSUE «SSC RF-IPPE»,
Cand. Sci. (Engineering).
E-mail: alegkikh@ippe.ru