

О КОНТРОЛЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В УСТАНОВКАХ С ДЛИТЕЛЬНОМ РЕСУРСОМ

Ю.Г. Чередниченко, О.Э. Левин

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Р

При выводе установок с тяжелым теплоносителем на рабочий режим и их эксплуатации необходимы контроль и поддержание в заданных пределах содержания кислорода в теплоносителе. Для контроля кислорода в расплавах металлов, как правило, используются сенсоры на основе твердых кислородоионных электролитов. Представлен анализ методологических аспектов контроля растворенного кислорода в неизотермических циркуляционных контурах с металлическими теплоносителями с использованием таких сенсоров. Показано, что при наличии в теплоносителе растворенных материалов стенок контура и взвесей их различных окислов контроль по значениям активности и концентрации кислорода, рассчитанным для чистого теплоносителя, в общем виде неправомерен. Приведены экспериментальные результаты распределения по контуру окислительных потенциалов в зависимости от температуры теплоносителя, полученных в процессе длительных испытаний образцов оболочек в расплаве свинца в двух циркуляционных стендах СМ2-М и ЦУ1-М, отличающихся принципиальными способами поддержания заданных режимов по кислороду. В области низких температур экспериментальные значения окислительного потенциала в обоих стендах меньше рассчитанных для чистого свинца, что приводит к отличию вычисленных концентраций кислорода для участков контура с T_{\min} и T_{\max} до двух и более раз, т.е. по контуру наблюдается так называемая «неизоконцентрация» кислорода. В режиме раскисления при эжекции водорода в теплоноситель окислительный потенциал в контуре изменяется сложным образом, и говорить о концентрации кислорода вообще не имеет смысла. Сделан вывод, что в установках с длительным ресурсом контроль параметров теплоносителя по кислороду необходимо вести не по величине вычисленных активности или концентрации кислорода, а по значению окислительного потенциала в зоне максимальной температуры. Для получения корректных значений окислительного потенциала измерения следует проводить в стационарных по температуре режимах всей установки.

Ключевые слова: контроль, кислород, тяжелый теплоноситель, циркуляционный контур, кислородоионный электролит, окислительный потенциал.

В ЯЭУ с тяжелыми теплоносителями необходимо непрерывно поддерживать оптимальные условия для формирования оксидных защитных пленок на всех контактирующих с расплавом поверхностях (создать условия для непрерывной пассива-

© Ю.Г. Чередниченко, О.Э. Левин, 2020

ции материалов контура растворенным кислородом из теплоносителя). Для этого необходим контроль режимов раскисления и подпитки теплоносителя кислородом как при пусковой пассивации материалов, так и при эксплуатации ЯЭУ.

Для контроля концентрации растворенного кислорода в расплаве используют метод ЭДС электрохимических ячеек на твердых электролитах [1]. Этот метод позволяет экспериментально с высокой точностью измерять окислительный потенциал расплава ΔG на основе закона превращения химической энергии в электрохимическую.

ЭДС электрохимической ячейки E определяется разностью окислительных потенциалов (энергий Гиббса) в электроде сравнения $\Delta G_{\text{эт}}$ и в расплаве (теплоносителе) $\Delta G_{\text{тепл}}$:

$$E = (\Delta G_{\text{эт}} - \Delta G_{\text{тепл}}) / (2 \cdot F), \quad (1)$$

где $F = 9.648456 \cdot 10^4$ Кл/моль – число Фарадея; ΔG – окислительный потенциал, Дж/г-ат.О.

Окислительный потенциал расплава $\Delta G_{\text{тепл}}$ с любым содержанием примесей записывается в виде

$$\Delta G_{\text{тепл}} = \Delta G_{\text{тепл}}^0 + RT \cdot \ln a_{\text{O}}, \quad (2)$$

где $R = 8.31441$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – температура, К; $\Delta G_{\text{тепл}}^0$ – окислительный потенциал расплава в состоянии насыщения по кислороду, (Дж/г-ат.О); $a_{\text{O}} = C_{\text{O}}/C_{\text{O}}^S$ – активность кислорода в расплаве; C_{O} – концентрация растворенного кислорода в расплаве; C_{O}^S – концентрация растворенного кислорода в режиме насыщения.

В электроде сравнения $a_{\text{O}} = 1$ (расплав находится в состоянии насыщения по кислороду) и $\Delta G_{\text{эт}} = \Delta G_{\text{эт}}^0$ – известная функция. Тогда окислительный потенциал любого теплоносителя $\Delta G_{\text{тепл}}$ с любым содержанием примесей в любой точке контура установки записывается в виде

$$\Delta G_{\text{тепл}} \equiv \Delta G_{\text{эт}}^0 - 2F \cdot E(B). \quad (3)$$

При анализе состояния теплоносителя в физхимии принято иметь дело с энергией Гиббса ΔG или, по-другому, с окислительным потенциалом расплава.

На практике физики-реакторщики оперируют с параметром концентрации примесей в теплоносителе. Для наглядного представления о реальных отклонениях активности от идеальных условий используют общеизвестную диаграмму a - C - T - E [2], которая рассчитывается по уравнению (2) для идеального случая, а именно, теплоноситель чистый без каких-то примесей (в том числе и примесей газов), кроме кислорода.

В циркуляционных стендах, как в реакторных установках, происходит постоянное поступление металлических примесей (железо, хром и т.д.) из стенок контура, что вызывает раскисление теплоносителя. Для компенсации раскисления используют дополнительные источники растворенного кислорода в жидкий металл [2, 3].

С течением времени в теплоносителе контура формируется мелкодисперсная твердая фаза на основе оксидов железа (Fe_3O_4 , $\text{PbO} \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$ и др.). Она управляет окислительным потенциалом теплоносителя во всем неизотермическом циркуляционном контуре [4, 5].

Поскольку образование и распад этих оксидов при изменении температуры происходят медленно (с большим временем запаздывания от изменения температуры), в циркулирующем теплоносителе формируется состав с постоянным по всему контуру содержанием оксидов и растворенных кислорода и железа. На это указывает отсутствие сколь-нибудь заметного гистерезиса ЭДС датчиков при движении теплоносителя от холодильника в зону с максимальной температурой T_{max} и обратно в циркуляционных стендах при ресурсных испытаниях.

Примеси могут значительно повлиять как на состав окислов в теплоносителе [5] (т.е. на величину ΔG^0 теплоносителя [6]), так и на его C_0^S [7 – 10]. Следовательно, рассчитанные в модели чистого теплоносителя значения активности и концентрации кислорода будут отличаться от их истинных значений в контуре. На практике на общепринятой a - C - T - E -диаграмме это проявляется в виде «неизоконцентрационного» распределения кислорода ($C_0 \neq \text{const}$) по контуру. Например, в [2] показано, что в контурах теплоносителя с параметрами БРЕСТ-ОД-300 на диаграмме практически не существует области изоконцентрационного распределения кислорода. Особенно «неизоконцентрация» должна проявиться при раскислении теплоносителя путем инъекции водорода в контур.

По форме зависимости от температуры для ΔG^0 и C_0^S для реального теплоносителя с примесями будут иметь вид этих зависимостей для чистого теплоносителя, но входящие в них коэффициенты будут другие. Поэтому в случае линейной зависимости от температуры $\Delta G_{\text{тепл}}(T)$ и, следовательно, ЭДС $E(T)$ в контуре всегда наблюдается режим $C_0 = \text{const}$. Однако для вычисления истинных значений активности и концентрации кислорода (особенно в реакторных установках) необходимо иметь зависимости ΔG^0 и C_0^S для реального теплоносителя с примесями, что на практике вряд ли осуществимо или, по крайней мере, затруднительно.

Поэтому в общем виде по физике процесса для контроля режимов раскисления, пассивации материалов и подпитки теплоносителя кислородом как на стадии запуска, так и при эксплуатации установок необходимо контролировать не активность и концентрацию кислорода (ввиду неопределенности ΔG^0 и C_0^S теплоносителя), а разность окислительных потенциалов теплоносителя $\Delta G_{\text{тепл}}$ и окисла $\Delta G^0(\text{Fe}_3\text{O}_4)$:

$$\delta\Delta G = \Delta G_{\text{тепл}} - \Delta G^0(\text{Fe}_3\text{O}_4) > 0, \quad (4)$$

где $\Delta G^0(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ – окислительный потенциал оксида Fe_3O_4 , формирующего защитную пленку на внутренних поверхностях контура.

Это условие должно выполняться при любых примесях в теплоносителе

Фактически необходимо контролировать при максимальной температуре в контуре T_{max} величину ЭДС E сенсора кислорода (ДАК) в теплоносителе относительно расчетной ЭДС $E(\text{Fe}_3\text{O}_4)$, при которой начинается депассивация пленок (рис. 1, 2), т.е. должно выполняться условие

$$E = E(\text{Fe}_3\text{O}_4)(T_{\text{max}}) - \delta E(T_{\text{max}}). \quad (5)$$

Допустимые (минимальные и максимальные) значения $\delta\Delta G_{\text{рб}}(T_{\text{max}})$, $\delta\Delta E(T_{\text{max}})$ должны быть получены на основании предварительных ресурсных испытаний материалов в циркуляционных стендах. В случае небольших отклонений истинных значений окислительного потенциала реального теплоносителя $\Delta G_{\text{тепл}}$ от ΔG теплоносителя без примесей контроль режима на ресурсе можно вести по активности или концентрации кислорода из известной a - C - T - E -диаграммы, предварительно оценив допустимую «неизоконцентрацию» кислорода по контуру.

Для демонстрации вышеизложенного на рис. 1 представлены экспериментальные данные и их линейные аппроксимации по изменению окислительного потенциала от температуры $\Delta G_{\text{тепл}}(T)$ в контурах циркуляционных стендов СМ-2 и ЦУ-1М со свинцовым теплоносителем в стационарных режимах при ресурсных испытаниях образцов оболочек твэлов. На рисунке 2 представлены соответствующие рис. 1 зависимости $E_{\text{тепл}}(T)$ – ЭДС сенсоров (ДАК). У всех сенсоров в качестве электрода сравнения использовалась система $\text{Bi-Bi}_2\text{O}_3$ (насыщенный кислородом висмут). Контроль режимов на ресурсе осуществлялся по концентрации кислорода, рассчитанной из a - C - T - E -диаграммы для чистого свинцового теплоносителя по значениям ЭДС ДАК, расположенных в зоне максимальной температуры, где находились испы-

туемые образцы, или близкой к ней. Значения ЭДС ДАК при $T \approx T_{\max}$ на рис. 2 соответствовали рассчитанной концентрации кислорода $C_0 \approx 2 \cdot 10^{-6}$ масс.%. На рисунках 1, 2 показаны также расчетные зависимости $\Delta G_{\text{рб}}(T)$ и $E_{\text{рб}}(T)$ для теплоносителя без примесей при $C_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ масс.%, а также $\Delta G^0(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ и $E(\text{Fe}_3\text{O}_4)$.

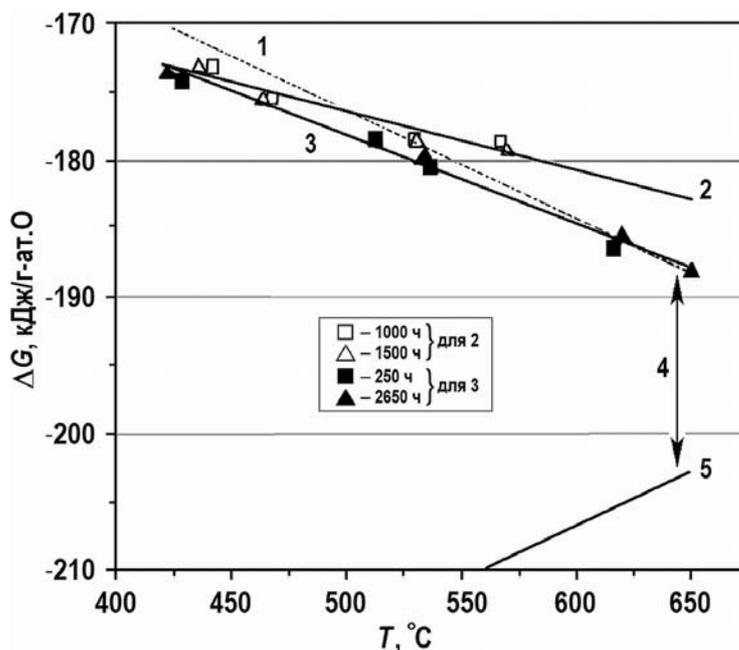


Рис. 1. Изменение окислительного потенциала свинцового теплоносителя в контурах стендов СМ-2 и ЦУ-1М при ресурсных испытаниях: 1 – $\Delta G_{\text{рб}}(C_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ масс.%) ; 2 – $\Delta G_{\text{тепл}}(\text{ЦУ-1М})$; 3 – $\Delta G_{\text{тепл}}(\text{СМ-2})$; 4 – $\delta \Delta G(T_{\max})$; 5 – $\Delta G^0(\text{Fe}_3\text{O}_4)$

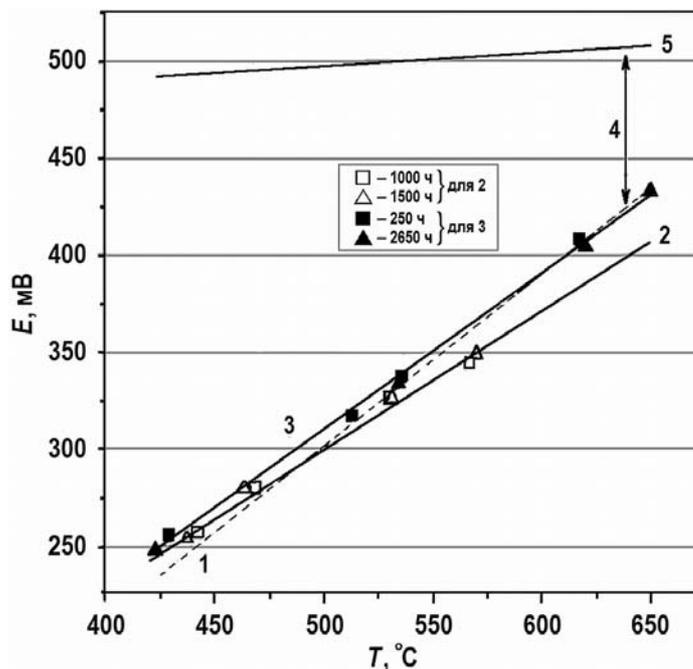


Рис. 2. Изменение ЭДС ДАК в свинцовом теплоносителе в контурах стендов СМ-2 и ЦУ-1 при ресурсных испытаниях: 1 – $E_{\text{рб}}(C_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ масс.%) ; 2 – $E(\text{ЦУ-1М})$; 3 – $E(\text{СМ-2})$; 4 – $\delta E(T_{\max})$; 5 – $E(\text{Fe}_3\text{O}_4)$

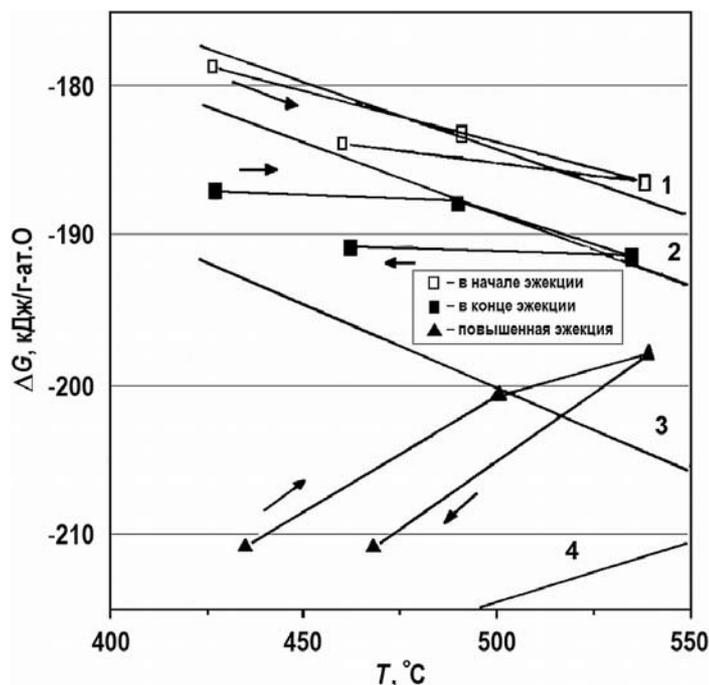


Рис. 3. Изменение окислительного потенциала теплоносителя в контуре стенда ЦУ-1М при эжекции водорода в контур: 1 – ΔG_{Pb} ($C_0 = 6 \cdot 10^{-7}$ масс.%); 2 – ΔG_{Pb} ($C_0 = 3 \cdot 10^{-7}$ масс.%); 3 – ΔG_{Pb} ($C_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ масс.%); 4 – ΔG^0 (Fe_3O_4)

Для стендов СМ-2 и ЦУ-1М имелось принципиальное отличие в способах поддержания режимов испытаний. В стенде СМ-2 на ресурсе наблюдался медленный постоянный рост ЭДС всех ДАК, что эквивалентно уменьшению окислительного потенциала теплоносителя, понижению концентрации растворенного в теплоносителе кислорода, вероятнее всего, за счет связывания его железом, диффундирующим через защитные пленки. Для поддержания концентрации кислорода в области заданных значений на поверхность расплава в газовую полость центробежного насоса периодически дозированно подавали газообразный кислород. В стенде ЦУ-1М, наоборот, на ресурсе наблюдалось постоянное понижение ЭДС всех ДАК, что эквивалентно росту окислительного потенциала теплоносителя, увеличению концентрации растворенного в теплоносителе кислорода, вероятнее всего, за счет разложения примесей различных твердых оксидов при их значительном содержании в установке. Для поддержания концентрации кислорода в области допустимых значений на поверхность расплава в газовую полость центробежного насоса периодически дозированно подавали аргоно-водородную смесь. Другими словами, стенд СМ-2М был условно «чистым», а ЦУ-1М – условно «грязным», что подтверждается фактом наличия значительно большего количества шлаков в расплаве при сливе теплоносителя в стенде ЦУ-1М, чем в СМ-2.

Из рисунков 1, 2 видны линейные зависимости $E_{\text{тепл}}(T)$ и $\Delta G_{\text{тепл}}(T)$, что, как указывалось выше, говорит об изоконцентрационном распределении кислорода по контуру. Однако наклон экспериментальных зависимостей отличается от наклона расчетных $E_{Pb}(T)$ и $\Delta G_{Pb}(T)$ для чистого теплоносителя. Другими словами, на a - C - T - E -диаграммах обоих стендов наблюдалась «неизоконцентрация» распределения растворенного кислорода по контуру. Рассчитанные для чистого теплоносителя значения C_0 при низких температурах $T \approx 420^\circ\text{C}$ меньше C_0 для $T \approx 570 - 650^\circ\text{C}$ до двух и более раз. Максимальное отличие $\Delta G_{\text{тепл}}(T)$ и $E_{\text{тепл}}(T)$ от $\Delta G_{Pb}(T)$ и $E_{Pb}(T)$ на-

блюдается для «условно грязного» стенда ЦУ-1М. Это подтверждает, что в реальных установках с длительным ресурсом контроль режимов теплоносителя в предположении изоконцентрационного распределения кислорода по $a-C-T-E$ -диаграмме для чистого теплоносителя неправомерен. Например, при поддержании режима по значению C_0 , вычисленному для области низких температур, реальный окислительный потенциал в зоне T_{\max} будет выше расчетного и (в случае значительного содержания окислов в теплоносителе) может выйти за пределы допустимого.

Еще более неправомерен контроль теплоносителя по активности или концентрации кислорода при его водородной регенерации (раскислении), особенно при эжекции водорода непосредственно в контур. На рисунке 3 показаны изменения окислительного потенциала теплоносителя в стенде ЦУ-1М при периодической эжекции водорода в контур для поддержания заданного режима, а также при повышенной эжекции при раскислении. Стрелки показывают направление движения теплоносителя от насоса к T_{\max} и выходу из холодильника. Там же приведены расчетные зависимости $\Delta G_{\text{рб}}$ для чистого теплоносителя при концентрациях кислорода, по которой контролировался режим раскисления. Как видно из рисунка, говорить о концентрации кислорода в этом случае вообще не имеет смысла. Окислительный потенциал постоянно изменяется по мере движения теплоносителя по контуру и совершенно не соответствует изменению $\Delta G_{\text{рб}}(T)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В реальных установках при больших ресурсах количество и химический состав примесей в теплоносителе в общем случае неизвестен, т.е. неизвестны $\Delta G_{\text{тепл}}^0$ и C_0^S . Поэтому режимы нужно контролировать не по рассчитанным значениям активности или концентрации кислорода, а по изменению окислительного потенциала теплоносителя $\Delta G_{\text{тепл}}^0(T)$ или ЭДС датчиков.

2. В зоне с максимальной температурой T_{\max} (в активной зоне реактора) размещение датчиков активности кислорода вряд ли возможно, или ДАК будут иметь малый ресурс работы. Поэтому для оценки окислительного потенциала в зоне T_{\max} датчики активности кислорода необходимо установить в нескольких точках контура с разными температурами (по крайней мере, в трех), а именно:

- непосредственно перед и после зоны с T_{\max} ;
- до и после холодильника (теплообменника, парогенератора);
- до и после насоса (эжектора водорода).

Это позволит

- путем экстраполяции экспериментальных данных $\Delta G_{\text{тепл}}^0(T)$, полученных в области низких температур, с какой-то долей уверенности контролировать на ресурсе окислительный потенциал теплоносителя в зоне максимальных температур;
- контролировать распределение окислительного потенциала по контуру при раскислении теплоносителя, включая объем, куда происходит эжекция.

3. Для получения зависимостей $\Delta G_{\text{тепл}}^0(T)$ и $E_{\text{тепл}}(T)$ и корректной экстраполяции их в область T_{\max} измерения ЭДС следует проводить в стационарных по температуре режимах установки. Получение этих зависимостей путем изменения температур в части циркуляционного контура не вполне обосновано, поскольку при этом изменяются физико-химические процессы в теплоносителе и на стенках контура, что приводит за счет циркуляции к изменению химического состава окислов и их соотношению во всем объеме.

Литература

1. *Таланчук П.М., Шматко Б.М., Заика Л.С., Цветкова О.Е.* Полупроводниковые и твердо-электролитные сенсоры. – Киев: Техника, 1992. – 220 с.
2. *Шматко Б.А., Русанов А.Е.* Оксидная защита материалов в расплавах свинца и висмута. // Физико-химическая механика материалов. – 2000. – Т. 36. – № 1. – С. 49-58.
DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1011307907891>
3. *Шимкевич А.Л., Шматко Б.А.* О физико-химическом подобии жидкометаллических циркуляционных контуров // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1999. – № 3. – С. 69-77.
4. *Блохин В.А., Громов Б.Ф., Шимкевич А.Л.* О влиянии примеси железа на окислительный потенциал сплава свинец-висмут. / В сб.: Теплофизика-93. – Обнинск: ФЭИ, 1995. – С. 40.
5. *Блохин В.А., Ивановский М.Н. и др.* Структура, атомная динамика, термодинамика и примесное состояние расплавов свинца и висмута. / Аналитический обзор ФЭИ-0290. – М.: ЦНИИАтоминформ, 2000. – 77 с.
6. *Шматко Б.А., Русанов А.Е.* Влияние примесей серебра, олова и сурьмы на окислительный потенциал теплоносителя свинец-висмут // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – № 3. – С. 58-67.
7. *Арнольдов М.Н., Соловьев В.А., Комраков Г.С., Шорина Л.М.* Растворимость элементов в жидком свинце. – М.: ИздАТ, 2015. – 192 с.
8. *Шматко Б.А., Русанов А.Е.* Термодинамика фазовых равновесий примесей кислорода и железа в расплавах свинца и висмута. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – № 2. – С. 80-89.
9. *Громов Б.Ф., Шматко Б.А.* Окислительный потенциал расплавов свинца и висмута. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1996. – № 4. – С. 35-44.
10. *Шматко Б.А.* Термодинамика фазовых равновесий примесей кислорода и железа в теплоносителе свинец-висмут. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 1. – С. 34-42.

Поступила в редакцию 21.05.2019 г.

Авторы

Чередниченко Юрий Григорьевич, ведущий инженер-исследователь
E-mail: cheryug@ippe.ru

Левин Олег Эдуардович, начальник лаборатории
E-mail: levin@ippe.ru

ON THE CONTROL OF COOLANT PARAMETERS IN LONG SERVICE LIFE INSTALLATIONS

Cherednichenko Yu.G., Levin O.E.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

Control and maintenance within the preset limits of impurities of oxygen, iron and other elements are vitally needed during reaching by the facilities with heavy coolants and extended time of operation their operational regimes and during their operation. Concentrations of these impurities determine the main mechanism and kinetics of corrosion processes in structural materials. With time, concentrations of elements constituting part of structural materials increase in the coolant. They interact with dissolved oxygen, thus resulting in the formation of oxygen suspensions in the coolant impacting the coolant oxidation potential. Sensors based on solid oxygen-ion electrolytes are conventionally used in order to control oxygen in molten metal coolant. Analysis of methodological aspects of control of oxygen dissolved in non-isothermal circulation loops with metal coolants using such sensors is reported in the present paper. It was demonstrated that in the presence of dissolved loop wall materials and suspensions of their different oxides in the coolant implementation of control on the basis of values of oxygen activities and concentrations calculated for pure coolant is not justifiable in general terms.

Experimental distributions within the loop of oxidation potentials depending on the coolant temperature obtained in the process of long-term testing of wall material samples in molten lead in two circulation test facilities SM2-M and TsU1-M differing from each other by the principal methods applied for maintaining the preset modes as pertains to oxygen impurities are given in the present paper.

Operating mode was maintained in the SM2-M test facility by periodically supplying oxygen to the coolant surface in the pump tank, and that in the TsU1-M test facility was achieved by ejecting hydrogen directly into the loop. Within the low-temperature region the experimental values of oxidation potential in both test facilities were lower than those calculated for pure lead; this results in the difference in the oxygen concentrations calculated for pure coolant by up to two or more times for the loop sections with T_{\min} and T_{\max} . In other words, evident absence of constant oxygen concentration in the loop was observed. Besides the above the paper presents the variation of oxidation potential in the TsU1-M test facility during hydrogen ejection into the coolant in the course of its deoxidation. In this case, the oxidation potential in the loop varies in a complicated way, and raising the level of oxygen concentration does not make any sense at all.

The conclusion is that in long service life facilities oxygen parameters of the coolant must be controlled not by the oxygen activity or concentration values, but by the value of the oxidation potential in the area with maximum temperature. For obtaining the correct values of the oxidation potential, measurements should be carried out in the steady-state temperature conditions for the entire facility.

Key words: control, oxygen, heavy coolant, circulation loop, oxygen-ion electrolyte, oxidation potential.

REFERENCES

1. Talanchuk P.M., Shmatko B.M., Zaika L.S., Tsvetkova O.E. *Semiconductor and Solid-Cell Trolite Sensors*. Kiev. Tekhnika Publ., 1992, 220 p. (in Russian).
2. Shmatko B.A., Rusanov A.E. Oxide Protection of Materials in Melts of Lead and Bismuth. *Fiziko-khimicheskaya Mekhanika Materialov*. 2000, v. 36, no. 1, pp. 49-58. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1011307907891> (in Russian).
3. Shimkevich A.L., Shmatko B.A. On Physicochemical Similarity of Liquid Metal Loops. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 1999, no. 3, pp. 69-77 (in Russian).
4. Blokhin V.A., Gromov B.F., Shimkevich A.L. On the Effect of Iron Impurity on Oxidation Potential of lead-Bismuth Alloy. / *Collection of reports «Teplofizika-93»*. Obninsk. FEI Publ., 1995, p. 40 (in Russian).
5. Blokhin, V.A.; Ivanovsky, M.N., et al. *Structure, Atomic Dynamics, Thermodynamics and Impurity State of Lead and Bismuth Melts*. Analytical review FEI-0290. Moscow. TsNIIatominform Publ., 2000, 77 p. (in Russian).
6. Shmatko B.A., Rusanov A.E. Influence of Impurities of Silver, Tin and Antimony on Oxidation Potential of the Lead-Bismuth Coolant. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2000, no. 3, pp. 58-67 (in Russian).
7. Arnol'dov M.N., Soloviev V.A., Komrakov G.S., Shorina L.M. *Solubility of Elements in Liquid Lead*. Moscow. Izdat Publ., 2015, 192 p. (in Russian).
8. Shmatko B.A., Rusanov A.E. Thermodynamics of the Phase Equilibria of the Oxygen and Iron Admixtures in the Lead and Bismuth Melts. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2002, no. 2, pp. 80-89 (in Russian).
9. Gromov B.F., Shmatko B.A. Oxidative Potential of Lead and Bismuth Melts. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 1996, no. 4 pp. 35-44 (in Russian).
10. Shmatko B.A. Thermodynamics of the Phase Equilibriums of the Oxygen and Iron Admixtures in the Coolant-Body Lead-Bismuth. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2007, no. 1, pp. 34-42 (in Russian).

Authors

Cherednichenko Yury Grigorievich, Leading Engineer-Researcher

E-mail: cheryug@ippe.ru

Levin Oleg Eduardovich, Head of Laboratory

E-mail: levin@ippe.ru