

ТЕХНОЛОГИЯ РЕДКИХ, РАССЕЯННЫХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ/TECHNOLOGY OF RARE, SCATTERED AND RADIOACTIVE ELEMENTS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.14>

КОЭФФИЦИЕНТЫ АКТИВНОСТИ ЦИРКОНИЯ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ГАЛЛИЯ

Научная статья

Новикова М.Н.¹, Яковлев А.В.², Смирнова В.В.^{3,*}, Волкович В.А.⁴

³ ORCID : 0000-0001-6450-816X;

⁴ ORCID : 0000-0003-4438-1194;

^{1, 2, 3, 4} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

⁴ Институт metallurgии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (zakharova.viktoria[at]urfu.ru)

Аннотация

Сплавы на основе галлия могут быть использованы в качестве материала активных электродов в технологиях пироэлектрохимической переработки отработавшего ядерного топлива для разделения делящихся материалов и продуктов деления. Цирконий является самым близким к урану по электрохимическим свойствам электроположительным продуктом деления. Увеличение коэффициента разделения урана и циркония в системе «солевой расплав — жидкий металл» возможно за счёт подбора сплава, обеспечивающего максимальную разницу в коэффициентах активности разделяемых металлов. Целью настоящей работы являлось определение влияния природы галлиевого сплава на коэффициенты активности циркония. Основой сплавов являлся галлий и эвтектические смеси Ga-In (21.8 мас. % In), Ga-Al (1.6 мас. % Al), Ga-Zn (3.64 мас. % Zn), Ga-Sn (13.5 мас. % Sn). Методом электродвижущих сил была определена активности циркония в сплавах на основе Ga-Sn. Методом изотермического насыщения была определена растворимость циркония в сплавах на основе Ga, Ga-In, Ga-Al, Ga-Zn и Ga-Sn в интервале 650–1100 К и рассчитаны коэффициенты активности. Коэффициенты активности циркония возрастают с температурой и уменьшаются в ряду Ga-Zn > Ga-Al > Ga-Sn > Ga > Ga-In. Добавки олова, алюминия и цинка приводят к увеличению коэффициентов активности циркония в сплавах на основе галлия, т.е. к ослаблению взаимодействия циркония со сплавом-растворителем, а добавка индия — к уменьшению коэффициентов активности циркония, т.е. усилиению взаимодействия циркония со сплавом.

Ключевые слова: цирконий, галлий, индий, алюминий, олово, цинк, коэффициенты активности, растворимость.

ACTIVITY COEFFICIENTS OF ZIRCONIUM IN GALLIUM-BASED ALLOYS

Research article

Novikova M.N.¹, Yakovlev A.V.², Smirnova V.V.^{3,*}, Volkovich V.A.⁴

³ ORCID : 0000-0001-6450-816X;

⁴ ORCID : 0000-0003-4438-1194;

^{1, 2, 3, 4} Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

⁴ Institute of Metallurgy of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (zakharova.viktoria[at]urfu.ru)

Abstract

Gallium-based alloys can be used as active electrode material in technologies of pyroelectrochemical recycling of spent nuclear fuel for separation of fissile materials and fission products. Zirconium is the closest electropositive fission product to uranium in terms of electrochemical properties. The increase of uranium and zirconium separation factor in the system ‘salt melt — liquid metal’ is possible due to the selection of an alloy providing the maximum difference in the activity coefficients of the separated metals. The aim of the present work was to determine the influence of the nature of gallium alloy on the activity coefficients of zirconium. The alloys were based on gallium and eutectic mixtures Ga-In (21.8 wt. % In), Ga-Al (1.6 wt. % Al), Ga-Zn (3.64 wt. % Zn), Ga-Sn (13.5 wt. % Sn). The activity of zirconium in Ga-Sn-based alloys was determined by the electromotive force method. The solubility of zirconium in Ga, Ga-In, Ga-Al, Ga-Zn and Ga-Sn based alloys in the range of 650–1100 K was determined by the isothermal saturation method and activity coefficients were calculated. The activity coefficients of zirconium increase with temperature and decrease in the series Ga-Zn > Ga-Al > Ga-Sn > Ga > Ga-In. Additions of tin, aluminium and zinc lead to an increase in the activity coefficients of zirconium in gallium-based alloys, i.e. to a weakening of the interaction of zirconium with the solvent alloy, while the addition of indium leads to a decrease in the activity coefficients of zirconium, i.e. to an increase in the interaction of zirconium with the alloy.

Keywords: zirconium, gallium, indium, aluminium, tin, zinc, activity coefficients, solubility.

Введение

Эффективное развитие атомной энергетики зависит от ряда факторов, включающих эффективное использование делящихся материалов, повышение глубины выгорания ядерного топлива, разработку безопасных и экологически приемлемых методов обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами. Снижение потребности в природном уране, использование нарабатываемого плутония, трансмутация долгоживущих радионуклидов в короткоживущие возможны при переходе на короткозамкнутый ядерный топливный цикл,

позволяющий перерабатывать маловыдержанное ОЯТ [1]. Современные экстракционные технологии не дают возможности организовать процесс переработки ОЯТ с большой глубиной выгорания или малым временем выдержки из-за проблем, связанных с обеспечением ядерной безопасности, радиолизом водных и органических сред. Подобных недостатков лишены пирохимические технологии обращения с ОЯТ, использующие в качестве рабочих сред расплавленные соли и металлы, обладающие высокой радиационной стойкостью и не содержащие замедлителей нейтронов [1]. Следует отметить, что пирохимические процессы обладают не такой высокой избирательностью, как экстракционные, и позволяют достигать коэффициентов очистки делящихся материалов от продуктов деления только на уровне 10^2 – 10^3 . По этой причине подобные технологии представляют интерес для переработки ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах, которое отличается значительной глубиной выгорания и более высоким содержанием плутония, чем ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах, но не требует высоких коэффициентов очистки.

Одним из способов разделения компонентов ОЯТ, делящихся материалов и продуктов деления, является селекция в системе «солевой расплав — жидкий металл (сплав)», реализуемая за счёт протекания обменных окислительно-восстановительных реакций или электрохимических процессов. По отношению к урану и плутонию продукты деления подразделяются на электроположительные и электроотрицательные, в зависимости от значений их электродных потенциалов в расплавленном солевом электролите. Наиболее близкими к делящимся материалам по электрохимическим свойствам и, следовательно, наиболее трудноотделимыми, из числа электроотрицательных продуктов деления являются редкоземельные элементы (РЗЭ). Эффективное разделение урана и редкоземельных элементов возможно при использовании сплавов на основе галлия [2], [3], [4], [5]. При этом, в зависимости от температуры, состава солевого электролита и галлиевого сплава возможно достижение коэффициентов разделения урана и РЗЭ на уровне 10^2 – 10^5 [6], [7], [8].

Из числа электроположительных продуктов деления наиболее близким по электрохимическим свойствам к урану является цирконий. В зависимости от энергетического спектра нейтронов, типа реактора и глубины выгорания ядерного топлива содержание циркония в ОЯТ, поступающем на переработку, может составлять 5–13 кг/т [9]. Использование на стадии разделения урана и циркония тех же сплавов, что и для разделения урана и РЗЭ позволит упростить технологический процесс. В ходе предварительных экспериментов было установлено, что разделение циркония и урана с использованием жидкых сплавов на основе галлия возможно, экспериментально полученные коэффициенты разделения составляли 10^2 – 10^4 [9], [10]. Одним из факторов, влияющих на коэффициент разделения, является состав жидкокометаллической фазы. Было показано, что использование сплавов галлия с другими легкоплавкими металлами (алюминием, индием, оловом, цинком) оказывает заметное влияние на коэффициенты разделения урана и РЗЭ [1], [2]. Термодинамически возможный коэффициент разделения двух металлов на жидкокометаллическом электроде может быть рассчитан на основе данных по электрохимическим свойствам разделяемых металлов в фазе солевого расплава и их коэффициентам активности в фазе металлического сплава [11]. На основании результатов расчётов можно спрогнозировать какие сплавы окажутся наиболее перспективными для достижения высоких коэффициентов разделения. Однако термодинамические свойства циркония в сплавах с легкоплавкими металлами, включая коэффициенты активности, практически не исследованы. Поэтому целью настоящей работы являлась оценка коэффициентов активности циркония в сплавах на основе галлия.

Методы и принципы исследования

Коэффициенты активности металлов в жидкокометаллических сплавах определяются по разности экспериментально определяемых величин активности металла (в данном случае циркония) в насыщенных сплавах (a) и его растворимости (X) [12]:

$$\lg f = \lg a - \lg X \quad (1)$$

В настоящей работе были исследованы сплавы циркония с галлием и рядом сплавов галлия с другими легкоплавкими металлами эвтектического состава: Ga-In (21.8 мас. % In), Ga-Al (1.6 мас. % Al), Ga-Zn (3.64 мас. % Zn), Ga-Sn (13.5 мас. % Sn). Для приготовления сплавов использовали высокочистые металлы, галлий марки 6N (с содержанием основного вещества $\geq 99.9999\%$), индий, олово, алюминий марок ИН000, ОВЧ000, А5Н, соответственно, ($\geq 99.99\%$), цинк марки ЦВ00 ($\geq 99.997\%$) и йодидно рафинированный цирконий.

Активность циркония в сплавах с галлием и эвтектическими смесями Ga-In, Ga-Al и Ga-Zn были определены ранее с использованием метода измерения электродвижущих сил [13]. Такая же методика была использована в настоящей работе для определения активности циркония в сплавах на основе эвтектической смеси Ga-Sn.

Для определения растворимости циркония в жидкокометаллических сплавах использовали метод изотермического насыщения. Для этого в тигель из оксида бериллия помещали навески легкоплавких металлов (галлия или заранее приготовленных смесей на его основе) и циркония. Цирконий вводили в количестве, превышающем его ожидаемую растворимость в жидком металле. Все манипуляции с металлами проводили в инертном перчаточном боксе (Glovebox Systemtechnik) в атмосфере аргона (содержание кислорода не более 0.0005%, влаги не более 0.00001%). Тигель помещали в предварительно нагретую до требуемой температуры шахтную печь, расположенную в том же инертном боксе. Предварительно было установлено, что для насыщения жидкой фазы растворяемым металлом достаточно 6–24 часов выдержки, в зависимости от температуры. После выдержки в течение заданного времени проводили отбор небольшой порции жидкого сплава с помощью кварцевого капилляра с оттянутым кончиком. Затем температуру в печи изменяли и после следующей выдержки проводили пробоотбор. В течение эксперимента температуру как понижали, так и повышали, чтобы получить представительные результаты. Каждый капилляр с пробой металла затем взвешивали на аналитических весах и пробу количественно растворяли в смеси соляной и азотной кислот. Промытый и высушенный капилляр снова взвешивали и по разнице масс определяли массу пробы металла, переведенной в раствор. Концентрацию циркония в растворе определяли химическим анализом и далее рассчитывали концентрацию циркония в пробах сплавов.

Результаты и обсуждение

С использованием методики, описанной ранее [13] была определена активность циркония в сплаве Ga–Sn. В интервале 568–1075 К температурная зависимость активности удовлетворительно описывается уравнением:

$$\lg a = 3.03 - 8260 \cdot T^{-1} \quad (2)$$

Аналогичные температурные зависимости для активности циркония в сплавах с Ga, Ga–In, Ga–Al и Ga–Zn представлены в работе [13].

Близкие значения плотностей циркония (6.506 г/см³) и галлиевых сплавов (плотность галлия 5.904 г/см³) несколько затрудняют определение растворимости методом изотермического насыщения. Ранее было показано, что метод изотермического насыщения может быть успешно использован для определения растворимости лантана [14], [15], [16], [17], празеодима [18] и неодима [19] в галлиевых сплавах, хотя плотности указанных РЗЭ (6.145, 6.773 и 7.008 г/см³ для La, Pr и Nd, соответственно) также близки к плотности галлия. Для предотвращения попадания частиц твердых интерметаллических соединений в пробу металла необходимо создавать условия образования крупных кристаллов интерметаллических соединений. Результаты определения растворимости циркония (выраженной в мольной доле циркония в пробе) в исследованных металлических системах приведены в таблицах 1–5. Величины растворимости циркония имеют порядок, аналогичный растворимости редкоземельных металлов [14], [16], [18], [19] и урана [2], [17] в сплавах аналогичного состава. Результаты, полученные при различных температурах, имеют, однако, заметный разброс значений. Поэтому на данном этапе их следует принимать, как оценочные. По этой причине в настоящей работе не были рассчитаны температурные зависимости растворимости циркония в галлиевых сплавах.

Таблица 1 - Растворимость, активность и коэффициенты активности циркония в сплавах на основе галлия

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.14.1>

T, K	X, мол. д.	a	f
658	0,0083	2,95·10 ⁻¹¹	3,54·10 ⁻⁹
672	0,0158	5,30·10 ⁻¹¹	3,35·10 ⁻⁹
707	0,0041	2,10·10 ⁻¹⁰	5,16·10 ⁻⁸
729	0,0226	4,65·10 ⁻¹⁰	2,06·10 ⁻⁸
743	0,0019	7,56·10 ⁻¹⁰	4,08·10 ⁻⁷
761	0,0013	1,37·10 ⁻⁹	1,02·10 ⁻⁶
791	0,0018	3,47·10 ⁻⁹	1,97·10 ⁻⁶
813	0,0014	6,56·10 ⁻⁹	4,55·10 ⁻⁶
820	0,0090	8,05·10 ⁻⁹	8,95·10 ⁻⁷
823	0,0012	8,64·10 ⁻⁹	6,94·10 ⁻⁶
847	0,0087	1,65·10 ⁻⁸	1,89·10 ⁻⁶
869	0,0030	2,88·10 ⁻⁸	9,54·10 ⁻⁶
871	0,0175	3,01·10 ⁻⁸	1,72·10 ⁻⁶
897	0,0074	5,62·10 ⁻⁸	7,64·10 ⁻⁶
925	0,0010	1,05·10 ⁻⁷	1,09·10 ⁻⁴
942	0,0016	1,52·10 ⁻⁷	9,70·10 ⁻⁵
1010	0,0025	5,76·10 ⁻⁷	2,26·10 ⁻⁴
1029	0,0062	8,10·10 ⁻⁷	1,31·10 ⁻⁴
1059	0,0010	1,35·10 ⁻⁶	1,35·10 ⁻³
1100	0,0026	2,61·10 ⁻⁶	1,02·10 ⁻³

Таблица 2 - Растворимость, активность и коэффициенты активности циркония в сплавах на основе эвтектической смеси Ga–In

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.14.2>

T, K	X, мол. д.	a	f
693	0,0333	2,30·10 ⁻¹¹	6,90·10 ⁻¹⁰
743	0,0149	2,25·10 ⁻¹⁰	1,51·10 ⁻⁸
795	0,0262	1,78·10 ⁻⁹	6,78·10 ⁻⁸
835	0,0124	7,32·10 ⁻⁹	5,92·10 ⁻⁷
881	0,0072	3,18·10 ⁻⁸	4,42·10 ⁻⁶

T, K	$X, \text{моль. д.}$	a	f
940	0,0021	$1,69 \cdot 10^{-7}$	$7,97 \cdot 10^{-5}$

Примечание: 21.8 мас. % In

Таблица 3 - Растворимость, активность и коэффициенты активности циркония в сплавах на основе эвтектической смеси Ga-Al

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.14.3>

T, K	$X, \text{моль. д.}$	a	f
604	0,00039	$5,97 \cdot 10^{-11}$	$1,52 \cdot 10^{-7}$
641	0,00014	$3,12 \cdot 10^{-10}$	$2,24 \cdot 10^{-6}$
663	0,00027	$7,63 \cdot 10^{-10}$	$2,84 \cdot 10^{-6}$
707	0,000073	$3,87 \cdot 10^{-9}$	$5,28 \cdot 10^{-5}$
764	0,00018	$2,40 \cdot 10^{-8}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$
873	0,00013	$4,05 \cdot 10^{-7}$	$3,14 \cdot 10^{-3}$
929	0,00018	$1,34 \cdot 10^{-6}$	$7,66 \cdot 10^{-3}$
986	0,00027	$3,92 \cdot 10^{-6}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$
1036	0,00054	$9,14 \cdot 10^{-6}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$

Примечание: 1.6 мас. % Al

Таблица 4 - Растворимость, активность и коэффициенты активности циркония в сплавах на основе эвтектической смеси Ga-Sn

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.14.4>

T, K	$X, \text{моль. д.}$	a	f
645	0,000058	$1,67 \cdot 10^{-11}$	$2,91 \cdot 10^{-7}$
701	0,00049	$1,77 \cdot 10^{-10}$	$3,58 \cdot 10^{-7}$
749	0,00042	$1,00 \cdot 10^{-9}$	$2,41 \cdot 10^{-6}$
799	0,00039	$4,92 \cdot 10^{-9}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$
836	0,00080	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$
946	0,00087	$1,99 \cdot 10^{-7}$	$2,27 \cdot 10^{-4}$
997	0,00034	$5,56 \cdot 10^{-7}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$
1048	0,00044	$1,41 \cdot 10^{-6}$	$3,17 \cdot 10^{-3}$

Примечание: 13.5 мас. % Sn

Таблица 5 - Растворимость, активность и коэффициенты активности циркония в сплавах на основе эвтектической смеси Ga-Zn

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.14.5>

T, K	$X, \text{моль. д.}$	a	f
701	0,0019	$2,92 \cdot 10^{-7}$	$1,56 \cdot 10^{-4}$
762	0,00053	$1,41 \cdot 10^{-6}$	$2,68 \cdot 10^{-3}$
825	0,00014	$5,62 \cdot 10^{-6}$	$4,17 \cdot 10^{-2}$
871	0,00072	$1,36 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-2}$
928	0,00023	$3,59 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-1}$

Примечание: 3.64 мас. % Zn

Для каждого значения температуры, при которой была экспериментально определена растворимость, была рассчитана активность циркония в соответствующем сплаве. Для этого были использованы полученные ранее температурные зависимости активности [13] для систем на основе галлия, сплавов Ga-In, Ga-Al, Ga-Zn, и уравнение (2), полученное в настоящей работе, для сплавов Ga-Sn. Коэффициенты активности циркония были рассчитаны для каждого значения температуры по уравнению (1) и полученные значения также приведены в таблицах 1–5.

Температурные зависимости коэффициентов активности циркония в исследованных галлиевых сплавах удовлетворительно описываются следующими уравнениями:

$$\lg f = 5.32 - 9020 \cdot T^{-1}, (\text{Ga}, 648 - 1100 \text{ K}) \quad (3)$$

$$\lg f = 9.37 - 12900 \cdot T^{-1}, (\text{Ga} - \text{In}, 693 - 940 \text{ K}) \quad (4)$$

$$\lg f = 5.32 - 9020 \cdot T^{-1}, (\text{Ga} - \text{Al}, 604 - 1036 \text{ K}) \quad (5)$$

$$\lg f = 4.20 - 7240 \cdot T^{-1}, (\text{Ga} - \text{Sn}, 645 - 1048 \text{ K}) \quad (6)$$

$$\lg f = 8.01 - 8150 \cdot T^{-1}, (\text{Ga} - \text{Zn}, 701 - 928 \text{ K}) \quad (7)$$

Сравнение коэффициентов активности циркония в сплавах различного состава представлено на рис. 1.

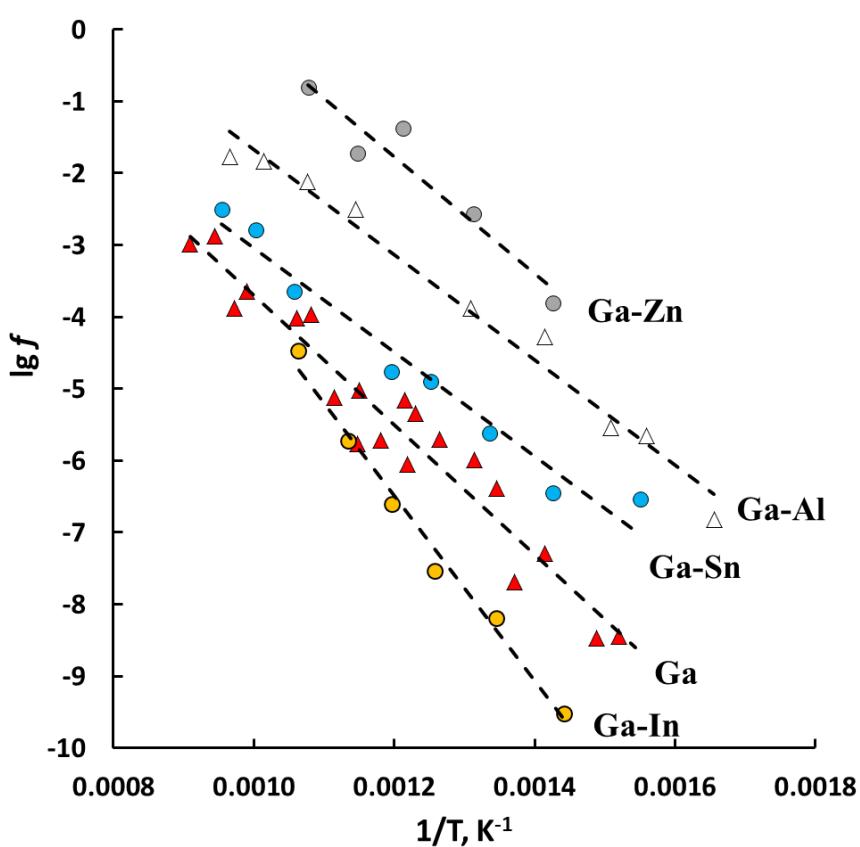


Рисунок 1 - Коэффициенты активности циркония в сплавах с галлием и эвтектическими смесями Ga-In, Ga-Al, Ga-Sn и Ga-Zn

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.14.6>

Примечание: состав основы сплава указан на графике для каждого набора данных

Коэффициенты активности закономерно возрастают с увеличением температуры. Видно, что добавление к галлию олова, алюминия или цинка приводит к увеличению коэффициентов активности циркония, что указывает на ослабление взаимодействия циркония со сплавом-растворителем. Добавки индия, наоборот, уменьшают коэффициенты циркония. Это свидетельствует о том, что взаимодействие циркония со сплавом Ga-In более сильное, чем с чистым галлием.

Заключение

На основании экспериментально определённых значений активности и растворимости циркония в сплавах с галлием и эвтектическими смесями Ga–In, Ga–Al, Ga–Z, и Ga–Sn рассчитаны коэффициенты активности циркония в указанных системах. Установлено, что добавка второго легкоплавкого металла оказывает влияние на коэффициенты активности циркония в галлиевых сплавах. Коэффициенты активности циркония возрастают в ряду сплавов на основе Ga–In < Ga < Ga–Sn < Ga–Al < Ga–Zn. Добавки олова, алюминия и цинка приводят к ослаблению взаимодействия циркония со сплавом, а добавки индия – к усилению. Различие в коэффициентах активности указывает на возможность использования добавки второго легкоплавкого металла для подбора сплава с максимальной разницей в коэффициентах активности циркония и урана с целью выбора достижения более глубокого разделения указанных металлов в системе «солевой расплав — жидкий металлический сплав».

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть представлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Gutorova S.V. Modern trends in spent nuclear fuel reprocessing and waste fractionation. / S.V. Gutorova, M.V. Logunov, Yu.A. Voroshilov // Russian Journal of General Chemistry. — 2024. — 94. — P. 243–430.
2. Volkovich V.A. Thermodynamics of rare earth elements and uranium in gallium based quaternary metallic alloys. / V.A. Volkovich, D.S. Maltsev, E.V. Raguzina // Journal of Alloys and Compounds. — 2019. — 787. — P. 367–378.
3. Novoselova A. Mechanism of metallic uranium and bimetallic U-Ga, U-Cd alloys electrodeposition in molten LiCl-KCl-CsCl eutectic. / A. Novoselova, V. Smolenski, V.A. Volkovich // Journal of the Electrochemical Society. — 2023. — 170. — P. 033501.
4. Novoselova A. Cathode processes and uranium electrochemical extraction on W and Ga electrodes in LiCl-KCl melt. / A. Novoselova, V. Smolenski // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — 2025. — 334. — P. 67–78.
5. Zhang H. Application of liquid Ga-Pb cathode for selective separation of samarium fission products from molten alkali metal chlorides. / H. Zhang, Q. Liu, A. Novoselova // Separation and Purification Technology. — 2024. — 331. — P. 125671.
6. Liu K. Electroseparation of uranium from lanthanides (La, Ce, Pr, Nd and Sm) on liquid gallium electrode. / K. Liu, Y.-L. Liu, Z.-F. Chai et al. // Separation and Purification Technology. — 2021. — 265. — P. 118524.
7. Liu K. Liquid electrodes for An/Ln separation in pyroprocessing. / K. Liu, Z.-F. Cha, W.-Q. Shi // Journal of the Electrochemical Society. — 2021. — 168. — P. 032507.
8. Xu H. Molten salt/liquid metal extraction: electrochemical behaviors and thermodynamics properties of La, Pr, U and separation factors of La/U and Pr/U couples in liquid gallium cathode. / H. Xu, W. Zhang, C. Wang // Applied Radiation and Isotopes. — 2022. — 182. — P. 110149.
9. Volkovich V.A. Separation of uranium and zirconium in alkali chloride melts using liquid metal cathodes. / V.A. Volkovich, D.S. Maltsev, M.N. Soldatova // ECS Transactions. — 2020. — 98. — P. 355–364.
10. Volkovich V.A. Application of low melting metals for separation of uranium and zirconium in a “fused chloride–liquid alloy system. / V.A. Volkovich, D.S. Maltsev, M.N. Soldatova // Metals. — 2021. — 11. — P. 550.
11. Лебедев В.А. Избирательность жидкокометаллических электрородов в расплавленных галогенидах / В.А. Лебедев. — Челябинск: Металлургия, 1993. — 232 с.
12. Лебедев В.А. Термохимия сплавов редкоземельных металлов и актиноидных элементов / В.А. Лебедев, В.И. Кобер, Л.Ф. Ямщикова. — Челябинск: Металлургия, 1989. — 336 с.
13. Волкович В.А. Активность циркония в сплавах с легкоплавкими металлами. / В.А. Волкович, М.Н. Новикова, А.В. Яковлев и др. // Электрохимия в распределенной и атомной энергетике; — Екатеринбург: Ажур, 2023. — С. 90–94.
14. Dedyukhin A.S. Lanthanum activity, activity coefficients and solubility in gallium-indium liquid alloys. / A.S. Dedyukhin, A.V. Shchetinskiy, V.A. Volkovich // ECS Transactions. — 2014. — 64. — P. 227–234.
15. Dedyukhin A.S. Thermodynamic properties of lanthanum in gallium-zinc alloys. / A.S. Dedyukhin, I.E. Shepin, E.A. Kharina // AIP Conference Proceedings. — 2016. — 1767. — P. 020006.
16. Dedyukhin A.S. Lanthanum solubility in gallium-aluminum liquid alloys. / A.S. Dedyukhin, E.A. Kharina, A.V. Shchetinskiy // AIP Conference Proceedings. — 2017. — 1886. — P. 020065.
17. Dedyukhin A.S. Solubility of lanthanum and uranium in Ga-In and Ga-Al eutectic based alloys. / A.S. Dedyukhin, E.A. Kharina, E.V. Raguzina // AIP Conference Proceedings. — 2018. — 2015. — P. 020019.
18. Ismailov M.Sh. Solubility of praseodymium in the gallium-aluminum eutectic alloy. / M.Sh. Ismailov, S.Yu. Melchakov, M.E. Usoltsev // AIP Conference Proceedings. — 2018. — 2015. — P. 020032.
19. Dedyukhin A.S. Neodymium solubility in gallium-zinc eutectic alloy. / A.S. Dedyukhin, E.A. Kharina, A.V. Shchetinskiy // AIP Conference Proceedings. — 2019. — 2174. — P. 020018.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gutorova S.V. Modern trends in spent nuclear fuel reprocessing and waste fractionation. / S.V. Gutorova, M.V. Logunov, Yu.A. Voroshilov // Russian Journal of General Chemistry. — 2024. — 94. — P. 243–430.
2. Volkovich V.A. Thermodynamics of rare earth elements and uranium in gallium based quaternary metallic alloys. / V.A. Volkovich, D.S. Maltsev, E.V. Raguzina // Journal of Alloys and Compounds. — 2019. — 787. — P. 367–378.
3. Novoselova A. Mechanism of metallic uranium and bimetallic U-Ga, U-Cd alloys electrodeposition in molten LiCl-KCl-CsCl eutectic. / A. Novoselova, V. Smolenski, V.A. Volkovich // Journal of the Electrochemical Society. — 2023. — 170. — P. 033501.
4. Novoselova A. Cathode processes and uranium electrochemical extraction on W and Ga electrodes in LiCl-KCl melt. / A. Novoselova, V. Smolenski // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — 2025. — 334. — P. 67–78.
5. Zhang H. Application of liquid Ga-Pb cathode for selective separation of samarium fission products from molten alkali metal chlorides. / H. Zhang, Q. Liu, A. Novoselova // Separation and Purification Technology. — 2024. — 331. — P. 125671.
6. Liu K. Electroseparation of uranium from lanthanides (La, Ce, Pr, Nd and Sm) on liquid gallium electrode. / K. Liu, Y.-L. Liu, Z.-F. Chai et al. // Separation and Purification Technology. — 2021. — 265. — P. 118524.
7. Liu K. Liquid electrodes for An/Ln separation in pyroprocessing. / K. Liu, Z.-F. Cha, W.-Q. Shi // Journal of the Electrochemical Society. — 2021. — 168. — P. 032507.
8. Xu H. Molten salt/liquid metal extraction: electrochemical behaviors and thermodynamics properties of La, Pr, U and separation factors of La/U and Pr/U couples in liquid gallium cathode. / H. Xu, W. Zhang, C. Wang // Applied Radiation and Isotopes. — 2022. — 182. — P. 110149.
9. Volkovich V.A. Separation of uranium and zirconium in alkali chloride melts using liquid metal cathodes. / V.A. Volkovich, D.S. Maltsev, M.N. Soldatova // ECS Transactions. — 2020. — 98. — P. 355–364.
10. Volkovich V.A. Application of low melting metals for separation of uranium and zirconium in a “fused chloride–liquid alloy system. / V.A. Volkovich, D.S. Maltsev, M.N. Soldatova // Metals. — 2021. — 11. — P. 550.
11. Lebedev V.A. Izbiratel'nost' zhidkometallicheskix e'lektrodov v rasplavlennyx galogenidax [Selectivity of liquid metal electrodes in molten halides] / V.A. Lebedev. — Chelyabinsk: Metallurgiya, 1993. — 232 p. [in Russian]
12. Lebedev V.A. Termoximiya splavov redkozemel'nyx metallov i aktinoidnyx e'lementov [Thermochemistry of rare earth metal alloys and actinoid elements] / V.A. Lebedev, V.I. Kober, L.F. Yamshhikov. — Chelyabinsk: Metallurgiya, 1989. — 336 p. [in Russian]
13. Volkovich V.A. Aktivnost' cirkoniya v splavax s legkoplavkimi metallami [Zirconium activity in alloys with low-melting metals]. / V.A. Volkovich, M.N. Novikova, A.V. Yakovlev et al. // Electrochemistry in distributed and nuclear power engineering; — Ekaterinburg: Azhur, 2023. — P. 90–94. [in Russian]
14. Dedyukhin A.S. Lanthanum activity, activity coefficients and solubility in gallium-indium liquid alloys. / A.S. Dedyukhin, A.V. Shchetinskiy, V.A. Volkovich // ECS Transactions. — 2014. — 64. — P. 227–234.
15. Dedyukhin A.S. Thermodynamic properties of lanthanum in gallium–zinc alloys. / A.S. Dedyukhin, I.E. Shepin, E.A. Kharina // AIP Conference Proceedings. — 2016. — 1767. — P. 020006.
16. Dedyukhin A.S. Lanthanum solubility in gallium-aluminum liquid alloys. / A.S. Dedyukhin, E.A. Kharina, A.V. Shchetinskiy // AIP Conference Proceedings. — 2017. — 1886. — P. 020065.
17. Dedyukhin A.S. Solubility of lanthanum and uranium in Ga-In and Ga-Al eutectic based alloys. / A.S. Dedyukhin, E.A. Kharina, E.V. Raguzina // AIP Conference Proceedings. — 2018. — 2015. — P. 020019.
18. Ismailov M.Sh. Solubility of praseodymium in the gallium-aluminum eutectic alloy. / M.Sh. Ismailov, S.Yu. Melchakov, M.E. Usoltsev // AIP Conference Proceedings. — 2018. — 2015. — P. 020032.
19. Dedyukhin A.S. Neodymium solubility in gallium-zinc eutectic alloy. / A.S. Dedyukhin, E.A. Kharina, A.V. Shchetinskiy // AIP Conference Proceedings. — 2019. — 2174. — P. 020018.