

ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПОВЕРКИ ДАТЧИКОВ АКТИВНОСТИ КИСЛОРОДА В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯХ

П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин, А.Н. Стороженко, М.Е. Чернов, В.В. Ульянов, В.М. Шелеметьев, Р.П. Садовничий, П.В. Кузин
ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



В настоящее время в ряде ядерных реакторов используются жидкометаллические теплоносители, в том числе свинцовосодержащие металлические расплавы. Важнейшее влияние на качество теплоносителя оказывают содержащиеся в нем примеси, в первую очередь, кислород. Знание истинных значений термодинамической активности (ТДА) кислорода в разных частях контура позволяет принимать меры к поддержанию этой величины в необходимом диапазоне с целью недопущения шлакообразования и выкристаллизации оксидных фаз в «холодных» частях контура и сохранения защитных оксидных покрытий на внутренних поверхностях конструкционных материалов на «горячих» участках. Для этих целей была создана, испытана и внесена в госреестр поверочная установка УП ДАК, воспроизводящая различные режимы активности кислорода в жидкометаллических свинцовосодержащих расплавах. Также в ГНЦ РФ-ФЭИ был разработан анализатор активности кислорода в расплавах свинца и свинца-висмута ААК-1. Анализатор предназначен для непрерывного дистанционного измерения термодинамической активности кислорода в свинцовосодержащем расплаве. На УП ДАК в 2011 г. были проведены успешные испытания анализаторов ААК-1.

Ключевые слова: ядерная энергетическая установка (ЯЭУ), установка поверочная для датчиков активности кислорода (УП ДАК), термодинамическая активность кислорода (ТДА), анализатор активности кислорода (ААК-1), номинальная статическая характеристика (НСХ).

Key words: nuclear power plant (NPP), oxygen activity sensor calibration rig (OASCR), thermodynamic activity of oxygen (TDA), oxygen activity analyzer (OAA-1), nominal static characteristic (NSC).

Общепризнанно, что содержание примеси растворенного кислорода в тяжелых теплоносителях определяет надежность эксплуатации циркуляционных контуров как с точки зрения коррозии конструкционных сталей, так и отложений на их поверхностях.

© П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин, А.Н. Стороженко, М.Е. Чернов, В.В. Ульянов, В.М. Шелеметьев, Р.П. Садовничий, П.В. Кузин, 2012

В начальный период освоения свинцово-висмутового теплоносителя для контроля содержания в нем примеси кислорода использовался метод отбора проб на вынос с их последующим анализом методом водородного восстановления. В последующем разрабатывались и использовались более оперативные методы контроля, основанные на применении электрохимических датчиков с твердым кислородопроводящим электролитом [1–2]. Разработанные датчики позволяют проводить измерения термодинамической активности (ТДА) кислорода в ходе НИР. Кроме этого были разработаны и внедрены на реальные объекты датчики ТДА кислорода для транспортных ядерных энергетических установок (ЯЭУ), где в качестве теплоносителя использовался расплав свинец-висмут [3]. Однако при использовании датчиков активности кислорода возникла необходимость разработки соответствующей методики их поверки, а также установки, которая воспроизводила бы все необходимые режимы состояния теплоносителя.

В данной работе изложены следующие результаты:

- создание установки для поверки датчиков активности кислорода;
- разработка системы поверки датчиков активности кислорода;
- создание измерительного блока с возможностью одновременного контроля нескольких параметров работы датчика (ЭДС (мВ), температуры сплава T (°C), пересчет ЭДС в активность кислорода (a), возможность замера внутреннего сопротивления датчика как одного из наиболее важных параметров диагностики его работоспособности).

СОЗДАНИЕ УСТАНОВКИ ПОВЕРОЧНОЙ ДАТЧИКОВ АКТИВНОСТИ КИСЛОРОДА (УП ДАК)

Основное предназначение УП ДАК – воспроизведение состояния свинцовосодержащего расплава металла с заданным значением термодинамической активности кислорода a и возможность использования ее для поверки датчиков и измерителей ТДА кислорода.

Воспроизведение значений ТДА кислорода осуществляется путем использования контролируемых рабочих сред. Параметры контролируемой рабочей среды, такие как температура и ТДА кислорода расплава металла, устанавливаются режимами работы УП ДАК и контролируются показаниями измерительной термопары и датчика ТДА кислорода.

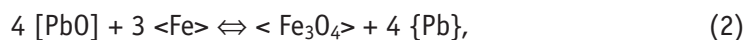
Для поверки датчика используются два типа буферных сред. Эти буферные среды создаются в результате выполнения специальных химических реакций в реакционной емкости УП ДАК и воспроизводят состояния расплава металла с заданными значениями ТДА кислорода в функции $a(T)$ в зависимости от температуры T расплава.

Рассмотрим способы получения состояния расплава с заданным уровнем ТДА кислорода. Состояние расплава металла со значением $a(T) = 1$ воспроизводится буферной средой, получаемой при равновесном массообмене жидкого свинца с твердой фазой оксида свинца. Состояние расплава с $a(T) \approx 10^{-6}$ воспроизводится путем создания буферной среды, получаемой при взаимодействии расплава, предварительно очищенного водородом и аргоном, с химически чистым железом.

Для получения состояния расплава свинца с заданным уровнем ТДА кислорода в УП ДАК используются химические реакции типа [4–5]



и



где вид скобок обозначает физико-химическое состояние вещества: $\langle \rangle$ – твердое, $[\]$ – растворенное, $\{ \}$ – жидкое.

При насыщении расплава металла растворенным PbO и при достижении термодинамического равновесия обратимых процессов, происходящих в расплаве по реакции типа (1), в жидком металле устанавливается значение ТДА кислорода равным единице. Концентрация насыщения $[PbO]$ в пересчете на концентрацию кислорода описывается уравнениями

$$\lg C_S = 3,2 - \frac{5400}{T} \quad \text{для свинца} \quad (3)$$

и

$$\lg C_S = 1,2 - \frac{3400}{T} \quad \text{для сплава свинец-висмут,} \quad (4)$$

где C_S – концентрация насыщения, % масс.; T – температура, К. Исходя из (3) или (4) рассчитывается минимально необходимое количество твердой фазы $[PbO]$.

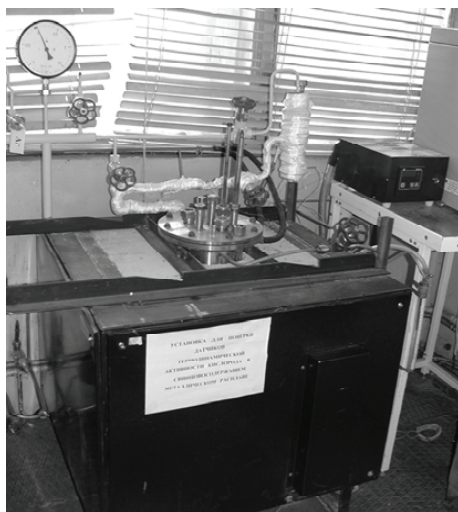
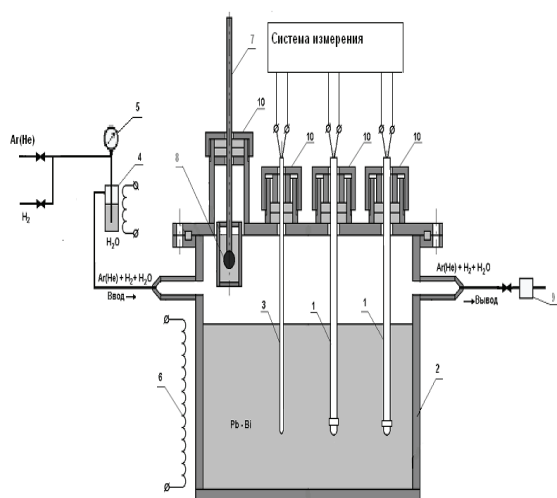


Рис. 1. Установка поверочная датчиков активности кислорода: 1 – датчики (до 5 шт.); 2 – герметичная емкость с расплавом; 3 – термопара; 4 – увлажнитель; 5 – манометр; 6 – нагреватель; 7 – штук; 8 – устройство регулирования термодинамической активности кислорода; 9 – гидрозатвор; 10 – устройства герметизации штоков

При протекании реакции (2) расплав «раскисляется», а ТДА кислорода уменьшается до значений, равновесных с Fe_3O_4 . Равновесное состояние реакции (2) зависит от температуры, поэтому $a = a_{Fe_3O_4}$ есть также функция температуры. Минимально необходимое количество твердой фазы $<Fe>$ для обеспечения состояния равновесия рассчитывается исходя из формулы

$$\lg C_{Fe} = 0,34 - \frac{3450}{T}, \quad (5)$$

где C_{Fe} – концентрация насыщения Fe, % масс.; T – температура, К.

Для проведения химических реакций по типу (1) или (2) используются следующие химические реактивы:

- оксид свинца PbO (твердая фаза) – для создания состояния расплава с максимальной ТДА кислорода, т.е. $a=1$;
- железо и оксид железа Fe и Fe_3O_4 (твердая фаза) – для создания состояния расплава с ТДА кислорода, равной $a_{Fe_3O_4}$.

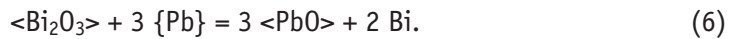
Разработанная установка (рис. 1) способна воспроизводить кислородные режимы, описанные уравнениями (1) и (2).

СИСТЕМА ПОВЕРКИ ДАТЧИКОВ АКТИВНОСТИ КИСЛОРОДА

В предыдущем разделе указывалось, что для поверки датчиков активности кислорода используются два типа состояния теплоносителя, реализуемые на установке УП ДАК: $a(T) = 1$ и $a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \approx 10^{-6}$. Для измерения ТДА кислорода свинцовосодержащего металлического расплава УП ДАК с помощью датчика использована шкала зависимости ЭДС (E) датчика, температуры расплава (T), концентрации (c) и активности (a) кислорода соответственно в диапазонах, реализуемых на установке УП ДАК. Данная шкала установлена на основании электрохимического уравнения Нернста (инструментальное определение).

Принцип построения шкалы ТДА кислорода в свинцовосодержащем расплаве металла основан на свойствах электрохимической ячейки с электродом сравнения $\text{Bi-Bi}_2\text{O}_3$.

В качестве потенциалообразующей электрохимической реакции рассматривается реакция типа



Реакция (1) протекает посредством обмена ионами кислорода, проникающими через твердый керамический электролит. Разность потенциалов, формируемая электрохимической ячейкой, равна

$$E = -\frac{\Delta G_T}{nF}, \quad (7)$$

где ΔG_T – изменение полного потенциала Гиббса (окислительный потенциал); $n = 6$ – число электронов, участвующих в реакции (6); $F = 96485$ Кл/моль – число Фарадея.

Изменение полного потенциала Гиббса реакции (6) описывается уравнением

$$\Delta G_T = \Delta G_T^0 + RT \ln \frac{a_{\text{Pb}}^3}{a_{\text{Bi}_2\text{O}_3}}, \quad (8)$$

где ΔG_T^0 – изменение стандартного потенциала Гиббса для реакции (6); $R = 8,314$ – универсальная газовая постоянная, Дж·К⁻¹·моль⁻¹; T – температура, К; a_{PbO} – ТДА кислорода в свинце; $a_{\text{Bi}_2\text{O}_3}$ – ТДА кислорода в электроде сравнения $\text{Bi-Bi}_2\text{O}_3$.

Поскольку в Bi присутствуют конденсированные фазы Bi_2O_3 , $a_{\text{Bi}_2\text{O}_3} = 1$.

$$\Delta G_T^0 = 3\Delta G_{T\text{PbO}}^0 - \Delta G_{T\text{Bi}_2\text{O}_3}^0, \quad (9)$$

где $\Delta G_{T\text{PbO}}^0$ – стандартный термодинамический потенциал PbO ; $\Delta G_{T\text{Bi}_2\text{O}_3}^0$ – стандартный термодинамический потенциал Bi_2O_3 .

Таким образом, натуральный логарифм ТДА кислорода определяется как

$$\ln a = \frac{\Delta G_{T\text{Bi}_2\text{O}_3}^0 - 3\Delta G_{T\text{PbO}}^0 - 6EF}{3RT}. \quad (10)$$

Значения стандартных термодинамических потенциалов и их погрешностей:

$$\Delta G_{T\text{PbO}}^0 = -215280 + 95,36T \text{ с погрешностью } \pm 190 \text{ Дж/г-ат.О}_2;$$

$$\Delta G_{T\text{Bi}_2\text{O}_3}^0 = -189970 + 92,45T \text{ с погрешностью } \pm 250 \text{ Дж/г-ат.О}_2.$$

Значения ТДА кислорода в контролируемой рабочей среде определяется измеренными значениями ЭДС датчика и температурой в соответствии со следующими формулами:

$$\lg a = \frac{(0,131 - E - 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot T)}{9,915 \cdot 10^{-5} \cdot T} \text{ для свинца} \quad (11)$$

и

$$\lg a = \frac{(0,088 - E - 1,78 \cdot 10^{-5} \cdot T)}{9,917 \cdot 10^{-5} \cdot T} \text{ для сплава свинец-висмут} \quad (12)$$

где a – термодинамическая активность кислорода; T – измеренное значение температуры расплава, К; E – измеренная величина ЭДС датчика ТДА кислорода, В. На основании этих уравнений и зависимости

$$a = \frac{C}{C_s}$$

строятся диаграммы $E-C_0-a-t$ для свинца и свинца-висмута (рис. 2), где C – текущая концентрация кислорода в расплаве, C_s – концентрация насыщения кислорода.

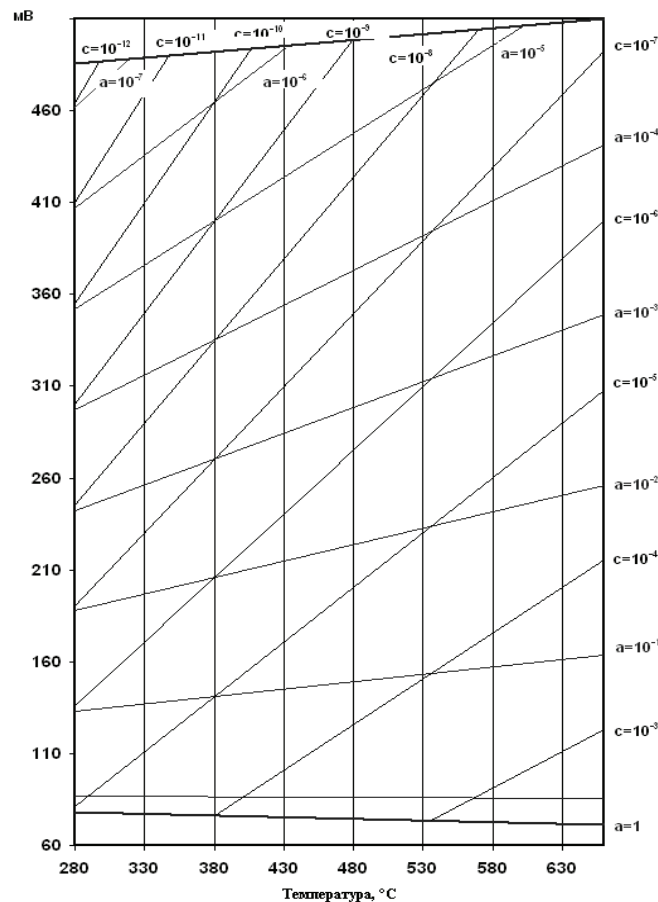


Рис. 2. НСХ – номинальная статическая характеристика датчика активности кислорода на примере расплава свинец-висмут

Температурная зависимость ЭДС датчика на уровне максимальной активности кислорода в расплаве ($a = 1$) определяется как

$$E = 0,131 - 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot T \text{ для расплава Pb,} \quad (13)$$

$$E = 0,088 - 1,78 \cdot 10^{-5} \cdot T \text{ для расплава Pb-Bi,} \quad (14)$$

где E – показания датчика, В; T – температура расплава, К. Значения ЭДС в температурном диапазоне 350–600°C с шагом 50°C (для расплава Pb-Bi) сведены в табл. 1.

Значения ЭДС датчика на уровне активности кислорода в расплаве, соответствующей активности кислорода в Fe_3O_4 , определяются как

Таблица 1

$T, ^\circ\text{C}$	350	400	450	500	550	600
$E, \text{мВ}$	77	76	75	74	73	72

$$E = 0,45 + 0,64 \cdot 10^{-4} \cdot T, \quad (15)$$

где E – показания датчика, В; T – температура расплава, К. Значения ЭДС на уровне Fe_3O_4 в температурном диапазоне 350–600°C с шагом 50°C сведены в табл. 2.

Таблица 2

$T, ^\circ\text{C}$	350	400	450	500	550	600
$E, \text{В}$	490	493	496	499	502	505

Предел относительного отклонения показаний датчика от теоретических значений (НСХ) определяется формулами при $a = 1$

$$\delta = \frac{0.131 - 1.5 \cdot 10^{-5} T - E}{E} \text{ для расплава свинца,} \quad (16)$$

$$\delta = \frac{0.088 - 1.78 \cdot 10^{-5} T - E}{E} \text{ для расплава свинец-висмут;} \quad (17)$$

при $a = a_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$

$$\delta = \frac{0.45 + 0.64 T - E}{E} \quad (18)$$

для сплава свинец-висмут и для расплава чистого свинца,

где E – показания датчика, В; T – температура расплава, К в воспроизводимых точках шкалы ТДА кислорода

Датчик считается прошедшим испытания, если δ не превышает 10% во всем диапазоне температур (350–600°C), при $a = 1$ и $a = a_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$.

На сегодняшний день все изготавливаемые датчики активности кислорода проходят испытания по вышеописанной методике на разработанной УП ДАК и используются в десятках экспериментов в установках как баковой компоновки, так и в циркуляционных стендах в различных подразделениях ГНЦ РФ-ФЭИ, а также в других организациях: ФГУП НИКИЭТ (г. Москва), ЦНИИКМ «Прометей» (г. С.-Петербург), стенд CIRCE (Италия).

С целью оперативной обработки сигнала, поступающего с датчика в процессе работы, в 2011 г. в ФЭИ был разработан измерительный блок, который в составе с датчиком активности кислорода был сертифицирован как анализатор активности кислорода ААК-1 (рис. 3).

Измерительный блок (ИБ) не только снимает сигнал с датчика и выводит его на дисплей, но и преобразовывает ЭДС сигнала датчика в активность, имеет выход под термопару, что позволяет контролировать температуру в месте установки датчика (сплава), производить замер внутреннего сопротивления датчика как одного из параметров, характеризующих его работоспособность. Также ИБ анализатора позволяет производить выбор контролируемой среды (свинец, свинец – висмут). На индикаторе анализатора отображаются по выбору пользователя контролируемые параметры среды (ЭДС (E), активность, температура).

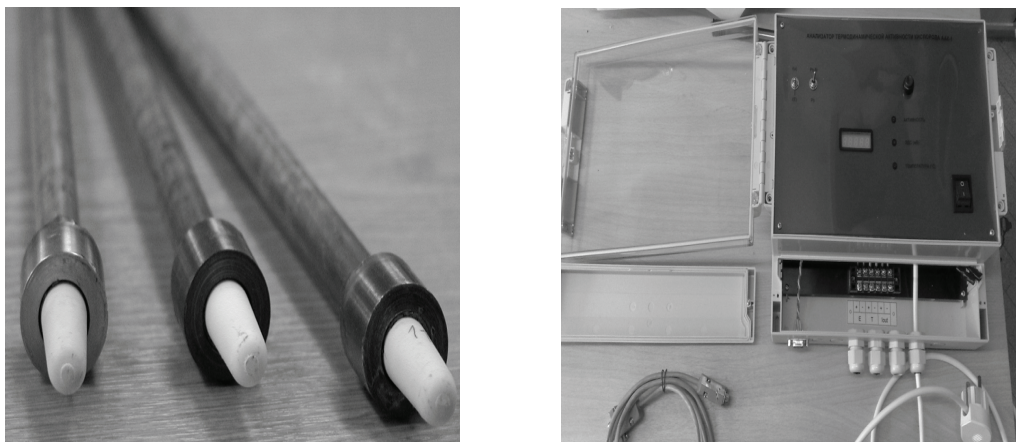


Рис. 3. Первичный преобразователь ААК-1 – датчик активности кислорода (слева), измерительный блок ААК-1 (справа)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и создана, а также зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений установка для проведения метрологических испытаний датчиков активности кислорода.

Разработана система поверки датчиков активности кислорода, по которой на сегодняшний день проходят испытания все датчики кислорода, изготавливаемые в ГНЦ РФ-ФЗИ.

Разработан, изготовлен и прошел испытания анализатор активности кислорода ААК-1, состоящий из датчика активности кислорода и измерительного блока. Анализатор позволяет оперативно и непрерывно контролировать параметры рабочей среды, а также производить диагностику датчика в процессе его эксплуатации.

Исследования проводятся при поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК №16.526.12.6008).

Литература

1. Громов Б.Ф., Шматко Б.А. Окислительный потенциал расплавов свинец-висмут//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. – №6. – С.14.
2. Мартынов П.Н., Чернов М.Е., Гулевский В.А., Проворов А.А. Разработка электрохимического датчика капсульного типа для контроля кислорода в тяжелых теплоносителях//Атомная энергия. – 2005. – Т.98. – Вып. 5. – С. 360.
3. Мартынов П.Н., Чернов М.Е. и др. Системы контроля кислорода и водорода в газовых контурах и контейнментах АЭС//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №4. – С. 27.
4. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. – М.: Атомиздат, 1970.
5. Чернов М.Е. Автореферат диссертации: Датчик капсульного типа для контроля кислорода в контурах ЯЭУ с теплоносителями свинец и свинец-висмут. – Обнинск, 2005.

Поступила в редакцию 17.04.2012

(Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 9 titles.

Dynamic processes in thermal insulation of power plants pipelines caused by depressurization are the goal of the research. Simulation of various leaks was realized by using adapted computer code «KUPOL-M» developed in SSC RF IPPE.

УДК 621.039.7

Assessment and prognosis of radioecological impact of the radioactive wastes storage sites of the «North-West Territorial District» Leningrad branch of FGUP «RosRAO» \I.I. Kryshev, A.Y. Pahomov, S.N. Brykin, V.G. Boulgakov, T.G. Sazykina, I.A. Pahomova, I.S. Serebryakov, N.S. Roznova, A.I. Kryshev, I.Y. Gaziev, K.V. Lunyova, M.A. Dmitrieva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 7 tables, 2 illustrations. – References, 11 titles.

Analysis of radioecological situation was performed for the territories located near the radioactive waste storage sites of the «North-West Territorial District» Leningrad branch of FGUP «RosRAO». The planned annual dose from the regular releases is estimated to be $1,1 \cdot 10^{-4}$ mSv/year, which is two orders of magnitude lower than the level of negligible radiation risk. At present, annual doses are considerably lower than the permissible dose limits; they do not exceed 1-2% of the natural radiation background. Hypothetical scenario of radiation accident was developed; it was shown the absence of territories where obligatory measures of radiation protection of population should be applied in the case of such scenario. Outside the working areas dose rates to biota do not exceed the natural background levels.

УДК 621.039.003

Assessment of Russia Nuclear Power Development Model Sensitivity Analysis to Possible Changes of Selected Economic Parameters \A.F. Egorov, V.V. Korobeynikov, E.V. Poplavskaya, G.A. Fesenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 5 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.

Different variants of Russia nuclear power development scenarios are compared. The major technical and economic indicators are taken into account. In scenarios at price change for separate components of the system balance between thermal and fast reactors is changing, quantity of plutonium, quantity of demanded natural uranium, spent fuel volumes and a radioactive waste are estimated.

УДК 621.039.534

Iron Oxide Reference Electrodes in Solid Electrolyte Sensors Designed to Control the Thermodynamic Activity of Oxygen \P.N. Martynov, R.Sh. Askhadullin, K.D. Ivanov, M.E. Chernov, V.V. Ylyanov, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, R.Yu. Cheporov, S.-A.S. Niyazov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 5 titles.

The paper presents results on the use of iron oxide reference electrode in the oxygen activity sensors used to measure the oxygen activity in heavy liquid metal coolants. The specific features of the operation of the sensor with iron oxide reference electrode are established and comparative characteristics with respect to other applicable reference electrodes are presented. Conclusions on the reasonability of its use for measurement of oxygen activity in liquid metal media are drawn.

УДК 621.039.534

Peculiarities of Metrological Calibration of Oxygen Activity Sensors in Liquid Metal Coolants \P.N. Martynov, R.Sh. Askhadullin, A.N. Storozhenko, M.E. Chernov, V.V. Ylyanov, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, P.V. Kuzin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 5 titles.

The liquid metal coolants including lead containing metallic melts are used in a number of nuclear reactors at present. The impurities being contained in the coolant, primarily oxygen impurity, exert an important effect on its quality. Knowledge of the true values of the thermodynamic activity (TDA) of oxygen in different parts of the circuit enables this quantity to be held in a proper range. This is necessary to prevent slag formation and oxide phase crystallization in the "cold" parts of the circuit and preserve the protective oxide coating on the inner surfaces of structural materials in the "hot" sites. To do this, the OASCR calibration rig capable of reproducing the different modes of oxygen activity in liquid lead is constructed and tested. The OASCR calibration rig is entered in the State List. In SSC RF IPPE the OAA-1 analyzer is developed as well, to measure the oxygen activity in liquid lead and lead-bismuth. The analyzer makes it possible to take continuous remote measurements of the thermodynamic activity of oxygen in molten lead. In 2011 the OAA-1 analyzers were successfully tested using the OASCR test rig.

УДК 621.039.51

Optimization of Isotopic Composition Identification by Program Code MGAU using Statistical Methods \ V.I. Boyko, M.E. Silaev, Y.V. Nedbaylo; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 2 illustrations. – References, 8 titles.

This paper includes statistical analysis of isotopic composition results that were got with program MGAU. Multivariate analysis was chosen as suitable statistical method. In accordance with results of analysis the recommendations were made for using of this program code in combination with Low Energy Germanium Detector. These recommendations give opportunity to optimize of measurement process of uranium isotopic composition.

УДК 621.039.51

IRT Research Reactor Burnup Calculation for the Analysis of Conversion to Low Enrichment Uranium Fuel \ S.V. Ivakhin, A.I. Radaev, G.V. Tikhomirov, M.V. Shchurovskaya; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 5 tables, 4 illustrations. – References, 8 titles.

Neutronic characteristics of IRT-3M fuel assembly with dioxide high enrichment uranium (HEU) fuel and uranium-molybdenum low enrichment uranium (LEU) fuel are considered. Results of calculation of irradiated fuel isotope composition are presented. Test problems for IRT cells with HEU and LEU fuel calculated by MCU and MCNP codes are proposed.

УДК 621.311.25.004.7

Creation and Application of Multidimensional Information Models of NPP Unit for Decommissioning \ B.K. Bylkin, V.L. Tikhonovsky, D.V. Chuyko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 3 illustrations. – References, 10 titles.

Basic principles of the imitational modeling application for the nuclear power plant decommissioning planning have been described.

УДК 532.546

The comparison of Two Approaches for Calculation of the Force Interaction of the Two-Phase Flow with Tube Bundle \ V.G. Asmolov, V.N. Blinkov, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, A.A. Nerovnov, Y.V. Parfenov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 2 illustrations. – References, 10 titles.

The comparison of the two different approaches for simulation of the force interaction of the two-phase flow with the external surfaces is presented in the paper. The two-velocity two-phase flow model was developed for calculation of the two-phase pressure drop for the cross flow across tube bundle. The pressure drops across tube bundle were calculated with this model using two different approaches for simulation of the two-phase flow drag with the tube bundle. The calculated results