## = ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ =

УДК 669.4

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЖИДКИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ЛИТИЙ–СВИНЕЦ

## © А. Г. Морачевский, Е. Г. Фирсова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 E-mail: morachevski@mail.ru

> Поступила в Редакцию 30 марта 2021 г. После доработки 12 апреля 2021 г. Принята к публикации 19 мая 2021 г.

Сплавы лития со свинцом представляют основной интерес в жидком состоянии, они служат объектом многочисленных исследований и описаний структурной упорядоченности в жидкой фазе, перспективны для использования в жидкометаллических системах преобразования энергии, в ядерной энергетике. В данной работе суммированы и анализируются результаты исследований термодинамических свойств жидких сплавов системы Li–Pb, выполненных различными методами за период с 1973 по 2018 г. Обработка всей совокупности экспериментальных данных позволила рекомендовать значения термодинамических функций интервала составов, представляющих интерес для технологических целей ( $0 \le x_{Li} \le 0.50$ , с «шагом» 0.05). Результаты расчетов представлены в табличной форме и описаны с помощью полиномов.

Ключевые слова: система литий-свинец; фазовая диаграмма; жидкие сплавы; термодинамические свойства

DOI: 10.31857/S0044461821060013

В последние десять лет возобновился интерес к разработке жидкометаллических батарей для стационарных накопителей энергии [1, 2]. В качестве анодного материала в них предполагается использовать литий, материал катода — сплавы на основе свинца.

Литий и свинец образуют между собой ряд соединений, составы которых неоднократно уточнялись. По данным [3], в системе образуются два соединения, плавящихся конгруэнтно: LiPb (т. пл. 755 K), Li<sub>10</sub>Pb<sub>3</sub> (т. пл. 1001 K). Три соединения: Li<sub>5</sub>Pb<sub>2</sub>, Li<sub>3</sub>Pb и Li<sub>4</sub>Pb — плавятся с разложением. В богатой свинцом области составов имеется относительно легкоплавкая эвтектика ( $x_{Li} = 0.157, 508$  K) [3, 4]. Соединения Li<sub>10</sub>Pb<sub>3</sub> и β-LiPb имеют области гомогенности (рис. 1).

В работе [5] при оптимизации термодинамических свойств системы Li–Pb методом CALPHAD, исходя



Рис. 1. Фазовая диаграмма системы литий–свинец (по данным работы [3]).

из первых принципов, авторы после детального анализа всех имеющихся в литературе структурных и кристаллографических исследований твердых фаз приняли существование в системе Li–Pb несколько других по составу соединений: Li<sub>4</sub>Pb (Li<sub>22</sub>Pb<sub>5</sub>), Li<sub>7</sub>Pb<sub>2</sub>, Li<sub>3</sub>Pb, Li<sub>5</sub>Pb<sub>2</sub>, LiPb. Авторы [5] учитывали также имеющиеся в литературе сведения о структуре жидких фаз [6, 7].

Термодинамические свойства жидких сплавов системы Li–Pb изучались неоднократно различными методами, первое исследование выполнено в 1973 г. [8], последнее из известных нам опубликовано в 2018 г. [9]. Особенности применения различных методов исследования термодинамических свойств жидких сплавов рассмотрены в целом ряде работ [10–13]. Специально термодинамическим свойствам жидких сплавов лития посвящен обзор [14]. Основные исследования жидких сплавов лития со свинцом суммированы в табл. 1.

Для использования экспериментальных данных при термодинамических расчетах технологического характера выбрана температура 923 К (650°С), интервал составов  $0.05 \le x_{\text{Li}} \le 0.50$  с «шагом» 0.05.

При изучении термодинамических свойств жидких сплавов лития наиболее полное описание системы получено методом измерения электродвижущих сил (ЭДС) концентрационных цепей с расплавленным электролитом:

Все выполненные методом ЭДС работы (табл. 1) охватывают необходимый интервал составов, но имеют свои особенности. В работе [8] значения ЭДС при 923 К приходится получать методом экстраполяции. В работе [16] в качестве электрода сравнения использовался не литий, а висмут, насыщенный соединением Li<sub>3</sub>Bi. Это исключает возможность получать непосредственно в ходе эксперимента величину dE/dT, измерения выполнены при четырех фиксированных температурах: 770, 812, 869 и 932 К. Значения парциальной молярной энтропии смешения ( $\Delta S_{Li}$ ) рассчитывались путем обработки методом наименьших квадратов данных лишь для четырех температур. В работе [19] результаты исследования представлены только в виде графиков, что не позволяет их использовать при оценке усредненных значений ЭДС.

В табл. 2 сопоставлены значения ЭДС цепи при 923 К, рассчитанные на основании экспериментальных работ [8, 15, 16] и принятые с помощью различных приемов усреднения величины ЭДС для последующих расчетов термодинамических свойств жидких сплавов системы Li–Pb.

В соответствии с известными классификациями жидких сплавов Зауэрвальда, Дутчака, Васеды [12] сплавы лития со свинцом относятся к системам с выраженным взаимодействием компонентов в жидком состоянии. Это подтверждается также результатами структурных исследований [6, 7]. Из числа термодинамических функций наиболее структурночувствительной является парциальная молярная энтропия смешения. Ее отрицательные значения приводят к отрицательным величинам интегральной энтропии смешения в области образования наиболее прочных интерметаллических соединений. Как видно из рис. 2, результаты определения  $\Delta S_{\text{Li}}$  в работе [20] этим условиям не удовлетворяют. Кроме того, полученные величины ЭДС имеют заметное систематическое отклонение от данных других авторов (табл. 2). При оценке средних значений ЭДС результаты работы [20] во внимание не принимались. Среднее абсолютное отклонение данных работы [8] от принятых значений ЭДС составило 1.30%, работы [15] — 1.28%, работы [16] — 0.47%.

#### Таблица 1

Метод	Область составов x <sub>Li</sub>	Температура, К	Год	Литературный источник
ЭДС	0.030-0.593	783–833	1973	[8]
ЭДС	0.038-0.908	783–1103	1976	[15]
ЭДС	0.0019-0.9492	770–932	1978	[16]
Калориметрия	0.0114-0.9689	1000	1979	[17]
Давление пара	0.050-0.950	700–900	1979	[18]
ЭДС	0.0–0.740	780–900	1981	[19]
ЭДС	0.025–0.965	775–975	2001	[20]
Калориметрия	0.0–1.0	817, 923, 1021, 1023	2018	[9]

Сводка исследований термодинамических свойств жидких сплавов системы литий-свинец

				I I	I JI I I I I I I I I I I I I I I I I I
x <sub>Li</sub>	[8]	[15]	[16]	[20]	Принятое значение *
0.05	0.730	0.720	0.724	0.761	0.724
0.10	0.670	0.652	0.655	0.679	0.659
0.15	0.624	0.604	0.615	0.629	0.614
0.20	0.595	0.568	0.582	0.598	0.582
0.25	0.556	0.539	0.548	0.567	0.548
0.30	0.520	0.514	0.520	0.537	0.519
0.35	0.485	0.488	0.490	0.508	0.488
0.40	0.452	0.460	0.458	0.479	0.459
0.45	0.420	0.436	0.426	0.450	0.427
0.50	0.396	0.410	0.398	0.418	0.401

Таблица 2 Величины ЭДС цепи (1) по данным различных исследований при температуре 923 К (В)

\* По данным работ [8, 15, 16].

Анализ экспериментальных данных работы [19], в которой исследование термодинамических свойств жидких сплавов системы Li–Pb проводилось методом ЭДС при температурах 800 и 900 К, ставит под сомнение возможность столь глубокого локального минимума на кривой  $\Delta S_{\text{Li}} = f(x_{\text{Li}})$ . Следует с большой осторожностью подходить к оценке парциальной молярной энтропии компонента на границе области гетерогенности и внутри ее.

В табл. 3 приведены парциальные и интегральные молярные характеристики жидких сплавов систе-



Рис. 2. Зависимость парциальной молярной энтропии лития ( $\Delta S_{\text{Li}}$ , Дж·моль<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) от состава сплава при 923 К по данным различных исследований: 1 - [8], 2 - [15], 3 - [16], 4 - [20].

мы Li–Pb при 923 К в соответствии с указанными в табл. 2 усредненными значениями ЭДС. Графически зависимость  $\Delta G^{\mu_{36}}$  и  $\Delta G$  от состава сплава при 923 К представлена на рис. 3.

Зависимость  $\Delta G^{\mu_{3}\delta} = f(x_{Li})$  может быть описана с помощью уравнения Редлиха–Кистера различной степени с использованием безразмерной *Q*-функции ( $Q = \Delta G^{\mu_{3}\delta}/RT$ ) [12].

$$Q = x(1-x)[b + c(2x-1) + d(2x-1)^2],$$
(2)

$$Q = x(1-x)[b + c(2x-1) + d(2x-1)^2 + e(2x-1)^3], (3)$$

$$Q = x(1-x)[b + c(2x-1) + d(2x-1)^{2} + e(2x-1)^{3} + f(2x-1)^{4}].$$
 (4)



Рис. 3. Зависимость интегральных молярных энергии Гиббса и избыточной энергии Гиббса от состава сплава Li–Pb при 923 K, рассчитанных из усредненных значений ЭДС: 1 — ∆G, 2 — ∆G<sup>изб</sup> (кДж·моль<sup>-1</sup>).

Термодинамические свойства жидких сплавов системы Li–Pb при 923 К (все величины в кДж·моль <sup>-1</sup> )					
x <sub>Li</sub>	$-\Delta G_{\mathrm{Li}}$	$-\Delta G^{ m H36}$ Li	$-\Delta G$	$-\Delta G^{ m H36}$	
0.05	69.91	46.94	3.89	2.43	
0.10	63.59	45.90	7.25	4.75	
0.15	59.29	44.73	10.24	7.01	
0.20	56.12	43.78	13.01	9.17	
0.25	52.84	42.21	15.62	11.28	
0.30	50.07	40.82	17.98	13.29	
0.35	47.06	39.01	20.14	15.17	
0.40	44.27	37.23	22.08	16.91	
0.45	41.23	35.11	23.79	18.51	
0.50	38.73	33.41	25.20	19.88	

**Таблица 3** Гермодинамические свойства жидких сплавов системы Li–Pb при 923 К (все величины в кДж·моль<sup>-1</sup>)

## Таблица 4 Параметры уравнений (2)–(4) для системы литий–свинец при 923 К

Уравнение	Параметры уравнения					
	b	С	d	е	f	
(2)	-10.336812	-6.230273	-2.423839			
(3)	-10.349447	-6.541102	-3.543058	-0.986443		
(4)	-10.357933	-7.011765	-6.639899	-7.296577	-3.940938	

В данном случае x = x<sub>Li</sub>. Параметры уравнений (2)–(4) приведены в табл. 4.

Коэффициент корреляции ( $R^2$ ) высокий: 0.999760 (2), 0.999984 (3) и 0.999993 (4). Экспериментальные и расчетные значения безразмерного параметра Q сопоставлены в табл. 5.

Важной в технологическом отношении и для общей характеристики отклонений от идеального поведения является величина предельного коэффициента активности лития в жидком свинце [21]. Эта величина на основании экспериментальных данных может быть получена экстраполяцией до  $x_{Li} = 0$  кривых  $ln\gamma_{Li} = f(x_{Li}), \Delta G^{\mu_3 \sigma}_{Li} = f(x_{Li}), ln\gamma_{Li} = f(1 - x_{Li})^2$ . При обработке экспериментальных данных с применением полиномов Редлиха–Кистера необходимость в экстраполяции кривых отпадает. Величина  $ln\gamma^{\infty}_{Li}$  может быть рассчитана с помощью следующих уравнений:

$$\ln\gamma^{\infty}_{\rm Li} = b - c + d, \tag{5}$$

$$\ln\gamma^{\infty}_{\mathrm{Li}} = b - c + d - e, \qquad (6)$$

$$\ln\gamma^{\infty}_{\rm Li} = b - c + d - e + f. \tag{7}$$

Расчет  $\ln \gamma^{\infty}_{Li}$  приводит к близким результатам: -6.5304 (5), -6.3650 (6), -6.6304 (7). Среднее значение

## Таблица 5

Сопоставление экспериментального ( $Q^{3kc}$ ) и расчетных значений параметра Q по уравнениям (2)–(4) в системе литий–свинец при 923 К

x <sub>Li</sub>	<i>Q</i> экс	<i>Q</i> по уравнению			
		(2)	(3)	(4)	
0.10	-0.6190	-0.6214	-0.6191	-0.6189	
0.20	-1.1950	-1.1970	-1.1980	-1.1961	
0.30	-1.7319	-1.7288	-1.7297	-1.7323	
0.40	-2.2036	-2.2051	-2.2020	-2.2006	
0.50	-2.5906	-2.5842	-2.5873	-2.5895	

 $\ln\gamma^{\infty}_{Li} = -6.5086$ ,  $\gamma^{\infty}_{Li} = 0.00149$ . Некоторый разброс значений  $\ln\gamma^{\infty}_{Li}$ , по нашим наблюдениям, связан с тем, что в системах с сильным взаимодействием компонентов в области сильноразбавленных растворов (0 < x < 0.05) величина Q практически линейно зависит от состава, описание этой области с помощью полиномиальных зависимостей затруднительно.

Экстраполяция функции вида ( $Q/x_{Li}x_{Pb}$ ) =  $f(x_{Li})$  до  $x_{Li} = 0$  представлена на рис. 4. При  $x_{Li} = 0$  величина  $\ln\gamma^{\infty}_{Li}$  оказывается равной –6.48,  $\gamma^{\infty}_{Li} = 0.00153$ , что хорошо согласуется с указанным выше средним значением  $\ln\gamma^{\infty}_{Li}$ .

Вычисленные из первых принципов значения активности лития в жидких сплавах со свинцом [5] вполне согласуются с данными экспериментальных исследований [8, 15, 16, 20] в интервале температур 750–850 К.

Рассмотрим имеющиеся сведения об энтальпии смешения жидких сплавов системы литий–свинец. Подробное калориметрическое исследование при 1000 К представлено в работе [17]. Экстремум кривой  $\Delta H = f(x_{\text{Li}})$  лежит при  $x_{\text{Pb}} = 0.22$ . Полученные значения  $\Delta H$  хорошо согласуются с данными работы [8] (рис. 5) и других исследований, выполненных методом ЭДС [15, 16]. На основании формы кривой  $d\Delta H/dx_{\text{Pb}} = f(x_{\text{Pb}})$  авторы [17] делают вывод об образовании в жидкой фазе ассоциатов Li<sub>7</sub>Pb<sub>2</sub>. Имеющиеся в литературе сведения о теплоемкости жидких сплавов системы Li–Pb и об энтальпиях плавления соединений Li<sub>7</sub>Pb<sub>2</sub> и LiPb рассмотрены в работе [12].

В работе [9] термодинамические свойства жидких сплавов системы Li–Pb изучались калориметрическим методом во всем интервале составов при температурах 817, 923, 1021, 1023 К. На основании полученных значений энтальпии смешения при различных температурах рассчитаны парциальные молярные избыточные энергия Гиббса и энтропия смешения при 1073 К. Вычисленные из калориметрических измерений значения парциальной молярной избыточной энергии Гиббса и коэффициента активности лития близки к усредненным из измерений ЭДС при 923 К (табл. 6).

Расхождения между значениями  $\Delta G^{\mu_{36}}L_i$ , рассчитанными из измерений ЭДС и из калориметрических данных [9], не носят систематического характера и лежат в пределах от 0.9 до 2.4%. Коэффициент активности лития при бесконечном разбавлении, вычисленный из калориметрических данных [21], равен:  $\ln\gamma^{\infty}L_i = -6.334$ ,  $\gamma^{\infty}L_i = 0.00178$  (923 K).

Структурные особенности жидких сплавов системы Li–Pb, физико-химические и другие свойства их подтверждающие, подробно рассмотрены в работах



Рис. 4. Зависимость безразмерной функции *Q*/*x*<sub>Li</sub>*x*<sub>Pb</sub> от состава сплава при 923 К.



Рис. 5. Зависимость энтальпии смешения (∆*H*, кДж·моль<sup>-1</sup>) от состава сплава Li–Pb по калориметрическим данным (1000 K, [17]) и рассчитанной из измерений ЭДС (800 K, [8]): *1* — [17], *2* — [8].

[12, 22–24]. Упомянем только некоторые исследования более позднего времени.

Большое внимание в ряде работ уделяется изучению разнообразных свойств эвтектической смеси в богатой свинцом области составов в жидком состоянии [25–28]. С использованием модели молекулярной динамики в работах [26, 27] оцениваются некоторые термодинамические характеристики чистых компонентов и сплавов лития со свинцом. Особый интерес в этом отношении представляет обзор [28] (43 ссылки на работы разных лет), в котором суммируются сведения об исследованиях свойств эвтектического сплава в системе Li–Pb (15.7–17.0 ат% Li): плотность, удель-

F						
x <sub>Li</sub>	$-\Delta G^{_{\mathrm{H3}\mathrm{G}}}{}_{\mathrm{Li}}$ , кДж·моль $^{-1}$		$-ln\gamma_{Li}$			
	ЭДС	[9]	ЭДС	[9]		
0.10	45.90	46.83	5.981	6.102		
0.20	43.78	44.68	5.705	5.822		
0.30	40.82	41.83	5.319	5.451		
0.40	37.23	37.90	4.851	4.939		
0.50	33.41	33.10	4.354	4.313		

Таблица 6 Сопоставление принятых величин на основании измерений ЭДС и рассчитанных из калориметрических измерений [9] (923 K)

ная теплоемкость, теплопроводимость, динамическая вязкость, объемный коэффициент термического расширения, поверхностное натяжение, электрическое сопротивление, давление пара.

В заключительной части сообщения укажем работы, в которых исследовался процесс сплавообразования при выделении лития на жидком свинцовом катоде [29, 30]. Потенциал выделения лития из расплавленного электролита LiCl–KCl эвтектического состава при плотности тока 0.1А·см<sup>-2</sup> и температуре 673 К равен 0.64 В относительно литиевого электрода сравнения. Предельная плотность тока значительно зависит от условий эксперимента, она может достигать 4 А·см<sup>-2</sup> [29].

Авалиани с соавторами [30] на основании измерения потенциалов выделения лития из расплавленного электролита LiCl–KCl при 773 К на жидких катодахсплавах Li–Pb (0.107  $\leq x_{Li} \leq 0.375$ ) рассчитаны термодинамические характеристики исходных сплавов ( $\Delta G_{Li}$ ,  $\alpha_{Li}$ ,  $\gamma_{Li}$ ). Как видно из рис. 6, полученные ве-



Рис. 6. Парциальная молярная энергия Гиббса лития ( $\Delta G_{\text{Li}}$ , 773 K, кДж·моль<sup>-1</sup>) по данным поляризационных измерений [31] и рассчитанная из измерений ЭДС (800 K, [8]): *1* — [30], *2* — [8].

личины  $\Delta G_{\text{Li}}$  вполне удовлетворительно согласуются с результатами работы [8].

## Выводы

Математическая обработка всей совокупности опубликованных работ, содержащих исследования термодинамических свойств жидких сплавов лития со свинцом, позволила рекомендовать набор термодинамических характеристик системы при 923 К в интервале составов  $0.05 \le x_{\text{Li}} \le 0.50$  с «шагом» 0.05. Рекомендуемые величины описаны с применением полинома Редлиха–Кистера различных степеней.

#### Конфликт интересов

А. Г. Морачевский заявляет, что он является членом редколлегии Журнала прикладной химии. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

## Информация об авторах

*Морачевский Андрей Георгиевич*, д.т.н., проф., ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7122-9932 *Фирсова Елена Германовна*, к.т.н., доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4563-3376

## Список литературы

 Kim H., Boysen D. A., Newhouse J. M., Spatocco B. L., Chung B., Burke P. J., Bradwell D. J., Jiang K., Tomaszowska A. A., Wang K., Wei W., Ortiz L. A., Barrida S. A., Poizeau S. M., Sadoway D. R. Liquid metal batteries: Fast, present, and future // Chem. Rev. 2013. V. 138. P. 2075–2093. https://doi.org/10.1021/or2002051

https://doi.org/10.1021/cr300205k

[2] Wang K., Jiang K., Chung B., Ouchi T., Burke P.J., Boysen D. A., Bradwell D. J., Kim H., Muecke U., Sadoway D. R. Lithium–antimony–lead liquid metal battery for grid-level energy storage // Nature. 2014. V. 514. N 7522. P. 348–350. https://doi.org/10.1038/nature13700

[3] Okamoto H. Li–Pb (Lithium–Lead) // J. Phase

- Equibria. 1993. V. 14. N 6. P. 770.
- [4] Hubberstey P., Sample T., Barker M. G. Is Pb–17Li really the eutectic alloy? A determination of the leadrich section of the Pb–Li phase diagram (0.0 ≤ x<sub>Li</sub> ≤ ≤0.221)// J. Nucl. Mater. 1992. V. 191–194. P. 283–287.
- [5] Zhou C., Guo C., Li C., Du Z. Thermodynamic optimization of the Pb–Li system aided by firstprinciples calculations // J. Nucl. Mater. 2016. V. 477. P. 95–101. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.04.061
- [6] Ruppersberg H., Egger H. Short-range order in liquid Li–Pb alloys // J. Chem. Phys. 1975. V. 63. P. 4095– 4103.
- [7] Ruppersberg H., Schirmacher W. Ordering potential in liquid Li<sub>4</sub>Pb and Li<sub>7</sub>Ag calculated from neutron diffraction data // J. Phys. F: Met. Phys. 1984. V. 14. P. 2787–2795.
- [8] Демидов А. И., Морачевский А. Г., Герасименко Л. Н. Термодинамические свойства жидких сплавов системы литий–свинец // Электрохимия. 1973. Т. 9. С. 848–851.
- [9] Terlicka S., Debski A., Gasior W. Thermodynamic properties of Li-Pb system // J. Mol. Liq. 2018.
   V. 249. P. 66-72.

https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.013

- [10] Komarek K. L. Experimental techniques in high temperature thermodynamics // Pure Appl. Chem. 1992. V. 64. N 1. P. 93–102.
- [11] Морачевский А. Г., Воронин Г. Ф., Гейдерих В. А., Куценок И. Б. Электрохимические методы исследования в термодинамике металлических систем. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 334 с.
- [12] Морачевский А. Г., Фирсова Е. Г. Термодинамика жидких металлов и сплавов. СПб: Лань, 2016. 240 с.
- [13] Sommer F. Modern methods in high temperature calorimetry // J. Thermal Analysis. 1988. V. 33. N 1. P. 15–28.
- [14] Морачевский А. Г., Демидов А. И. Термодинамические свойства жидких сплавов лития // ЖФХ. 1983. Т. 57. № 9. С. 2113–2128.
- [15] Яценко С. П., Салтыкова Е. А. Термодинамические свойства жидких сплавов системы литий–свинец // ЖФХ. 1976. Т. 50. № 8. С. 2129–2130.
- [16] Saboungi M.-L., Marr J., Blander M. Thermodynamic properties of quasi-ionic alloy from electromotive force measurements: The Li–Pb system // J. Chem. Phys. 1978. V. 68. N 4. P. 1375–1384.
- [17] Predel B., Oehme G. Kalorimetrische Untersuchung flussiger Lithium-Blei-Legierungen // Z. Metallkunde. 1979. Bd 70. N 7. S. 450–453.

- [18] Neubert A. Thermodynamic study of solid and liquid lithium-lead alloys using Knudsen-effusion mass spectrometry // J. Chem. Thermodyn. 1979. V. 11. N 10. P. 971–977.
- [19] Becker W., Schwitzgebel G., Ruppersberg H. Thermodynamic investigations of liquid Li–Pb and Li– Ag-alloys — a comparative study // Z. Metallkunde. 1981. Bd 7. N 3. S. 186–190.
- [20] Gasior W., Moser Z. Thermodynamic study of liquid lithium–lead alloys using the EMF method // J. Nucl. Mater. 2001. V. 294. P. 77–83. https://doi.org/10.1016/S0022-3115(01)00440-8
- [21] Морачевский А. Г. Термодинамические свойства разбавленных растворов различных элементов в жидком свинце // ЖПХ. 2014. Т. 87. № 12. С. 1697– 1718 [Morachevskii A. G. Thermodynamic properties of dilute solutions of various elements in liquid lead // Russ. J. Appl. Chem. 2014. V. 87. N 12. P. 1783–1803. https://doi.org/10.1134/S1070427214120015
- [22] Белащенко Д. К. Структура жидких и аморфных металлов. М.: Металлургия, 1985. 192 с.
- [23] Морачевский А. Г., Козин Л. Ф. Термодинамика ассоциированных расплавов // Термодинамика и материаловедение полупроводников / Под ред. В. М. Глазова. М.: Металлургия, 1992. С. 53–74.
- [24] Saboungi M.-L., Geerstma W., Price D. L. Ordering in liquid alloys // Ann. Rev. Phys. Chem. 1990. V. 41. P. 207–244.
- [25] Mas de les Vall E. Lead–lithium eutectic material database for nuclear fusion technology // J. Nucl. Mater. 2008. V. 376. P. 353–357. https://doi.org/10.1016/J.JNUCMAT.2008.02.016
- [26] Fraile A., Cuesta-Lopez S., Perlado J. M. Molecular dinamics simulations of lead and lithium in liquid phase // Trans. Fusion Sci. Technol. 2012. V. 61. January. P. 77–82. https://doi.org/10.13182/FST12-A13400
- [27] Gan X., Xiao S., Deng H., Wang B., Sun X., Li X., Hu W. Thermodynamic properties of Li, Pb, Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> with molecular dynamics simulations // Fusion Eng. Design. 2014. V. 89. P. 2946–2952. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.09.016
- [28] Martelli D., Venturini A., Utili M. Literature review of lead–lithium thermophysical properties // Fusion Eng. Design. 2019. V. 138. P. 183–195. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.11.028
- [29] Темногорова Н. В., Демидов А. И., Морачевский А. Г. Исследование процесса выделения лития на жидких металлических катодах // Изв. вузов. Цв. металлургия. 1979. № 3. С. 89–96.
- [30] Авалиани А. Ш., Кипиани Г. Н., Миндин В. Ю., Шулая Л. Н. Определение термодинамических свойств жидких сплавов лития из поляризационных измерений // ЖПХ. 1988. Т. 61. № 2. С. 401– 402.