

# РАСЧЕТ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОГО КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА В ТЯЖЕЛОМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

**А.Ю. Легких, П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин**

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



Техническая реализация твердофазного метода регулирования содержания кислорода в свинецсодержащих теплоносителях, разработанного в ГНЦ РФ-ФЭИ, осуществляется с помощью специально разрабатываемых устройств – массообменных аппаратов, которые являются важной составной частью комплекса средств технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей. На стадии проектирования массообменного аппарата является необходимым расчетное определение основных характеристик его работы. Описана методика расчета массообменных аппаратов с твердофазным источником кислорода (оксидом свинца), которая позволяет оценить основные характеристики работы аппарата и прогнозировать их изменение в зависимости от времени эксплуатации. Приводятся результаты расчетов по разработанной методике.

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

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

## ВВЕДЕНИЕ

Применение тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ), таких как эвтектический сплав свинца-висмута и свинец, в энергетических установках связано с рядом проблем, важнейшими из которых являются обеспечение коррозионной стойкости контактирующих с данными теплоносителями конструкционных материалов и предотвращение случаев зашлаковки контура или отдельных его участков. Коррозия в жидкометаллической среде имеет принципиальные отличия по сравнению с коррозией в воде и газах, следовательно, необходимы специальные методы и устройства для обеспечения защиты конструкционных сталей от коррозии при использовании ТЖМТ.

Для защиты конструкционных сталей от коррозии в среде расплава свинца и свинца-висмута применяется кислородная пассивация. Пассивация заключается

© *А.Ю. Легких, П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин, 2013*

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 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 [1].

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 свинецсодержащих теплоносителях. Разработанный метод, основанный на использовании процесса растворения твердофазного оксида свинца, помещаемого в поток теплоносителя, называется твердофазным методом регулирования. Техническая реализация твердофазного метода регулирования ТДА кислорода 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. Через реакционную емкость обеспечивается расход теплоносителя. Твердофазное средство окисления, контактируя с циркулирующим тяжелым жидким металлом, растворяется, и кислород транспортируется по всему контуру с потоком теплоносителя [1, 2].

В настоящее время ведутся разработки массообменных аппаратов, которые обеспечат возможность реализации твердофазного метода регулирования ТДА кислорода, в контурах проектируемых реакторных установок на быстрых нейтронах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

На стадии проектирования массообменного аппарата является необходимым расчетное определение основных характеристик работы МА. Инженерный расчет позволяет оценить основные характеристики работы аппарата на стадии его проектирования и подобрать оптимальную конструкцию МА для конкретного объекта регулирования.

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. В расчетах можно принять, что из МА выходит теплоноситель, насыщенный кислородом до предельной растворимости, и тем самым сделать консервативную оценку. Однако данное предположение справедливо не во всех случаях, а полученные значения могут быть завышены. Можно задать значе-

ние концентрации или ТДА кислорода на выходе из МА на основании опыта эксплуатации МА соответствующих конструкций и определить искомую эффективность работы аппарата, т.е. его производительность по кислороду, но заданное значение может не соответствовать конкретному техническому решению.

Таким образом, при расчетном определении характеристик МА является целесообразным рассчитывать концентрацию или ТДА кислорода и учитывать результаты данного расчета при определении производительности по кислороду.

При разработки МА является важным знание среднего размера гранул оксида свинца в любой момент времени в условиях процесса растворения, поскольку от геометрических характеристик засыпки зависит эффективность работы аппарата.

Авторами разработана методика расчета массообменных аппаратов с твердофазным источником кислорода (оксидом свинца), которая позволяет выполнить расчеты производительности МА и растворения оксида свинца в МА с учетом изменения значения ТДА кислорода на выходе из МА в зависимости от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем и кинетических характеристик процесса растворения твердофазного средства окисления. Разработанная методика является одним из инструментов, которые позволяют прогнозировать изменение основных характеристик массообменных устройств при длительном ресурсе эксплуатации.

### ВЫВОД ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Не смотря на то, что МА разных типов имеют различные принципы организации расхода теплоносителя через реакционную емкость, подходы к расчетам производительности и растворения гранул засыпки для них являются схожими.

В методике расчета МА были приняты следующие допущения:

1. 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

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

2. Гранулы имеют форму шариков и не изменяют своей формы в процессе растворения. В реальности гранулы PbO могут иметь форму, отличную от сферической, а растворение может происходить неравномерно по всей поверхности. Принятое допущение заменяет реальную поверхность растворения гранулы на поверхность эквивалентной сферы.

3. В каждом цикле работы МА влияние изменения размера гранул PbO на другие параметры является незначительным, и им можно пренебречь.

Основной закон кинетики физического растворения твердых тел, в соответствии с которым плотность потока вещества с поверхности растворения пропорциональна концентрационному недонасыщению раствора [3], может быть записан в виде

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

где  $C_s$  – 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),

получим

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

где  $K_p = K \cdot C_{s[O]}$ .

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

$$m_{[O]0} - m_{[O]} = V_{\text{тепл}} \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot (C_{[O]} - C_0), \quad (4)$$

где  $m_{[O]0}$ ,  $m_{[O]}$  – массы кислорода в начальный и конечный моменты времени в твердом PbO;  $C$ ,  $C_0$  – текущая и начальная концентрации кислорода в расплаве в реакционной емкости МА;  $\rho_{\text{тепл}}$  – плотность теплоносителя;  $V_{\text{тепл}}$  – объем теплоносителя в реакционной емкости МА.

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

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

Основными принятыми в технике и технологии обобщенными характеристиками зернистого слоя являются порозность  $\varepsilon$  (доля объема, не занятого элементами зернистого слоя) и удельная поверхность зернистого слоя  $A$ . Значение  $\varepsilon$  зависит от формы элементов, характера упаковки в слое и, в принципе, не зависит от абсолютной величины геометрически подобных элементов слоя [4]. Удельной поверхностью зерен  $A_0$  ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ) называют отношение внешней поверхности зерна  $S_3$  к его объему  $V_3$ :

$$A_0 = S_3 / V_3. \quad (6)$$

Для зерен правильной формы расчет  $A_0$  по известным их размерам не представляет затруднений. Удельная поверхность одиночного шара:

$$A_0 = \frac{6}{d}. \quad (7)$$

Удельная поверхность  $A$  ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ) зернистого слоя в целом – это суммарная поверхность всех составляющих его зерен в единице объема реакционной емкости аппарата. Для сферических частиц с практически точечными контактами друг с другом

$$A = (6/d) \cdot (1 - \varepsilon). \quad (8)$$

Используя понятия порозности и удельной поверхности, применительно к МА на основании уравнений (3) и (4) можно записать систему

$$dm_{[O]} = \varepsilon \cdot V_{\text{РЕ}} \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot C_{s[O]} \cdot da_{[O]}, \quad (9)$$

$$-\frac{dm_{[O]}}{d\tau} = K_p \cdot (1 - a_{[O]}) \cdot A \cdot V_{\text{РЕ}}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon$  – порозность засыпки из оксида свинца;  $V_{\text{РЕ}}$  – общий объем реакционной емкости МА;  $C_{s[O]}$  – предельная растворимость кислорода в свинце-висмуте;  $A$  – удельная поверхность засыпки PbO;  $K_p$  – коэффициент скорости растворения PbO.

Подставляя (9) в (10) и разделив переменные, получим дифференциальное уравнение

$$-\frac{da_{[0]}}{(1-a_{[0]})} = \frac{K_p}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot C_s} \cdot A \cdot d\tau, \quad (11)$$

решение которого имеет вид

$$a_{[0]\text{вых}} = 1 - (1 - a_{[0]\text{вх}}) \cdot \exp\left(-\int_0^{\tau_k} \left(\frac{K_p \cdot A}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot C_s}\right) d\tau\right), \quad (12)$$

где  $a_{[0]\text{вх}}$ ,  $a_{[0]\text{вых}}$  – ТДА кислорода в теплоносителе на входе в МА и на выходе из него соответственно;  $\rho_{\text{тепл}}$  – плотность теплоносителя;  $K_p$  – коэффициент скорости растворения,  $\varepsilon$  – порозность засыпки;  $A$  – удельная поверхность засыпки;  $C_s$  – предельная растворимость кислорода;  $\tau_k$  – время взаимодействия теплоносителя с оксидом свинца.

В основу расчёта коэффициента скорости растворения  $K_p$  могут быть положены экспериментально подтвержденные критериальные зависимости, характеризующие скорость растворения шарового зернистого слоя PbO при обтекании тяжёлым теплоносителем [1]:

$$\text{свинец-висмут } Sh = 3,8 \cdot 10^{-2} \cdot Re^{0,70} \cdot Sc^{0,67}, \quad (13)$$

$$\text{свинец } Sh = 8,7 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,42} \cdot Sc^{0,83}, \quad (14)$$

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

Связь  $Sh$  и  $K_p$  определяется из соотношений

$$Sh = \frac{\beta \cdot l}{D}, \quad (15)$$

$$\beta = K_p \cdot (1-a) / [\rho_{\text{тепл}} \cdot (C_s - C)], \quad (16)$$

где  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $D$  – коэффициент диффузии кислорода в свинце-висмуте, м<sup>2</sup>/с;  $l$  – характерный размер, м;  $a$  – ТДА кислорода в теплоносителе.

Исходя из (15) и (16)  $K_p$  можно найти по формуле

$$K_p = \frac{Sh \cdot D}{l} \cdot C_s \cdot \rho_{\text{тепл}}, \quad (17)$$

где  $K_p$  – коэффициент скорости растворения, кг/м<sup>2</sup>·с;  $\rho_{\text{тепл}}$  – плотность расплава свинца-висмута, кг/м<sup>3</sup>;  $C_s$  – концентрация насыщения расплава свинца-висмута кислородом, в массовых долях;  $l$  – характерный размер, м.

Характерный размер для шарового зернистого слоя PbO находится по формуле [4]

$$l = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon \cdot d_{\text{сф}}}{1-\varepsilon}, \quad (18)$$

где  $\varepsilon$  – порозность засыпки из сфероидов PbO (доля не занятого сфероидами объема слоя);  $d_{\text{сф}}$  – диаметр сфероидов PbO.

Для свободной засыпки шаров порозность зернистого слоя можно принять равной 0,4 [4].

Ввиду того, что подынтегральное выражение в зависимости (12) является достаточно сложной функцией, а на практике  $a_{[0]\text{вх}}$  является достаточно малой величиной ( $\ll 1$ ), то для практических инженерных оценок ТДА кислорода зависимость (12) можно упростить к виду

$$a_{[0]\text{вых}} = 1 - \exp\left(-\frac{K_p \cdot A}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot C_s} \cdot \tau_k\right), \quad (19)$$

где  $K_p$ ,  $C_s$ ,  $\rho_{\text{тепл}}$  – параметры при средней температуре теплоносителя;  $\tau_k$  – время

взаимодействия оксида свинца с теплоносителем.

Производительность МА с дискретным принципом работы, например, пневмодозаторного типа, вычисляется по формуле

$$q = \rho_{\text{тепл}} \cdot V_{\text{тепл}} \cdot C_s \cdot a_{[O]_{\text{вых}}} \cdot N, \quad (20)$$

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

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

$$N = 3600/\tau_k$$

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

Производительность МА с непрерывным расходом теплоносителя через реакционную емкость (например, МА с встроенным насосом или внутренним нагревателем) при известном расходе может быть вычислена по простой формуле

$$q = G \cdot C_s \cdot a_{[O]_{\text{вых}}}, \quad (21)$$

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

Важным для практики является оценка растворения оксида свинца в МА. Поскольку целью расчета растворения является определение размера частиц в любой момент времени в условиях данного процесса, то такой расчет позволяет прогнозировать изменения параметров работы аппарата, например, расхода теплоносителя через реакционную емкость, производительности, концентрации кислорода на выходе из МА, во времени.

Для построения модели расчета растворения оксида свинца рассмотрим один сфероид (гранулу) оксида свинца, который находится в реакционной емкости МА. При растворении за элементарное время  $d\phi$  радиус шарика изменится на  $dr$ , а его объем уменьшится на величину

$$dV = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot ((r + dr)^3 - r^3) = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r^3 + 3 \cdot r^2 \cdot dr + 3 \cdot r \cdot (dr)^2 + (dr)^3 - r^3). \quad (22)$$

Ввиду малости  $(dr)^2$  и  $(dr)^3$  можно пренебречь слагаемыми  $3 \cdot r \cdot (dr)^2$  и  $(dr)^3$ , тогда

$$dV = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dr, \quad (23)$$

Масса шарика из PbO за время  $d\tau$  уменьшится на величину

$$dm_{\text{PbO}} = \rho_{\text{PbO}} \cdot dV. \quad (24)$$

Масса кислорода в шарике станет меньше за это же время на величину

$$dm_o = \frac{\mu_o}{\mu_{\text{PbO}}} \cdot \rho_{\text{PbO}} \cdot dV, \quad (25)$$

где  $\mu_o$ ,  $\mu_{\text{PbO}}$  – молярные массы кислорода и оксида свинца соответственно.

Исходя из выражения (3) за элементарное время  $d\tau$  с поверхности шарика  $4\pi r^2$  растворится масса кислорода

$$dm_{[O]} = -K_p \cdot (1 - a_{[O]}) \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot d\tau. \quad (26)$$

Приравнивая (23) и (24), с учетом (22) получим

$$-K_p \cdot (1 - a_{[O]}) \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot d\tau = \frac{\mu_o}{\mu_{\text{PbO}}} \rho_{\text{PbO}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dr.$$

Разделяем переменные и интегрируем:

$$-\int_0^{\Delta\tau} K_p \cdot (1 - a_{[O]}) d\tau = \frac{\mu_0}{\mu_{PbO}} \rho_{PbO} \cdot \int_{r_0}^r dr,$$

где  $\Delta\tau$  – время взаимодействия сфероида с теплоносителем;  $r_0$  – начальный радиус сфероида.

Если рассматривать МА с непрерывным расходом теплоносителя через реакционную емкость (рис. 1), то сфероиды, расположенные у входа в реакционную емкость, будут находиться в теплоносителе с ТДА кислорода, равной  $a_{[O]вх}$ , а сфероиды, расположенные у выходной части реакционной емкости МА, – в расплаве с ТДА кислорода  $a_{[O]вых}$  причем  $a_{[O]вх} \ll a_{[O]вых}$ . Следовательно, скорости растворе-

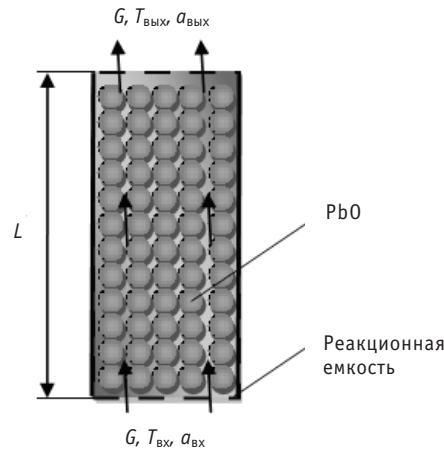


Рис. 1. Условная схема реакционной емкости МА с непрерывным расходом теплоносителя

ния сфероидов, расположенных в разных частях реакционной емкости будут разными, сфероиды, размещенные у входной части реакционной емкости, будут растворяться быстрее.

При рассмотрении МА с непрерывным расходом теплоносителя  $\Delta\tau$  в уравнении (27) имеет смысл рассматриваемого периода времени работы аппарата, а  $\tau_k$  в формуле (19) – времени взаимодействия слоя теплоносителя при его прохождении реакционной емкости от входа до выхода, которое при известном расходе теплоносителя находится из соотношения:

$$\tau_k = \frac{L}{G} \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot S_{\text{МА}} \cdot \varepsilon, \quad (28)$$

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  $\Delta\tau$ .

После интегрирования уравнения с учетом вышесказанного, (27) получим формулы для расчета радиуса сфероидов в любой момент времени:

- для сфероидов, расположенных у входа реакционной емкости МА

$$r = r_0 - \frac{K_p \cdot \Delta\tau}{\frac{\mu_0}{\mu_{PbO}} \cdot \rho_{PbO}}, \quad (29a)$$

- для сфероидов, расположенных у выхода реакционной емкости МА



$$r = r_0 - \frac{K_p \cdot (1 - a_{[O]_{\text{вых}}}) \cdot \Delta\tau}{\frac{\mu_0}{\mu_{\text{PbO}}} \cdot \rho_{\text{PbO}}}, \quad (296)$$

где  $\mu_0$ ,  $\mu_{\text{PbO}}$  – молярные масса кислорода и оксида свинца соответственно;  $\Delta\tau$  – период времени работы МА;  $r_0$  – начальный радиус сфероидов.

При расчете растворения сфероидов в МА с дискретным принципом работы ввиду особенностей конструкции и организации расхода через реакционную емкость [5] нужно применить несколько другой подход.

Так как теплоноситель, обогащенный кислородом, подается из МА в контур порциями, рассмотрим процесс взаимодействия теплоносителя с оксидом свинца в МА за один рабочий цикл [5]. Для того чтобы найти насколько изменится диаметр сфероидов за один рабочий цикл МА, можно построить итерационный процесс:

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

$$\Delta d^{(k)} = \frac{2 \cdot K_p \cdot (1 - a_{[O]}^{(k)}) \cdot d\tau}{\frac{\mu_0}{\mu_{\text{PbO}}} \cdot \rho_{\text{PbO}}},$$

$$\Delta d^{(k+1)} = \Delta d^{(k)} + \Delta d^{(k-1)},$$

$$\Delta d^{(k)} = \Delta d^{(k-1)} + \Delta d^{(k+1)},$$

$$\tau^{(k)} = \tau(k-1) + d\tau,$$

$k$  – номер итерации;  $d\tau$  – шаг по времени;  $\Delta d$  – изменение диаметра шарика при растворении.

Получив изменение диаметра сфероидов за один цикл работы МА, легко определить, насколько изменится диаметр сфероидов за период времени работы МА:

$$\Delta d_{\text{sum}} = \Delta d \cdot N \cdot \Delta\tau, \quad (30)$$

где  $N$  – количество циклов работы в единицу времени;  $\Delta\tau$  – время непрерывной работы аппарата.

Для того чтобы прогнозировать изменение максимальной производительности МА при уменьшении размеров гранул засыпки PbO можно использовать следующий подход.

При уменьшении размера гранул в процессе эксплуатации МА изменяется общая поверхность растворения и объем, занимаемый засыпкой, а количество сфероидов PbO при растворении не изменяется.

Исходя из вышесказанного можно записать следующие соотношения:

$$S_{p0} = \pi \cdot d_0^2 \cdot n = \frac{6}{d_0} \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot V_0,$$

$$S_p = \pi \cdot d^2 \cdot n = \frac{6}{d} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot V, \quad (31)$$

где  $S_{p0}$ ,  $V_0$  – поверхность растворения и объем, занимаемый засыпкой, в исходном состоянии (со средним диаметром гранул засыпки  $d_0$  и порозностью  $\varepsilon_0$ );  $S_p$ ,  $V$  – поверхность растворения и объем, занимаемый засыпкой, в состоянии со сред-



ним диаметром гранул засыпки  $d$  и порозностью  $\varepsilon$ ;  $n$  – количество гранул в засыпке.

Разделив одно соотношение на другое и выразив  $V$ , получим

$$V = \frac{d^3 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{d_0^3 \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot V_0. \quad (32)$$

Подставляя соотношение (32) в (20), получим зависимость максимальной производительности МА с дискретным принципом работы от времени работы аппарата при заданном режиме работы МА и температуре теплоносителя в явном виде

$$q(\tau) = \frac{d(\tau)^3 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{d_0^3 \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot V_0 \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot \varepsilon \cdot C_s \cdot a_{[O]_{\text{вых}}} \cdot N, \quad (33)$$

где  $q$  – производительность МА;  $C_s$  – концентрация насыщения;  $a_{[O]_{\text{вых}}}$  – ТДА кислорода на выходе из МА, соответствующая режиму работы аппарата;  $\rho_{\text{тепл}}$  – плотность теплоносителя;  $\varepsilon$  – порозность зернистого слоя;  $V_0$  – объем реакционной емкости МА (реакционная емкость полностью заполнена гранулами из PbO в исходном состоянии);  $d_0$  – размер сфероидов в исходном состоянии;  $N$  – количество циклов работы МА в единицу времени.

В инженерных расчетах в формуле (33) можно положить, что  $\varepsilon \approx \varepsilon_0$ .

При оценке зависимости производительности МА с непрерывным расходом теплоносителя от времени его работы необходимо выполнить гидравлический (для МА с насосом) или теплогидравлический расчет (для МА с нагревателем) расхода теплоносителя для различных значений среднего размера сфероидов оксида свинца в МА, поскольку при уменьшении размера сфероидов будет изменяться гидравлическое сопротивление слоя засыпки. Производительность по кислороду при этом вычисляется по формуле (21). Связь высоты слоя засыпки с размером гранул PbO определяется на основании соотношения (32).

## ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МА

Для проверки разработанной методики расчета производительности МА был

Таблица 1

### Входные данные для расчета образца МА

Параметр	Значение
Реакционная емкость МА: внутренний диаметр, мм	80
высота, мм	260
диаметр сфероидов PbO, мм	8
порозность засыпки	0,4
Температура теплоносителя, °C	390
Растворимость кислорода в свинце-висмуте, % масс.	$1,13 \cdot 10^{-4}$
Количество циклов работы МА в единицу времени, циклов/ч, соответствующее время взаимодействия PbO с теплоносителем в одном цикле, с	240–20, 15–180

выполнен расчет образца МА пневмодозаторного типа, аппарата с дискретным принципом работы, проходившего испытания на циркуляционном стенде «ТТ-2М» в 2008 г. В результате экспериментальных исследований была определена зависимость ТДА кислорода на выходе из МА от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем за цикл работы МА.

Входные данные для расчета образца МА приведены в табл. 1.

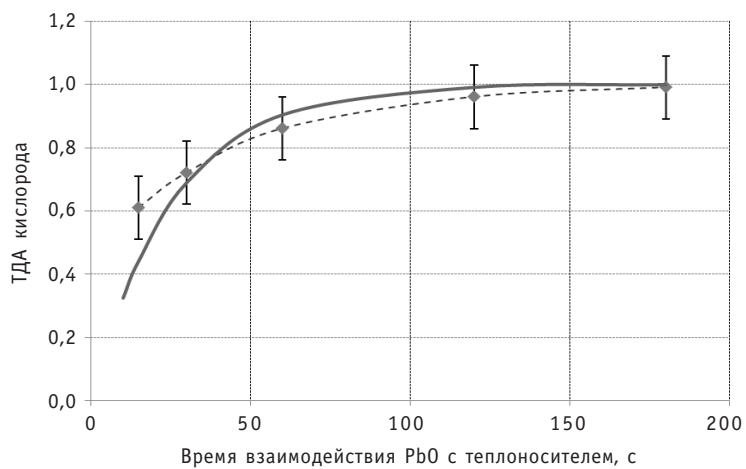


Рис. 2. Зависимость ТДА кислорода от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем при температуре 390°C:  $\blacklozenge$  – эксперимент; — — — расчет

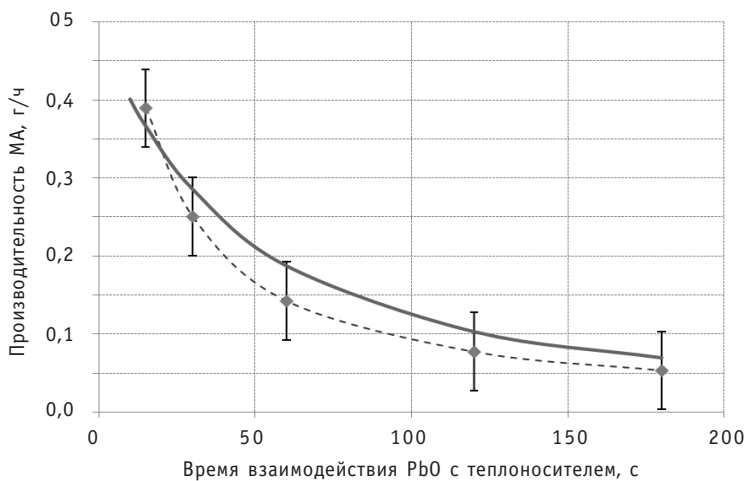


Рис. 3. Производительность образца МА пневмодозаторного типа при температуре 390°C:  $\blacklozenge$  – эксперимент; — — — расчет

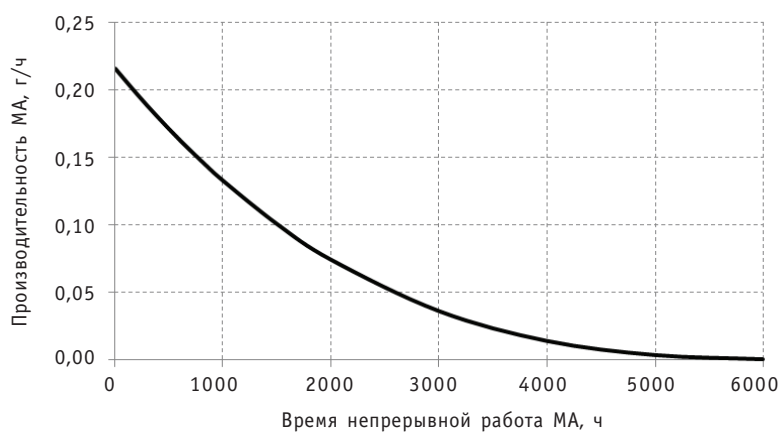


Рис. 4. Производительность МА пневмодозаторного типа при  $N = 30$  циклов/ч в зависимости от времени непрерывной работы

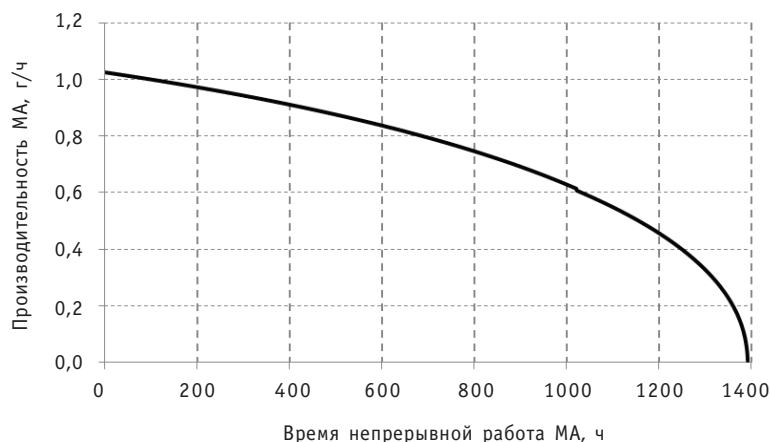


Рис. 5. Производительность МА с непрерывным расходом теплоносителя при 400°C в зависимости от времени непрерывной работы

Полученная расчетная зависимость ТДА кислорода от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем достаточно хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований (рис. 2).

Значения производительности МА, полученные расчетным и экспериментальным путем, представлены на рис. 3. Расчетная кривая совпадает с экспериментальными данными с приемлемой точностью.

С использованием формулы (33) была выполнена оценка производительности образца МА пневмодозаторного типа при  $N = 30$  циклов/ч (т.е. времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем 120 с в каждом цикле) в зависимости от времени непрерывной работы аппарата в данном режиме (рис. 4). Температура теплоносителя была принята равной 400°C.

На рисунке 5 представлена расчетная оценка временной зависимости производительности МА с непрерывным расходом теплоносителя через реакционную емкость при постоянной температуре. Расчет выполнен по разработанной методике для МА с геометрическими характеристиками реакционной емкости, приведенными в табл. 1. Предполагалось, что давление, создаваемое побудителем расхода теплоносителя МА, постоянно в процессе работы МА и составляет 2 кПа, что соответствует расходу теплоносителя через засыпку в исходном состоянии 0,5 м<sup>3</sup>/ч; температура теплоносителя была принята равной 400°C.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета основных характеристик массообменных аппаратов. Методику можно использовать для расчета параметров МА с непрерывным расходом теплоносителя через реакционную емкость (МА со встроенным насосом или МА с нагревателем) и дискретным принципом работы (МА пневмодозаторного типа). Данная методика позволяет рассчитать и учесть зависимость ТДА кислорода на выходе из МА от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем, выполнить оценку производительности МА, учитывая изменения размеров сфероидов РbO.

2. Проведена апробация разработанной методики расчета с использованием образца МА пневмодозаторного типа, проходившего испытания на циркуляционном стенде ТТ-2М, со свинцово-висмутовым теплоносителем. Результаты расчета достаточно хорошо согласуются с экспериментом.

3. Разработанная методика расчета МА позволит определить основные харак-

теристики работы аппаратов на стадии их проектирования и подобрать оптимальные конструкции МА для конкретных объектов регулирования. Методика также позволяет прогнозировать изменение производительности МА при длительной эксплуатации.

4. Предполагается продолжение работ по развитию и совершенствованию методов расчета массообменных аппаратов. Планируется подтверждение методики расчета растворения РbO в МА на основании результатов ресурсных испытаний образцов МА.

### **Литература**

1. *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.
2. Патент 2246561 РФ, МПК С23F 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.
3. *Аксельруд Д.А., Молчанов А.Д.* Растворения твердых веществ. – М.: Химия, 1977. – 272 с.
4. *Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А.* Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.
5. *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%Рb-55,5%Вi // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – №4. – С. 161-168.

Поступила в редакцию 24.09.2012

compensation is used in the even iterations and is absent in uneven iterations. The numerical tests demonstrate high efficiency of developed IFM schemes. Proposed schemes are implemented into several 3D codes of neutron kinetics and are used in the practical calculation by the fast neutron reactor code GVA and by the code WIMS-ВОЛНА for the VVER-1000 reactor life-time calculation.

#### **УДК 629.76:629.78**

*On the Conversion of Thermal Energy of Nuclear Reactor into Directional Flow Energy of Electromagnetic Radiation in Nuclear-Photon Engine \ A.V. Gulevich, O.F. Kukharchuk, N.I. Loginov, A.S. Mikheev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 9 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.*

Questions of direct conversion of thermal energy of the nuclear-photon engine into the energy of directional flow light radiation have been discussed. Possible design options of this converter differing in their irradiators geometrical forms have been highlighted, with comparative analysis of these options

#### **УДК 621.039.534.6**

*Calculation of Mass Exchangers for Providing Specific Oxygen Regime in Heavy Liquid Metal Coolant \ A.Yu. Legkikh, P.N. Martynov, R.Sh. Askhadyllin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 12 pages, 1 tables, 5 illustrations. – References, 5 titles.*

Technical implementation of solid-phase method for adjustment of oxygen content in lead alloys coolants, developed by IPPE, is realized by means of specially designed devices – mass exchangers which are a significant component of heavy liquid-metal coolant technology. On the design stage of mass exchanger it is necessary to calculate major features of mass exchanger. At this paper the calculation method of mass exchangers with solid-phase oxygen source (lead oxide) is described which allows to estimate the major features of apparatus and to predict it changes in depend on operating time.

#### **УДК 532.526.4:621.039.533.34**

*The Modeling of Subheated Coolant Influence on Temperature Measurement at the Exit of Fuel Rod Assamly in WWER-1000 reactor \ Belozеров V.I., Varseev E.V., Kolesov V.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 9 pages, 1 tables, 3 illustrations. – References, 15 titles.*

Errors in measurement of bulk temperature at the core exit of WWER-1000 reactor depends on the flow of relatively cold coolant through the control rod guide thimble tube in the fuel assemblies – so called “absorber” effect. The problem of temperature field modeling at the exit from WWER-1000 reactor core was solved in order to predict influence of such effect on thermocouple registrations along reactor radius at reactor measurements. The problem was solved in two stages. Energy release within the core elements of serial WWER-1000 reactor was calculated using the neutron transport code MCNP. The temperature field was calculated by using the OpenFOAM CFD package and heat release distribution, obtained at first stage of calculations. The results, obtained with developed methodology, are in good agreement with the reactor measurements results and researches of other authors. Obtained data allowed evaluating influence of the “absorber” effect at measurements in different position along core radius of WWER-1000 reactor.

#### **УДК 621.039.546**

*Numerical and Experimental Investigation of the Model Steam Generator Reactor Facility BREST-OD-300 \ V.A. Grabezhnaya, A.S. Mikheev, Yu.Yu. Stein, A.A. Semchenkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 9 pages, 3 tables, 6 illustrations. – References, 5 titles.*

The paper presents the results of testing the 3-tubes model of steam generator reactor facility BREST-OD-300, heated by liquid lead, at subcritical (18 MPa) and supercritical (25 MPa) pressure of the water at a flowrate – 80, 100 and 120% of the nominal value. The experimental data are compared with numerical simulation using the code RELAP5/mod 3.2.

#### **УДК 621.039.51**

*Assessment of the Increasing in <sup>99</sup>Mo Production for Different WWR-c Reactor Core Compositions \ O.Yu. Kochnov, V.V. Kolesov, R.V. Fomin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 6 pages, 3 tables, 6 illustrations. –*