

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

© 2016 г. **А.Н. Ефремов, В.А. Хохлов, С.В. Исупов, Ю.П. Зайков**

Институт высокотемпературной электрохимии (ИВТЭ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург

*Статья поступила в редакцию 18.05.15 г., доработана и подписана в печать 30.06.15 г.*

Методом математического моделирования изучено влияние состава расплавленного электролита и геометрической конфигурации электролизера с жидкометаллическими свинцовыми электродами на пространственное распределение постоянного тока и температуры в аппарате типа «тигель в тигле», рассмотренном в качестве прототипа устройства для переработки отработавшего ядерного топлива. Показано, что рассчитанные по модели параметры хорошо согласуются с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** моделирование, электрическое поле, тепловое поле, рафинирование, жидкометаллические электроды.

**Ефремов А.Н.** — мл. науч. сотрудник лаборатории радиохимии ИВТЭ УрО РАН (620219, г. Екатеринбург, ул. Академическая, 20). E-mail: alexandr\_efremoff@mail.ru.

**Хохлов В.А.** — докт. хим. наук, гл. науч. сотрудник лаборатории расплавленных солей ИВТЭ УрО РАН, проф. кафедры неорганической химии УрФУ (420002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: vladkhokh@mail.ru.

**Исупов С.В.** — мл. науч. сотрудник лаборатории расплавленных солей ИВТЭ УрО РАН. E-mail: isupov.s.v@mail.ru.

**Зайков Ю.П.** — докт. хим. наук, проф., зав. кафедрой технологии электрохимических производств УрФУ, науч. руководитель ИВТЭ УрО РАН. E-mail: dir@ihte.uran.ru.

**Для цитирования:** Ефремов А.Н., Хохлов В.А., Исупов С.В., Зайков Ю.П. Моделирование электрических и тепловых полей в электролизере с жидкометаллическими электродами // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 6. С. 14—20. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-6-14-20.

*Efremov A.N., Khokhlov V.A., Isupov S.V., Zaikov Yu.P.*

### Electric and thermal field modeling in electrolyzer with liquid metal electrodes

The paper uses mathematical modeling to study the influence of molten electrolyte composition and the geometric configuration of the electrolyzer with liquid metal lead electrodes on the spatial distribution of DC and the temperature in the «crucible in crucible» type apparatus considered as a prototype of the device for reprocessing of spent nuclear fuel. It is shown that the calculated model parameters are in good agreement with the experimental data.

**Keywords:** modeling, electric field, thermal field, refining, liquid metal electrodes.

**Efremov A.N.** — Junior Researcher of Radiochemistry laboratory, Ihte UrB RAS (620219, Russia, Yekaterinburg, Akademicheskaya str., 20). E-mail: alexandr\_efremoff@mail.ru.

**Khokhlov V.A.** — Dr. Sci. (Chem.), Prof., Major Researcher of Laboratory of molten salts, Ihte UrB RAS, Prof. of Department of inorganic chemistry, Ural Federal University (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: vladkhokh@mail.ru.

**Isupov S.V.** — Junior Researcher of Laboratory of molten salts, Ihte UrB RAS. E-mail: isupov.s.v@mail.ru.

**Zaikov Yu.P.** — Dr. Sci. (Chem.), Prof., Research Supervisor of Ihte UrB RAS, Head of Department «Technology of electrochemical productions», UrFU. E-mail: dir@ihte.uran.ru.

**Citation:** Efremov A.N., Khokhlov V.A., Isupov S.V., Zaikov Yu.P. Modelirovanie elektricheskikh i teplovykh polей v elektrolizere s zhidkometallicheskimy elektrodami. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 6. P. 14—20. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-6-14-20.

## Введение

Для решения вопросов по созданию замкнутого топливного цикла при разработке атомных реакторов на быстрых нейтронах рассматривается перспективная пироэлектрохимическая технология регенерации ядерного топлива после извле-

чения его из реактора, которая осуществляется в электролизерах с расплавленными солевыми электролитами и жидкометаллическими электродами [1—6]. В качестве электролитов рекомендуются термо- и радиационно-стойкие галогенидные рас-

плавов, а для изготовления электродов могут использоваться такие металлы, как Zn, Cd, Pb, Bi, Sn, Ga, а также их сплавы [5–8]. Эти металлы имеют относительно невысокую температуру плавления и во время электролиза будут находиться в жидком состоянии под слоем солевого расплава. При этом на аноде происходит растворение актинидов (уран, плутоний и т.д.), а на катоде — их осаждение, остальные примеси остаются в анодном сплаве.

При правильно подобранных режимах электролитического процесса и знании термодинамики образования сплавов металлов (выделяющихся на катоде) с материалом электрода можно достичь высоких коэффициентов разделения близких по потенциалам выделения металлов, например актинидов и лантанидов. Из научно-технической литературы известно, что в качестве перспективных устройств для электрохимической переработки таких материалов преимущественно рассматриваются конструкции типа «тигель в тигле» [9–12]. Однако даже при использовании жидкометаллических электродов исключить неравномерное распределение тока на их поверхности, как и в случае с твердыми металлическими электродами, не удастся.

В работе [13] показано, что реальная (экспериментально измеренная) плотность тока на различных участках свинцового анода может отличаться более чем в 2 раза от средней, рассчитанной по общей площади его поверхности. Это оказывает влияние на тепло- и массоперенос как в расплавленных солевых электролитах, так и в жидкометаллических электродах. Неравномерное распределение тока по поверхности жидкометаллических электродов необходимо учитывать и при выборе оптимальных технологических параметров электролитического процесса, а также при разработке новых конструкций электролизеров, для того чтобы добиться высоких коэффициентов разделения близких по свойствам металлов.

Экспериментальное изучение процессов тепло-, массо- и электропереноса в описанных выше устройствах является непростой задачей, особенно при работе с агрессивными расплавленными солями и радиоактивными веществами. Это осложняет детальное исследование и определение параметров этих процессов для поиска оптимальных электрохимических режимов, поскольку требует проведения большого числа трудоемких экспериментов, что существенно увеличивает время разработки и создания новых технологий [14]. Очевидными преимуществами при выборе оптимальных техно-

логических параметров многофакторного электролитического процесса обладают методы математического моделирования электрических и тепловых полей при помощи прикладных пакетов компьютерных программ с последующей экспериментальной верификацией проведенных расчетов.

В данной работе представлены результаты математического моделирования электрических и тепловых полей как функций состава электролита и геометрии электрохимической ячейки в электролизере типа «тигель в тигле» с расплавом KCl—PbCl<sub>2</sub> и свинцовыми электродами, рассмотренном в качестве прототипа устройства для пироэлектрохимической переработки техногенного сырья. Проведено сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными [13].

## Методика исследований

### Основные уравнения электропроводности и теплопроводности

Для создания математической модели, описывающей электрические и тепловые поля в электролизере с жидкометаллическими электродами, использованы приведенные ниже уравнения электро- и теплопроводности [14–16].

#### Электрическое поле

Электрическое поле в проводящей среде при прохождении постоянного тока описывается согласно первому закону Кирхгофа и закону Ома с помощью следующего уравнения [15]:

$$\operatorname{div}(\lambda \nabla \varphi) = 0, \quad (1)$$

где  $\varphi$  — потенциал, В;  $\lambda$  — симметричный тензор электропроводности, который для изотропного проводника тока можно записать в виде

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\lambda = f(T)$  — зависящая от температуры удельная электрическая проводимость, Ом<sup>–1</sup>·м<sup>–1</sup>.

Для изотропного неоднородного проводника или проводника с переменным температурным полем  $T(x, y, z) \neq \text{const}$  уравнение (1) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0. \quad (3)$$

Для получения однозначного решения уравнения (3) были заданы следующие граничные условия:

- на наружной концевой поверхности катодного токоподвода задан потенциал  $\varphi = 0$ ;
- на наружной поверхности анодного токоподвода задан ток  $I = 23,2$  А с учетом геометрических размеров ячейки;
- на границе с диэлектриком отсутствует ток по нормали к поверхности:

$$\lambda_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} l_x + \lambda_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} l_y + \lambda_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} l_z = 0. \quad (4)$$

### Температурное поле

Уравнение теплопроводности для нестационарной задачи имеет вид [16]

$$\text{div}(k \nabla T) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (5)$$

или

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (6)$$

где  $T$  — температура, К;  $k_x, k_y, k_z$  — коэффициенты теплопроводности в направлении осей  $X, Y, Z$ , зависящие от температуры, Вт/(м·К);  $\rho$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $t$  — время, с;  $Q$  — тепло, Вт/м<sup>3</sup>, которое выделяется при прохождении электрического тока и выражается следующим образом:

$$Q = \lambda_x H_x^2 + \lambda_y H_y^2 + \lambda_z H_z^2 = \\ = \lambda_x \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2. \quad (7)$$

При определении температурного поля в лабораторной ячейке решалась стационарная задача, поэтому правая часть уравнений (5) и (6) равна нулю. Для оценки стационарного температурного поля по формуле (6) необходимо задать граничные условия:

- на поверхности анодного стакана температура соответствует температуре варианта расчета

$$T = f(x, y, z) = \text{const}; \quad (8)$$

- на поверхности, контактирующей с атмосферой, задан конвективный и лучистый теплообмен, т.е.

$$-\left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} l + k_y \frac{\partial T}{\partial y} m + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n \right) = \\ = h(T - T_\infty) + \varphi \varepsilon c_0 (T^4 - T_\infty^4), \quad (9)$$

где  $h$  — коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_\infty$  — температура окружающей среды;  $\varphi$  — угловой коэффициент излучения;  $\varepsilon$  — степень черноты;  $c_0 = 5,6687 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $l, m, n$  — площади контактирующей поверхности, м<sup>2</sup>.

### Постановка задач и исходные данные для моделирования

В работе исследовано влияние добавки оксида свинца (II) в электролит KCl—PbCl<sub>2</sub>, уровней катодного и анодного металлов, а также расположения катодного тигля на пространственное распределение постоянного тока и температуры в электролизере типа «тигель в тигле» с жидкометаллическими свинцовыми электродами, рассмотренном в качестве типичного устройства для пирроэлектростимуляционной переработки отработанного ядерного топлива.

Конструкция электролизера представлена на рис. 1. Физико-химические данные для электролита, электродов и конструкционных материалов, необходимых для расчетов, описаны в работах [17–23].

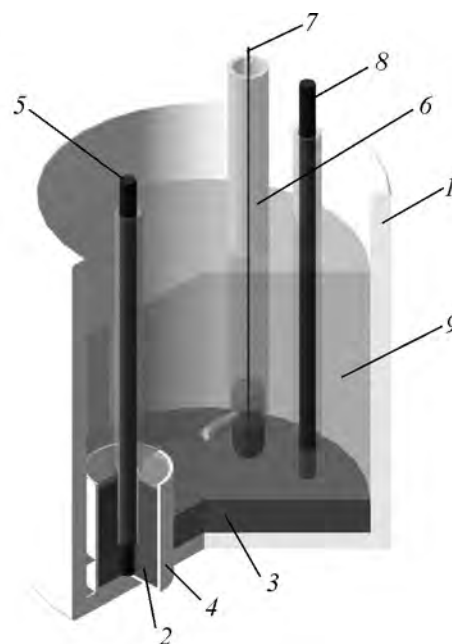


Рис. 1. Лабораторная ячейка с жидкометаллическими электродами из свинца

1 — анодный стакан из электрокорунда; 2 — катодный свинец С1; 3 — анодный свинец С1; 4 — катодный тигель из электрокорунда; 5 — катодный токоподвод; 6 — свинцовый зондовый электрод; 7 — молибденовая проволока; 8 — анодный токоподвод; 9 — электролит

## Метод решения дифференциальных уравнений

Дифференциальные уравнения в частных производных электрического и температурного полей решались методом конечных элементов с помощью коммерческого пакета программы ANSYS.

## Результаты моделирования

В ходе математического моделирования получен большой объем данных по распределению плотности тока и температуры в электролизере на поверхности жидкометаллических электродов и в объеме электролита. На рис. 2 и 3 в графическом виде приведены некоторые из них. В качестве электролита использована эквимольная смесь хлоридов свинца и калия (50:50 мол. %), электроды — жидкометаллический свинец С1, уровень электролита — 30 мм, уровни катодного и анодного металлов — 30 и 10 мм соответственно.

Результаты расчетов показали, что электролит перегревается за счет выделения джоулева тепла

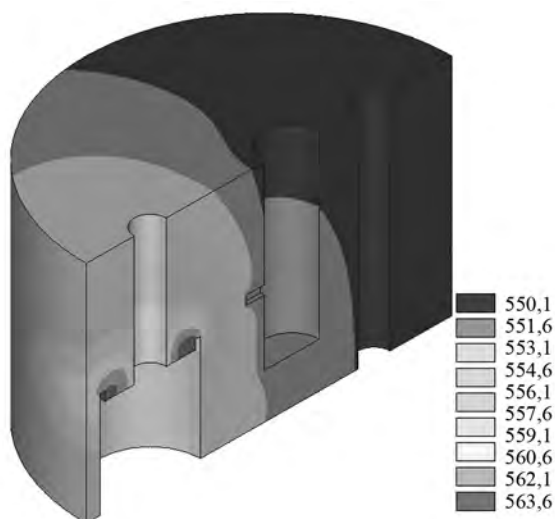


Рис. 2. Температурное поле (°C) электролита



Рис. 3. Распределение плотности тока ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) вдоль поверхности металл—электролит

на 13,6 град над поверхностью катодного свинца из-за очень высокой плотности тока (см. рис. 2). Перерасчет электрического поля с учетом результатов расчета температурного поля показал, что напряжение в ячейке уменьшилось на 331 мВ из-за увеличения температуры электролита и электропроводности.

## Влияние состава электролита

При изучении влияния состава электролита были выявлены следующие особенности изменения температуры и плотности тока.

- При введении в электролит добавки оксида свинца (II) область повышенной плотности тока на поверхности жидкометаллического электрода сужается, и максимальная плотность тока ( $0,94 \text{ A}/\text{cm}^2$ ) реализуется на расстоянии 0—2 см от стенки катодного тигля. При расчете температурного поля выявлено, что максимальный градиент температур наблюдается на высоте 0,5—1,0 см над кромкой катодного тигля и составляет 45 град.

- С введением в электролит  $\text{KCl}-\text{PbCl}_2$  добавки 5,0 мас. %  $\text{LiCl}$  максимум анодной плотности тока, реализуемый вблизи стенки катодного тигля, уменьшился с 0,9 до  $0,75 \text{ A}/\text{cm}^2$ , а линии тока распределяются более равномерно. Это привело к снижению градиента температур по высоте электролита над краем катода. Максимальная температура составила 833 К над краем катодного тигля.

- С увеличением концентрации хлорида лития до 10,0 мас. % максимум анодной плотности тока снизился с 0,9 до  $0,65 \text{ A}/\text{cm}^2$  по сравнению с электролитом без добавки, т.е. приблизительно на 35 %. Температурное поле было идентично предыдущему варианту с добавкой 5 мас.%  $\text{LiCl}$ .

## Влияние уровней катодного и анодного металлов

При изучении влияния уровня катодного металла рассмотрено три варианта: 10, 20 и 30 мм при постоянном уровне анодного металла 10 мм.

Снижение уровня катодного металла с 30 до 10 мм привело к увеличению неравномерности распределения плотности тока вдоль поверхности анода. В рассматриваемой конструкции максимальная плотность тока в анодной части возросла на 3,9—5,7 %, а максимальная температура в электролите увеличивалась на 47,6 град. В горизонтальном сечении над катодным стаканом максимальная плотность тока, наоборот, снизилась на 5,2 %.

Исследование влияния уровня анодного металла на распределение электрического и теплового полей проведено при высоте катодного свинца 30 мм. Установлено, что повышение уровня анодного металла с 10 до 30 мм приводит к существенному увеличению неравномерности распределения плотности тока на поверхности анода.

### Влияние расположения катодного тигля

В одном из вариантов расчета катодный тигель устанавливался по центру анодного стакана, в отличие от предыдущих экспериментов, где он располагался у стенки анодного стакана.

Результаты расчетов показали, что такая геометрическая конфигурация электролизера позволила существенно снизить неравномерность распределения тока. Также наблюдались уменьшение максимальных плотностей тока на поверхности анода на 14–16 % и снижение напряжения в ячейке на 10,0 %.

На рис. 4 и 5 представлены результаты расче-

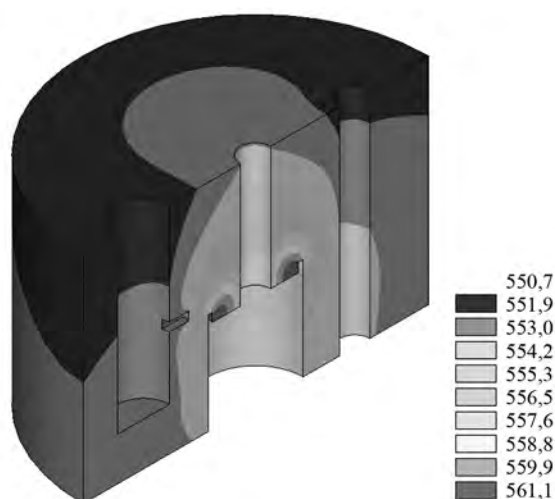


Рис. 4. Температурное поле ( $^{\circ}\text{C}$ ) лабораторной ячейки и электролита при расположении катодного тигля в центре

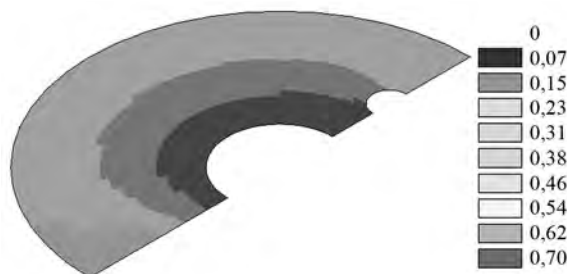


Рис. 5. Распределение плотности тока ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) в объеме электролита в сечении на границе металл—электролит при расположении катодного тигля в центре

тов температурного поля и распределения плотности тока в объеме электролита для данного варианта.

### Обсуждение результатов

В работах [13, 24] описаны эксперименты по влиянию температуры, состава электролита, а также уровней катодного и анодного металлов на распределение плотности тока по поверхности жидкометаллического анода в электролизере типа «тигель в тигле» для рафинирования свинца.

Расчетные и экспериментальные кривые распределения плотности тока по поверхности жидкометаллического анода для всех рассмотренных случаев имеют схожий характер. В качестве примера на рис. 6 представлены в сравнении расчетные и экспериментальные данные [13] для варианта с добавкой в электролит 5 мас.% LiCl. Видно, что результаты моделирования и экспериментальные данные хорошо согласуются между собой в интервале от пиковых значений анодной плотности тока до ее величины у дальней стенки анодного тигля. Модель не описывает лишь область вблизи стенки катодного тигля, где возникает так называемая застойная зона. Данное явление может быть объяснено с точки зрения физико-химической гидродинамики [25].

Результаты работы показали, что для достижения более равномерного распределения тока и меньшего расхода электроэнергии в конструкции электролизера необходимо предусмотреть коаксиальное расположение тиглей с жидкометаллическими электродами.

Во всех рассмотренных вариантах полученные в ходе математического моделирования резуль-

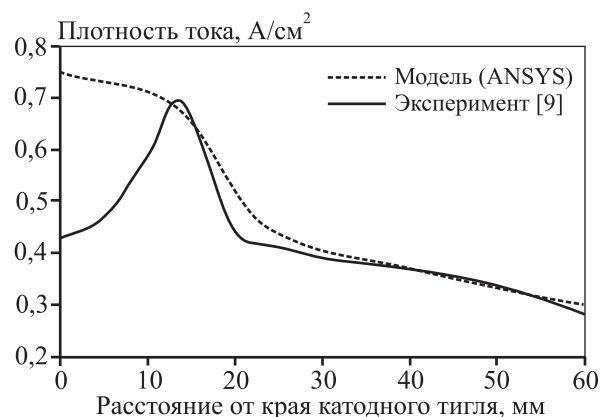


Рис. 6. Распределение плотности тока вдоль поверхности жидкометаллического анода для варианта с добавкой в электролит 5 мас.% LiCl

таты хорошо согласуются с экспериментальными данными [13, 24]. Это дает основание полагать, что созданная модель может быть применена к другим электролитическим системам с жидкометаллическими электродами, в частности рекомендуемым для регенерации отработавшего ядерного топлива.

## Заключение

Проведено математическое моделирование электрических и тепловых полей в электролизере с жидкометаллическими электродами, по результатам которого установлено следующее:

— при введении добавки оксида свинца (II) область повышенной плотности тока на поверхности жидкометаллического электрода сужается, а максимальная плотность тока увеличивается;

— с повышением концентрации хлорида лития максимум анодной плотности тока падает по сравнению с электролитом без добавки;

— при снижении уровня катодного металла наблюдаются незначительное возрастание неравномерности распределения плотности тока вдоль поверхности анода и увеличение максимальной температуры в электролите на 47,6 град;

— повышение уровня анодного металла приводит к существенному росту неравномерности распределения плотности тока на поверхности анода и увеличению площади анода с плотностью тока менее среднегеометрической.

Результаты математического моделирования во всех случаях хорошо согласуются с экспериментальными данными в области от пиковых значений плотности тока до крайней точки анодной поверхности. Их расхождения с экспериментальными данными не превышают 3 %. Однако они не описывают явления возникновения застойной зоны вблизи кромки катодного тигля, которое может быть объяснено с точки зрения физико-химической гидродинамики.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ  
ГК № 14.607.21.0084 (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60714X0084).*

## Литература

1. Sakamura Y., Shirai O., Iwai T., Suzuki Y. Distribution behavior of plutonium and americium in LiCl—KCl eutectic. Liquid cadmium systems // *J. Alloys and Compounds*. 2001. Vol. 321. P. 76—83.
2. Hebditch D., Hanson B., Lewin R., Beetham S., Jenkins J., Sims H. Electrorefining of uranium and electro partitioning of U, Pu, Am, Nd and Ce // *Proc. of Global 2003* (New Orleans, LA, November 16—20, 2003). P. 1574—1581.
3. Satoh T., Iwai T., Arai Y. Electrolysis of burn up-simulated uranium nitride fuels in LiCl—KCl eutectic melts // *J. Nucl. Sci. Technol.* 2009. Vol. 46. P. 557—563.
4. Song K., Lee H., Hur J., Kim J., Ahn D., Cho Y. Status of pyroprocessing technology development in Korea // *Nucl. Eng. Technol.* 2010. Vol. 42. P. 131—144.
5. Koyama T., Sakamura Y., Iizuka M., Kato T., Murakami T., Glatz J.-P. Development of pyro-processing fuel cycle technology for closing actinide cycle // *Proc. Chem.* 2012. Vol. 7. P. 772—778.
6. Shirai O., Uozumi K., Iwai T., Arai Y. Electrode reaction of the  $U^{3+}/U$  couple at liquid Cd and Bi electrodes in LiCl—KCl eutectic melts // *Anal. Sci.* 2001. Vol. 17. P. i959—i962.
7. Smolenski V., Novoselova A., Osipenko A., Kormilitsyn M., Luk'yanova Ya. Thermodynamics of separation of uranium from neodymium between the gallium-indium liquid alloy and the LiCl—KCl molten salt phases // *Electrochim. Acta*. 2014. Vol. 133. P. 354—358.
8. Smolenski V., Novoselova A., Osipenko A., Maershin A. Thermodynamics and separation factor of uranium from lanthanum in liquid eutectic gallium-indium alloy/molten salt system // *Electrochim. Acta*. 2014. Vol. 145. P. 81—85.
9. Omel'chuk A.A. Thin-layered electrolysis in molten electrolytes // *Russ. J. Electrochem.* 2007. Vol. 43. P. 1007—1015.
10. Делимарский Ю.К., Зарубицкий О.Г. Электролитическое рафинирование тяжелых металлов в ионных расплавах. М.: Metallurgy, 1975.
11. Делимарский Ю.К. Теоретические основы электролиза ионных расплавов. М.: Metallurgy, 1986.
12. Omel'chuk A.A. Electrorefining of heavy nonferrous metals in molten electrolytes // *Russ. J. Electrochem.* 2010. Vol. 46. P. 680—690.
13. Efremov A.N., Khalimullina Yu.R., Pershin P.S., Arkhipov P.A., Zaikov Yu.P. Influence of the electrolyte composition on the current distribution in an electrolytic cell with liquid metal electrodes // *Russ. Metallurgy (Metallurgy)*. 2015. No. 2. P. 115—120.
14. Иванов В.Т., Щербинин С.А., Галимов А.А. Математическое моделирование электротепломассопереноса в сложных системах. Уфа: БНЦ УрО РАН СССР, 1991.
15. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Высш. шк., 1978.
16. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.
17. Балкевич В.Л. Техническая керамика: Учеб. пос. для вузов. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1984.
18. ASM Metals Handbook. Vol. 1: Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys. 10-th ed. Ohio: ASM International, 1990.
19. Desai P.D., Chu T.K., James H.M., Ho C.Y. Electrical Re-

- sistivity of selected elements // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1984. Vol. 13. No. 4. P. 1069—1096.
20. Shinno H., Kitajima M., Okada M. Thermal stress analysis of high heat flux materials // *J. Nucl. Mater.* 1988. Vol. 155—157. P. 290—294.
  21. Giordanengo B., Benazzi N., Vinckel J., Gasser J.G., Roubi L. Thermal conductivity of liquid metals and metallic alloys // *J. Non-Crystal. Sol.* 2000. Vol. 250—252. P. 377—383.
  22. Gale W.F., Totemeier T.C. *Smithells metals reference book*. 8-th ed. Amsterdam: Elsevier, 2004.
  23. Iida. T., R.I.L. Guthrie. *The physical properties of liquid metals*. Oxford: Clarendon Press, 1988.
  24. Efremov A.N., Arkhipov P.A., Zaikov Yu.P. Simulation of the electric field in an electrolytic cell with a liquid metal anode // *Russ. Metallurgy (Metally)*. 2013. No. 2. P. 96—99.
  25. Левич В.Г. *Физико-химическая гидродинамика*. М.: ГИФМЛ, 1959.
  10. Delimarskij Yu.K., Zarubitskij O.G. *Electroliticheskoe rafinirovanie tyazholykh metallov v ionnykh rasplavah* [Electrolytic refining of heavy metals in the ionic melts]. Moscow: Metallurgiya, 1975.
  11. Delimarskij Yu.K. *Teoreticheskie osnovy electroliza ionnykh rasplavov* [Fundamentals for a electrolysis of ionic melts]. Moscow: Metallurgiya, 1986.
  12. Omel'chuk A.A. *Electrorefining of heavy nonferrous metals in molten electrolytes*. *Russ. J. Electrochem.* 2010. Vol. 46. P. 680—690.
  13. Efremov A.N., Khalimullina Yu.R., Pershin P.S., Arkhipov P.A., Zaikov Yu.P. Influence of the electrolyte composition on the current distribution in an electrolytic cell with liquid metal electrodes. *Russ. Metallurgy (Metally)*. 2015. No. 2. P. 115—120.
  14. Ivanov V.T., Scherbinin S.A., Galimov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie electroteplomassoperenosa v slozhnykh sistemah* [Mathematic modeling of electro, heat and mass transfer in complex systems]. Ufa: BSC UB RAS USSR, 1991.
  15. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy electrotehniki. Elektromagnitnoe pole* [Fundamentals of electrical engineering. An electromagnetic field]. Moscow: Vysshaya shkola, 1978.
  16. Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov* [Application of the finite element method]. Moscow: Mir, 1979.
  17. Balkevich V.L. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics: textbook for technical colleges]. Moscow: Stroiizdat, 1984.
  18. *ASM Metals Handbook*. Vol. 1: Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys. 10-th ed. Ohio: ASM International, 1990.
  19. Desai P.D., Chu T.K., James H.M., Ho C.Y. *Electrical Resistivity of selected elements*. *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1984. Vol. 13. No. 4. P. 1069—1096.
  20. Shinno H., Kitajima M., Okada M. Thermal stress analysis of high heat flux materials. *J. Nucl. Mater.* 1988. Vol. 155—157. P. 290—294.
  21. Giordanengo B., Benazzi N., Vinckel J., Gasser J.G., Roubi L. Thermal conductivity of liquid metals and metallic alloys. *J. Non-Crystal. Sol.* 2000. Vol. 250—252. P. 377—383.
  22. Gale W.F., Totemeier T.C. *Smithells metals reference book*. 8-th ed. Amsterdam: Elsevier, 2004.
  23. Iida. T., R.I.L. Guthrie. *The physical properties of liquid metals*. Oxford: Clarendon Press, 1988.
  24. Efremov A.N., Arkhipov P.A., Zaikov Yu.P. Simulation of the electric field in an electrolytic cell with a liquid metal anode. *Russ. Metallurgy (Metally)*. 2013. No. 2. P. 96—99.
  25. Levich V.G. *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physicochemical hydrodynamics]. Moscow: GIFML, 1959.

## References

1. Sakamura Y., Shirai O., Iwai T., Suzuki Y. Distribution behavior of plutonium and americium in LiCl—KCl eutectic. Liquid cadmium systems. *J. Alloys and Compounds*. 2001. Vol. 321. P. 76—83.
2. Hebditch D., Hanson B., Lewin R., Beetham S., Jenkins J., Sims H. Electrorefining of uranium and electro partitioning of U, Pu, Am, Nd and Ce. In: *Proc. of Global 2003* (New Orleans, LA, November 16—20, 2003). P. 1574—1581.
3. Satoh T., Iwai T., Arai Y. Electrolysis of burn up-simulated uranium nitride fuels in LiCl—KCl eutectic melts. *J. Nucl. Sci. Technol.* 2009. Vol. 46. P. 557—563.
4. Song K., Lee H., Hur J., Kim J., Ahn D., Cho Y. Status of pyroprocessing technology development in Korea. *Nucl. Eng. Technol.* 2010. Vol. 42. P. 131—144.
5. Koyama T., Sakamura Y., Iizuka M., Kato T., Murakami T., Glatz J.-P. Development of pyro-processing fuel cycle technology for closing actinide cycle. *Proc. Chem.* 2012. Vol. 7. P. 772—778.
6. Shirai O., Uozumi K., Iwai T., Arai Y. Electrode reaction of the  $U^{3+}/U$  couple at liquid Cd and Bi electrodes in LiCl—KCl eutectic melts. *Anal. Sci.* 2001. Vol. 17. P. i959—i962.
7. Smolenski V., Novoselova A., Osipenko A., Kormilitsyn M., Luk'yanova Ya. Thermodynamics of separation of uranium from neodymium between the gallium-indium liquid alloy and the LiCl—KCl molten salt phases. *Electrochim. Acta*. 2014. Vol. 133. P. 354—358.
8. Smolenski V., Novoselova A., Osipenko A., Maershin A. Thermodynamics and separation factor of uranium from lanthanum in liquid eutectic gallium-indium alloy/molten salt system. *Electrochim. Acta*. 2014. Vol. 145. P. 81—85.
9. Omel'chuk A.A. Thin-layered electrolysis in molten electrolytes. *Russ. J. Electrochem.* 2007. Vol. 43. P. 1007—1015.