

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАСШИРЕНИЮ МЕТОДИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СВИНЦА

**С.В. Салаев, Р.Ш. Асхадуллин, Иванов К.Д., Легких А.Ю., С.-А.С. Ниязов**  
*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»  
249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1*



Рассмотрены примеры использования метода термоциклирования тяжелых теплоносителей на основе свинца и висмута с одновременным измерением параметра термодинамической активности (ТДА) примеси кислорода. В качестве источников примеси железа в экспериментах использовались конструкционные стали ферритно-мартенситного класса ЭИ852, ЭП823 и аустенитная сталь ЭП302.

В результате экспериментов получены данные о том, что предварительно сформированные в теплоносителе оксиды железа, в том числе и в виде оксидной пленки на конструкционных сталях, в тяжелых теплоносителях не являются инертными фазами, но могут обмениваться с расплавом железом и кислородом. Характер этого обмена зависит как от фактического примесного состояния теплоносителя, так и от внешних условий и прежде всего от температуры.

Выполнен анализ экспериментальных данных, полученных при термоциклировании свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей, в области как относительно высоких значений ТДА кислорода, близких к концентрации насыщения по кислороду, так и достаточно низких значений этого параметра, близких к концентрации насыщения по примеси железа.

Использованный методический прием термоциклирования теплоносителя является информационно значимым, и может быть рекомендован для получения количественных данных по содержанию примеси железа в теплоносителе.

**Ключевые слова:** массоперенос, теплоноситель, свинец, свинец-висмут, конструкционная сталь, оксидная пленка, кислород, железо, термодинамическая активность, массовое содержание примеси, датчик активности кислорода.

## ВВЕДЕНИЕ

Непосредственное поступление компонентов конструкционных сталей в теплоноситель в условиях наличия на поверхности этих сталей защитных пассивацион-

© С.В. Салаев, Р.Ш. Асхадуллин, Иванов К.Д., Легких А.Ю., С.-А.С. Ниязов, 2020

ных покрытий в отличие от процессов жидкометаллической коррозии, где реализуется механизм растворения компонентов стали в теплоносителе, представляет собой сложный многостадийный процесс диффузии и взаимодействия компонентов стали и кислорода. Этот процесс протекает одновременно в самой стали, на внутренней границе оксидной пленки, в объеме, занятом оксидным покрытием, на внешней границе оксидного слоя и теплоносителя и непосредственно в самом теплоносителе. Это комплексный взаимосвязанный процесс [1 – 3], в котором большое значение имеет физико-химическое состояние жидкометаллического расплава. Для его определения ранее широко использовался метод отбора проб и их последующего анализа на содержание кислорода и металлических примесей. Ввиду его относительно низкой чувствительности к растворенному кислороду и недостаточной информативности по основным продуктам взаимодействия теплоносителя с конструкционными сталями от этого метода практически отказались. При этом с учетом важности контроля кислородного режима теплоносителя широкое распространение получили датчики термодинамической активности кислорода. Это существенно более чувствительное средство контроля состояния теплоносителя по примеси кислорода. Однако в отличие от пробоотбора, где определяется массовое содержание данной примеси, связь ТДА кислорода с его массовым содержанием однозначно определена только для рафинированного от остальных примесей теплоносителя. Эта связь табулирована как для свинцового теплоносителя, так и для свинцово-висмутового. На известной  $E$ - $T$ -диаграмме, связывающей показания датчика  $E$  и температуру теплоносителя  $T$ , данная табулированная зависимость представляет собой для каждой концентрации кислорода прямую линию, которая в области низких температур может переходить в другую линию, характеризующую предельную растворимость кислорода и образование соответствующей избыточной твердой фазы оксида теплоносителя. Однако при изменениях физико-химического состояния теплоносителя, связанного с появлением в нем других примесей, в частности, железа как основного компонента сталей, характер температурной зависимости показаний датчиков ТДА кислорода существенно меняется, что является основой использования данного приема для более детального анализа реального состояния теплоносителя.

### **АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КИСЛОРОДА**

В области достаточно низких значений ТДА кислорода (низких парциальных давлений кислорода) проблема идентификации «ожелезненного» теплоносителя не представляет особых трудностей, поскольку в этой области характер изменения ЭДС датчика в зависимости от температуры качественно отличается от «изоконцентрационного» распределения. Как показывает практика, при термодинамических активностях кислорода на уровнях ТДА кислорода  $a \leq 10^{-3}$  сохранение «изоконцентрационной» зависимости показаний датчиков скорее является исключением, чем правилом.

Намного труднее различать эти два состояния в области парциальных давлений кислорода, близких к выделению избыточной твердой фазы оксидов из теплоносителя. В настоящее время принято считать, что в этой области выполняется «изоконцентрационная» зависимость показаний датчика от температуры, и при снижении температуры выделяется фаза  $PbO$  [4, 5]. Другими словами, примесь железа переходит в окисленное состояние и становится инертной по отношению к расплаву свинца и кислороду в нем.

Вместе с тем часто оказывается, что в области  $\sim 400 - 600^\circ\text{C}$  показания датчи-

ков при снижении температуры стабилизируются на уровне  $E \sim 120 - 125$  мВ с последующим небольшим ростом при дальнейшем снижении  $T$ .

Это противоречит термодинамическим расчетам, по которым потенциал системы {Pb}-<PbO> имеет небольшой отрицательный температурный наклон и стабилизируется в рассматриваемом температурном интервале на уровне  $E \sim 110 - 108$  мВ. Эти отклонения могут показаться незначительными, если не знать, что в этой области изменений показаний датчика цена каждого милливольты в массе растворенного кислорода чрезвычайно велика. По существу, речь идет о влиянии примеси железа на растворимость кислорода в свинцовом теплоносителе. Так для чистой системы {Pb}-<PbO> в интервале показаний датчика активности кислорода (ДАК)  $E = 120 - 108$  мВ расплав должен поглощать до 90% массы кислорода от концентрации насыщения (расчет по данным работы [6]).

Наблюдаемые отклонения показаний датчиков на уровне равновесия теплоносителя с оксидной фазой в свое время пытались объяснить различными факторами (влиянием термоэдс, загрязнением датчиков и др.). Однако данные по уровню равновесия в системе «теплоноситель - оксидная фаза» (120 – 125 мВ) носили систематический характер и фиксировались различными датчиками. При этом в системе всегда присутствовала сталь. Между тем, выполненный по результатам более ранних работ анализ наблюдаемых различий в показаниях двух датчиков ТДА кислорода с различными электродами сравнения ({Pb}-<PbO> и {Bi}-<Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>) в одной и той же среде показал устойчивый уровень – 108 мВ, что соответствует термодинамическим расчетам [7].

Показательным в этом плане является также характер изменения ЭДС одного и того же датчика в экспериментах с вращающимся диском, проведенных при испытании образцов стали ЭИ852 в свинцовом и свинцово-висмутовом теплоносителе. В начальный период (после установления вращения образца), характеризовавшийся усилением взаимодействия жидкометаллического расплава с атмосферным кислородом, фиксировалось закономерное снижение показаний датчика – в свинце при 620°C с уровня 124 – 122 мВ до ~ 110 мВ, а в свинце-висмуте при 620°C с уровня ~ 125 мВ до ~ 77 мВ. По мере накопления шлаков на поверхности расплава, что наблюдалось визуально, показания ДАК возросли до  $E \sim 115$  мВ в свинце и до  $E \sim 79$  мВ в свинце-висмуте. Эксперименты проводились в металлических стаканах из стали 0Х18Н10Т, что не исключало выход металлических компонентов непосредственно в теплоноситель. Поэтому эти результаты трактовались как динамический баланс раскислительного и окислительного процессов при постоянном подводе железа из стали и кислорода из атмосферы.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о качественном изменении состояния теплоносителя в присутствии источника железа, причем не только в области «раскисленного» состояния, но и в области значений активности кислорода, близких к единице.

Для подтверждения данного тезиса были выполнены эксперименты по выявлению характера изменения потенциала расплава в состоянии его равновесия с образующейся твердой фазой. Для этого периодически проводилось термоциклирование свинцового расплава в ходе экспозиции в нем образцов из стали ЭП823 при базовой температуре 620°C.

Расплав свинца до погружения стальных образцов предварительно рафинировался на воздухе, а образующиеся шлаки удалялись с поверхности. Поверхность образцов была относительно небольшой (37 см<sup>2</sup>), а в качестве емкости для свинца использовался керамический стакан (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Все это позволяло надеяться на то, что в начале экспозиции образцов расплав не содержал металлических

примесей в заметных количествах.

На рисунке 1 приведено изменение показаний датчика активности кислорода в процессе охлаждения расплава через определенные интервалы времени (кампания со сталью ЭП823). Полученные зависимости показывают, что в начальный период экспозиции стали, как и ожидалось, состояние расплава было близко к рафинированному. Характерно, что при этом уровень ЭДС датчика соответствовал расчетным значениям ( $E \sim 108 - 110$  мВ). В дальнейшем наблюдался постепенный уход с начального уровня, связанный с поступлением в расплав железа. Вследствие малой поверхности контакта теплоносителя со сталью, а также низких диффузионных потоков железа через оксидную пленку, образующуюся на стали ЭП823, процесс изменения потенциала занял довольно много времени ( $\sim 760$  ч). Достигнутый к этому моменту времени уровень показаний датчика при выделении твердой фазы оксидов в процессе охлаждения расплава составил  $E \sim 120 - 124$  мВ.

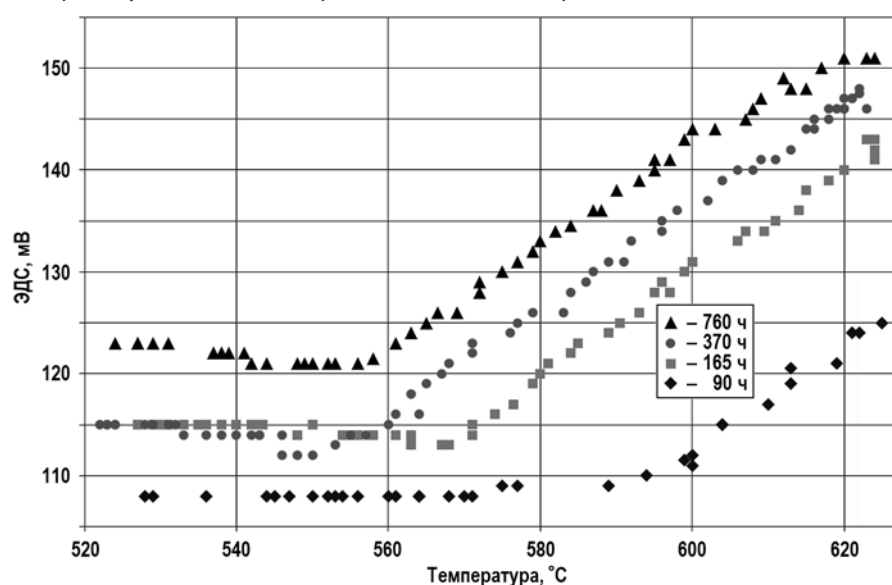


Рис. 1. Зависимость показаний ДАК от температуры при охлаждении расплава в ходе испытаний стали ЭП823

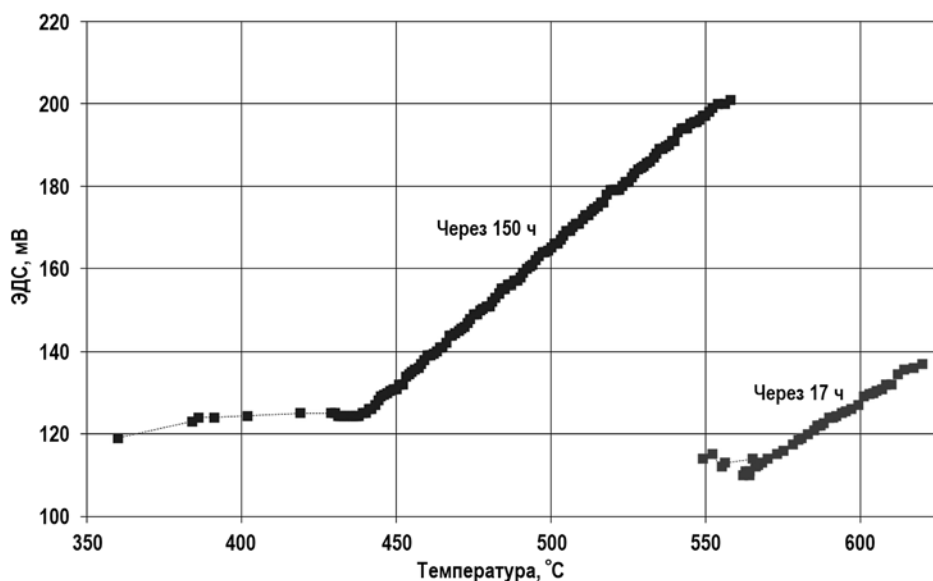


Рис. 2. Зависимость ЭДС ДАК от температуры при охлаждении расплава в ходе испытаний стали ЭП302

Существенно более быстрое «ожелезнение» теплоносителя наблюдалось в экспериментах со сталью ЭП302, при которых поверхность контакта стали с теплоносителем составляла  $189 \text{ см}^2$ , а количество свинца было примерно в два раза меньше (рис. 2). Первое термоциклирование теплоносителя было проведено сразу после завершения пассивационного режима через 17 часов экспозиции стали ЭП302 в свинцовом расплаве. Минимальные значения показаний датчика составили  $E \sim 110 \text{ мВ}$ , но уже в процессе дальнейшего охлаждения возросли до  $\sim 115 - 117 \text{ мВ}$ . Примерно через 150 часов экспозиции выпадение твердой оксидной фазы фиксировалось уже на уровне  $E \approx 120 - 124 \text{ мВ}$ .

Проведенные опыты показывают, что со временем жидкий металл насыщается железом, а образующаяся при охлаждении твердая фаза не является чистым оксидом свинца и, вероятно, представляет собой сложный оксид с тем или иным содержанием железа. Логично предположить, что влияние примеси железа в той или иной степени должно проявляться и в области промежуточных активностей кислорода в теплоносителе (относительно далеких от линии равновесия  $\langle \text{Fe} \rangle - \langle \text{Fe}_3\text{O}_4 \rangle$  и от линии равновесия  $\{\text{Pb}\} - \langle \text{PbO} \rangle$ ) и тем более в области активностей, непосредственно примыкающих к линии  $\langle \text{Fe} \rangle - \langle \text{Fe}_3\text{O}_4 \rangle$ .

Для анализа этого влияния более удобно использовать координаты, где по оси ординат рассматриваются значения  $\lg p_{\text{O}_2}$ , а по оси абсцисс –  $1/T$ . Значения парциального давления молекулярного кислорода, равновесного с кислородом, растворенным в расплаве, в зависимости от показаний датчика и температуры рассчитываются по формуле

$$\lg (p_{\text{O}_2}^{\text{расплав}}, \text{ атм}) = -20609/T + 10,188 - F \cdot N_e \cdot E / (19,147 \cdot T),$$

где  $-20609/T + 10,188$  – логарифм парциального давления молекулярного кислорода ( $\lg p_{\text{O}_2}$ ) в электроде сравнения  $\text{Vi}-\text{Vi}_2\text{O}_3$ ;  $F = 96,485$  – число Фарадея, Кл/моль;  $N_e = 4$  – число электронов, участвующих в переносе;  $E$  – показания ДАК, мВ;  $T$  – температура, К.

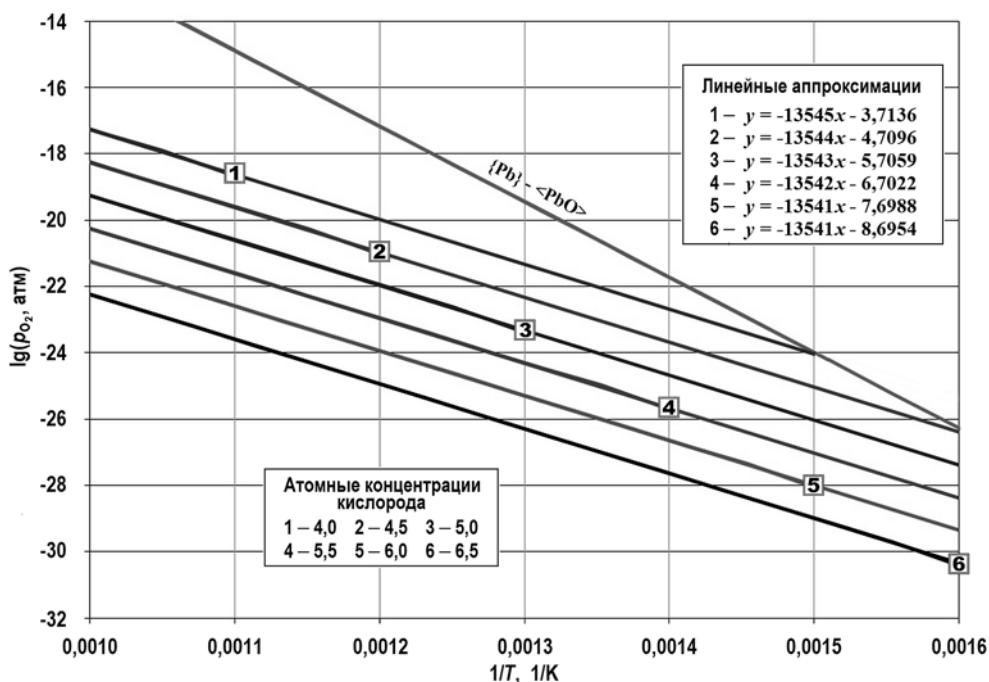


Рис. 3. Расчетные зависимости постоянной концентрации кислорода от температуры для чистой системы  $\{\text{Pb}\} - \langle \text{PbO} \rangle$

На рисунке 3 представлены расчетные зависимости постоянной концентрации кислорода от температуры для чистой системы {Pb}-<PbO> при постоянном содержании кислорода в расплаве (от  $10^{-4}$  до  $10^{-6,5}$  атомных долей). Из представленных на графике аппроксимационных зависимостей видно, что они в координатах ( $\lg p_{O_2}$ ,  $1/T$ ), в отличие от координат ( $E$ ,  $T$ ), имеют практически постоянный температурный наклон (от  $-13541$  до  $-13545$ ), что и определяет удобство их использования.

Экспериментально наблюдаемые отклонения от указанного для чистой системы температурного наклона должны характеризовать меру влияния железа на окислительный потенциал свинцового расплава. Имеющееся в теплоносителе или вновь поступающее из источника железо потребляет часть имеющегося в расплаве кислорода. Вследствие этого температурный наклон в такой системе должен возрастать. Если в системе протекает диссоциация или преобразование каких-либо оксидов с выделением свободного кислорода в расплав, то температурный коэффициент должен уменьшаться по абсолютной величине.

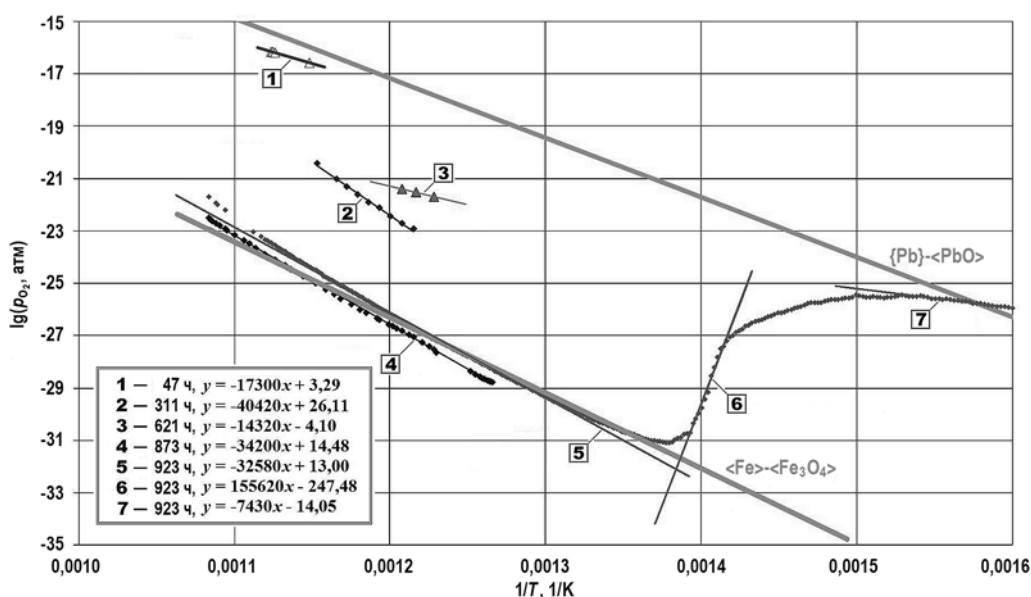


Рис. 4. Зависимость парциального давления кислорода от температуры при охлаждении расплава в ходе испытаний стали ЭП302

На рисунке 4 представлены результаты измерения кислородного потенциала системы при охлаждении теплоносителя, полученные в ходе кампании со сталью ЭП302. Наблюдения за изменением кислородного потенциала расплава проводились только в переходных режимах изменения температуры на более низкую, в том числе в конце кампании при завершении экспериментов. Весьма любопытны результаты завершающего охлаждения расплава (923 часа от начала кампании). На графике видно, что с началом охлаждения зависимость парциального давления от температуры сначала приближается к линии равновесия <Fe>-<Fe<sub>3</sub>O<sub>4\sim 450^\circ\text{C} начинается процесс резкого выделения кислорода в теплоноситель с соответствующим ростом  $p_{O_2}$ . Процесс выделения кислорода с меньшим темпом продолжается вплоть до замораживания расплава.</sub>

Полученные результаты подтверждают, что в соответствующих условиях оксиды железа, находящиеся в тяжелых свинецсодержащих теплоносителях, могут диссоциировать. По-видимому, это происходит вследствие недостатка железа в тепло-

носителе, необходимого для дальнейшего формирования оксида. Распад оксидов железа по этому механизму сопровождается выделением кислорода в соответствии со стехиометрией данного оксида.

Таким образом, предварительно сформированные в теплоносителе оксиды железа, в том числе и в виде оксидной пленки на конструкционных сталях, в тяжелых теплоносителях не являются инертными фазами, но могут обмениваться с расплавом железом и кислородом. Характер этого обмена зависит как от фактического примесного состояния теплоносителя, так и от внешних условий и прежде всего от температуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены примеры использования приема термоциклирования тяжелых теплоносителей на основе свинца и висмута для получения дополнительной информации об их фактическом физико-химическом состоянии по результатам анализа поведения термодинамической активности кислорода.

Показано, что данный прием является информационно значимым и может быть рекомендован для использования в дальнейших исследованиях, в том числе для получения количественных данных по содержанию примеси железа в теплоносителе.

## Литература

1. Громов Б. Ф., Шматко Б. А. Окислительный потенциал расплавов свинца и висмута // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. – № 6. – С. 14-18.
2. Martinelli L., Balbaud-Célérier F. Modelling of the Oxide Scale Formation on Fe-Cr Steel During Exposure in Liquid Lead-bismuth Eutectic in the 450 – 600 °C Temperature Range. // Materials and Corrosion. – 2011. – Vol. 62. – PP. 531-542. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.201005871>
3. Mulier G. Status on Liquid Metal Corrosion, Mechanical Properties and Corrosion Protection Research at FZK and in Collaboration with Partners. / Сб. тез. докл. конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2008)». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2008. – С. 20.
4. Чернов М. Е., Мартынов П. Н., Гулевский В. А. Разработка электрохимического датчика кислорода капсульного типа для контроля и управления состоянием тяжелого теплоносителя. / Сб. тез. докл. конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2003)». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2003. – С. 85. Электронный ресурс: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-005-0215-5> (дата доступа 17.08.2019).
5. Асхадуллин Р. Ш., Мартынов П. Н., Сысоев Ю. М. Регулирование термодинамической активности кислорода в свинцовом и свинцово-висмутовом теплоносителях методом растворения оксидов. / Сб. тез. докл. конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2003)». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2003. – С. 82. Электронный ресурс: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84987935099&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Oxygen+Thermodynamic+Activity+Control+in+Lead+and+Lead-Bismuth+Coolants+by+the+Oxides+Dissolution+Method&st2=&sid=b5ca775998d0f7ed3989ec71bcd00eb5&sot=b&sdt=b&sl=119&s=TITLE-ABS-KEY%28Oxygen+Thermodynamic+Activity+Control+in+Lead+and+Lead-Bismuth+Coolants+by+the+Oxides+Dissolution+Method%29&relpos=0&citeCnt=4&searchTerm=> (дата доступа 17.08.2019)
6. Иванов К. Д., Лаврова О. В., Салаев С. В. Использование разработанной методики оценки диффузионного выхода металлических компонентов из сталей для изучения коррозионной стойкости этих сталей в тяжелых теплоносителях. / Сб. тез. докл. конф. «Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2005. – С. 117.
7. Иванов К. Д., Лаврова О. В., Мартынов П. Н. Термодинамика системы Pb-O и растворимость кислорода в расплаве свинца / Доклад на отраслевом научно-техническом семина-

ре «Проблемы технологии и теплогидравлики жидкометаллических теплоносителей» – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2002.

Поступила в редакцию 21.08.2019 г.

#### Авторы

Салаев Сергей Валентинович, главный специалист

E-mail: info@progyv2020.ru

Асхадуллин Радомир Шамильевич, заместитель директора ОФХТ, канд. техн. наук

E-mail: raskhadullin@ippe.ru

Иванов Константин Дмитриевич, ведущий научный сотрудник, д-р техн. наук

E-mail: ivanovkd100@yandex.ru

Легких Александр Юрьевич, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: alegkikh@ippe.ru

Ниязов Саид-Али Сабирович, научный сотрудник

E-mail: sniyazov@ippe.ru

UDC 621.039.534

## THE RESULTS OF STUDIES ON THE EXTENSION OF METHODOLOGICAL CAPABILITIES OF DETERMINING PHYSICO-CHEMICAL CONDITIONS OF LEAD-BASED LIQUID-METAL COOLANTS

Salaev S.V., Askhadullin R.Sh, Ivanov K.D., Legkikh A.Yu., Niyazov S.-A.S.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

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

#### ABSTRACT

With regard to the problem of expanding the methodological capabilities of determining the physicochemical state of heavy heat lead/bismuth-based coolants, the authors consider the application of the thermal cycling method for these coolants with simultaneous measurement of the thermodynamic activity parameter of oxygen impurities. In these experiments, structural EI852 and EP823 ferritic-martensitic steels as well as EP302 austenitic steel were used as sources of iron impurities.

As a result of the experiments, it was found that iron oxides previously formed in the coolant, as such or in the form of an oxide film on the structural steels, are not inert phases in heavy coolants, but can exchange iron and oxygen with the melt. The nature of this exchange depends both on the actual coolant impurity state and on external conditions, first of all, on temperature.

The experimental data obtained by thermal cycling of lead and lead-bismuth coolants were analyzed both in the region of relatively high oxygen TDA values close to the oxygen saturation concentration and in the region of sufficiently low values of this parameter close to the saturation concentration of iron impurities.

It is concluded that the proposed coolant thermal cycling method is informationally significant and can be recommended for further use, for example, to obtain quantitative data on the content of iron impurities in the coolant.



**Key words:** mass transfer, coolant, lead, lead-bismuth, structural steel, oxide film, oxygen, iron, thermodynamic activity, mass content of impurity, oxygen activity sensor.

#### REFERENCES

1. Gromov B.F., Shmatko B.A. Oxidation Potential of Lead and Bismuth Melts. *Izvesiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 1997, no. 6, pp. 14-18 (in Russian).
2. Martinelli L., Balbaud-Cel erier F. Modelling of the Oxide Scale Formation on Fe-Cr Steel During Exposure in Liquid Lead-bismuth Eutectic in the 450 – 600°C Temperature Range. *Materials and Corrosion*. 2011, v. 62, pp. 531-542. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.201005871>
3. Mulier G. Status on Liquid Metal Corrosion, Mechanical Properties and Corrosion Protection Research at FZK and in Collaboration with Partners. *Proc. of the Conference «Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies (HLMC-2008)»*. Obninsk. SSC RF-IPPE Publ., 2008, p. 20.
4. Chernov M.E., Martynov P.N., Gulevsky V.A. Development of Electrochemical Oxygen Sensor of the Capsular Type for Monitoring and Control of the Heavy Coolant State. *Proc. of the Conference «Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies (HLMC-2003)»*. Obninsk. SSC RF-IPPE Publ., 2003, p. 85 (in Russian). Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-005-0215-5> (accessed Aug 17, 2019).
5. Askhadullin R.Sh., Martynov P.N., Sysoev Yu.M. Oxygen Thermodynamic Activity Control in Lead and Lead-Bismuth Coolants by the Oxides Dissolution Method. *Proc. of the Conference «Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies (HLMC-2003)»*. Obninsk. SSC RF-IPPE Publ., 2003, p. 82. (in Russian). Available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84987935099&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Oxygen+Thermodynamic+Activity+Control+in+Lead+and+Lead-Bismuth+Coolants+by+the+Oxides+Dissolution+Method&st2=&sid=b5ca775998d0f7ed3989ec71bcd00eb5&sot=b&sdt=b&sl=119&s=TITLE-ABS-KEY%28Oxygen+Thermodynamic+Activity+Control+in+Lead+and+Lead-Bismuth+Coolants+by+the+Oxides+Dissolution+Method%29&relpos=0&citeCnt=4&searchTerm=> (accessed Aug 17, 2019).
6. Ivanov K.D., Lavrova O.V., Salayev S.V. The Use of the Developed Technique for Estimation of Metal Components Diffusion Yield from Steels to Study Corrosion Resistance of These Steels in Heavy Coolants. *Proc. of the Conference «Thermo-Hydraulic Safety Aspects of NPP's with Fast Reactors»*. Obninsk. SSC RF-IPPE Publ., 2005, p. 117 (in Russian).
7. Ivanov K.D., Lavrova O.V., Martynov P.N. Thermodynamics of Pb-O System and Solubility of Oxygen in Lead Melt. *Proc. of the Conference «Problems of Technology and Thermal Hydraulics of Liquid-Metal Heat Carriers»*. – Obninsk. SSC RF-IPPE Publ., 2002 (in Russian).

#### Authors

Salaev Sergey Valentinovich, General Specialist

E-mail: [info@proryv2020.ru](mailto:info@proryv2020.ru)

Askhadullin Radomir Shamil'evich, Deputy Director, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [raskhadullin@ippe.ru](mailto:raskhadullin@ippe.ru).

Ivanov Konstantin Dmitrievich, Leading Researcher, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [ivanovkd100@yandex.ru](mailto:ivanovkd100@yandex.ru).

Legkikh Alexandr Yur'evich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [alegkikh@ippe.ru](mailto:alegkikh@ippe.ru)

Niyazov Said-Ali Sabirovich, Researcher

E-mail: [sniyazov@ippe.ru](mailto:sniyazov@ippe.ru).