

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 004.942.001.57

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-42-49

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК КАДМИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ СВИНЦА

Наврузов Х.П.<sup>1</sup>, Ганиев И.Н.<sup>1</sup>, Амонулло Х.<sup>2</sup>, Эшов Б.Б.<sup>3</sup>, Муллоева Н.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

<sup>2</sup>Таджикский технический университет им. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан

<sup>3</sup>Государственное научное учреждение «Центр исследования инновационных технологий при Национальной академии наук Таджикистана», Душанбе, Таджикистан

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы):** Повсеместно свинец и его сплавы применяется в гидрометаллургии, аккумуляторном производстве, гальванотехнике и ряде других областей. Свинцовый анод, как легированный, так и нелегированный, является неоднородной системой, и на пространственно разграниченных участках протекают два основных процесса, это выделение кислорода и окисление свинца. Для увеличения стойкости свинцового анода необходимо максимально облегчить первый процесс и затормозить второй. Одним из путей увеличения стойкости свинцового анода является его легирование другими металлами. В настоящей работе в качестве легирующей добавки к свинцу использован кадмий до 0.5мас.%. Электрохимические исследования свидетельствуют о положительном влиянии добавок кадмия на коррозионную устойчивость свинца. В литературе нет сведений о действии добавок кадмия на теплофизические свойства свинца. **Цель работы:** изучение влияния легирования свинца добавками кадмия и его влияние на теплофизические свойства свинца. **Используемые методы:** в работе исследования теплоемкости сплавов свинца с кадмием проведены в режиме «охлаждения» путем сравнения кривых охлаждения эталона (Pb марки С00) и исследуемых образцов. Расчёты проводились с применением компьютерной техники и программы «Sigma Plot». **Новизна:** впервые выполнены исследования влияния легирования свинца кадмием на теплофизические и термодинамические свойства сплавов. **Практическая значимость:** повышение теплоемкости и коэффициента теплоотдачи свинца при его легировании кадмием способствует улучшению качества работы электродов электролизных ванн и, в свою очередь, получаемой продукции.

**Ключевые слова:** свинец, кадмий, система Pb–Cd, теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи, режим «охлаждения», термодинамические функции.

© Наврузов Х.П., Ганиев И.Н., Амонулло Х., Эшов Б.Б., Муллоева Н.М., 2020

### Для цитирования

Влияние добавок кадмия на теплофизические свойства и термодинамические функции свинца / Наврузов Х.П., Ганиев И.Н., Амонулло Х., Эшов Б.Б., Муллоева Н.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 42–49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-42-49>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## INFLUENCE OF CADMIUM ADDITIVES ON THERMAL PROPERTIES AND THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF LEAD

Navruzov Kh.P.<sup>1</sup>, Ganiev I.N.<sup>1</sup>, Amonullo Kh.<sup>2</sup>, Eshov B.B.<sup>3</sup>, Mulloeva N.M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Nikitin Institute of Chemistry, the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

<sup>2</sup>Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan

<sup>3</sup>State Scientific Institution Center for Research of Innovative Technologies at the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

**Abstract. Problem Statement (Relevance):** Lead and its alloys are commonly used in hydrometallurgy, battery production, electroplating and a number of other areas. The lead anode, both alloyed and unalloyed one, is a heterogeneous system; in spatially delimited areas two main processes take place, namely oxygen evolution and lead oxidation. To increase the resistance of the lead anode, it is necessary to facilitate the first process to the maximum and slow down the second one. One of the methods aimed at increasing resistance of a lead anode is its alloying with other metals. In this research up to 0.5 wt% of cadmium was used as an alloying addition to lead. Electrochemical studies indicate a positive effect of cadmium additives on the corrosion resistance of lead. There is no information in the literature on the effect of cadmium additives on the thermal properties of lead. **Objective:** To study the effect of lead alloying with cadmium additives and its effect on the thermal properties of lead. **Methods Applied:** In the research the heat capacity of lead-cadmium alloys was studied in a "cooling" mode by comparing the cooling curves of the reference standard (Pb grade C00) and the samples under study. The calculations were carried out using computer technology and the Sigma Plot software. **Novelty:** For the first time, the effect of alloying of lead with cadmium on the thermal and thermodynamic properties of alloys. **Practical Relevance:** An increase in the heat capacity and heat transfer coefficient of lead, when alloyed with cadmium, helps to improve the performance quality of the electrodes of electrolysis baths and, consequently, the finished products.

**Keywords:** lead, cadmium, Pb-Cd system, heat capacity, heat transfer coefficient, "cooling" mode, thermodynamic functions.

### For citation

Navruzov Kh.P., Ganiev I.N., Amonullo Kh., Eshov B.B., Mulloeva N.M. Influence of Cadmium Additives on Thermal Properties and Thermodynamic Functions of Lead. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 42–49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-42-49>

### Введение

Совершенствование электролиза направлено на использование новых методов, интенсификацию, автоматизацию и повышение технико-экономических показателей производства. В свою очередь, улучшение качества продуктов тесно связано с созданием новых анодных материалов, обладающих повышенной стойкостью и комплексом других технологических и электрохимических свойств [1, 2].

Проблема стойкости анода является одной из центральных в ряде электрохимических производств, в таких как извлечение цветных металлов из растворов, получение хлора, кислорода и водорода и отдельных продуктов неорганической и органической природы, а также в гальванотехнике, промышленности химических источников тока и т.д. [3, 4].

Существует мнение, согласно которому стойкость свинца при его легировании зависит напрямую от модифицирования или изменения

его структуры. Структурные образования фаз переменного или постоянного состава в сплавах вызывают существенные изменения их анодных свойств [3, 4].

В литературе сообщается о влиянии добавок кадмия на коррозионную устойчивость свинца в среде электролита NaCl. Отмечается, что наименьшей скоростью коррозии обладают сплавы с содержанием кадмия в пределах растворимости, что связано с структурными факторами [5, 6].

В литературе хорошо освещены действия добавок элементов второй группы на физико-химические свойства свинца [7, 8].

Для свинца как анодного материала существенное место отводится знаниям теплофизических свойств. Как известно, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи и термодинамические свойства являются важнейшими характеристиками сплавов и как конструкционных материалов, и в качестве материала анода. В литературе нет сведений о теплоемкости и термодинамиче-

ских свойствах сплавов свинца с кадмием. В связи с этим в настоящей работе поставлена цель исследовать температурную зависимость теплоемкости сплавов системы свинец-кадмий (до 0.5мас.%) и по экспериментально определенным значениям теплоемкости рассчитать изменения термодинамических функций сплавов.

### Теория метода и схема установок

Всякое тело, которое имеет температуру выше температуры окружающей среды, будет охлаждаться. При этом скорость охлаждения в основном зависит от значения теплоемкости тела. Если взять два металлических стержня (определенной формы), один из которых служит эталоном с известной удельной теплоемкостью, и сравнить их кривые охлаждения (термограммы), можно определить теплоемкость другого, зная скорость его охлаждения.

Количество теплоты металла объемом  $dV$ , теряемое за время  $dt$ , равно:

$$dQ = c m dT = c \rho dV dt \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность металла;  $c$  – его удельная теплоемкость;  $T$  – температура образца (допускается одинаковой во всех точках образца, имея ввиду, что теплоемкость металла большая, а линейные размеры тела малы).

Значение  $dQ$  по закону Ньютона

$$dQ = \alpha (T - T_0) dS dt, \quad (2)$$

где  $dS$  – участок поверхности;  $T_0$  – температура внешней среды;  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи.

Приравняв формулы (1) и (2), получим:

$$dQ = c m dT = c \rho dV dt \frac{dT}{dt} = \alpha (T - T_0) dS dt. \quad (3)$$

Количество теплоты, теряемое образцами:

$$Q = \int c \rho dV dt \frac{dT}{dt} = \int \alpha (T - T_0) dS dt.$$

Допуская, что  $dT/dt$ ,  $c$  и  $\rho$  не зависят от координат точек объема, а  $\alpha$ ,  $T$ ,  $T_0$  от координат точек поверхности образца, можно записать:

$$c \rho dV dt \frac{dT}{dt} = \alpha (T - T_0) S dt. \quad (4)$$

где  $S$  – поверхность и  $V$  – объем образца.

Для двух образцов одинакового размера и формы после преобразований выражения (4) получим:

$$c_1 = c_2 \frac{m_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_2}{m_1 \left( \frac{dT}{dt} \right)_1}. \quad (5)$$

При этом допускается, что  $V_1 = V_2$ ,  $S_1 = S_2$ ,  $T_1 = T_2$ . В таком случае у них коэффициенты теплоотдачи будут равны ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ) и  $m_1 = \rho_1 V_1$ ,  $m_2 = \rho_2 V_2$  – соответственно массы первого и второго образцов.

Скорости охлаждения образцов определяются из их кривых охлаждений (термограммы). Термограммы представляют собой зависимость температуры от времени при охлаждении образца на воздухе.

Измерение теплоемкости проводилось по методике, описанной в работе [9]. Схема установки для измерения теплоемкости приведена на рис. 1. Электродпечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец 4 и эталон 5 (также могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары. Концы термопар подведены к цифровому термометру 7 «Digital Multimeter DI9208L». Электродпечь запускается через лабораторный автотрансформатор 1 (ЛАТР), установив нужную температуру с помощью терморегулятора 2. По показаниям цифровых термометров «Digital Multimeter DI9208L» фиксируется значение начальной температуры. Помещаем образец и эталон в электродпечь и нагреваем до нужной температуры, контролируя температуру по показаниям цифровых термометров «Digital Multimeter DI9208L» на компьютере 8. Образец и эталон одновременно выдвигаем из электродпечи и с этого момента фиксируем температуру. Записываем показания цифрового термометра «Digital Multimeter DI9208L» на компьютер через каждые 10 С, до охлаждения температуры образца и эталона.

Для измерения температуры использовали многоканальный цифровой термометр, который позволял прямо фиксировать результаты измерений на компьютере в виде таблиц. Точность измерения температуры составляла 0,1 С. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 до 400 С составляла  $\pm 1\%$ . Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4–6% в зависимости от температуры. Результаты измерений обрабатывались с помощью программы MS Excel, а графики строились с использованием программы Sigma Plot. Значения коэффициента корреляции равнялись  $R_{\text{коэфф}} = 0,9989 \pm 1,00$ , свидетельствуя о правильности выбора аппроксимирующей функции.

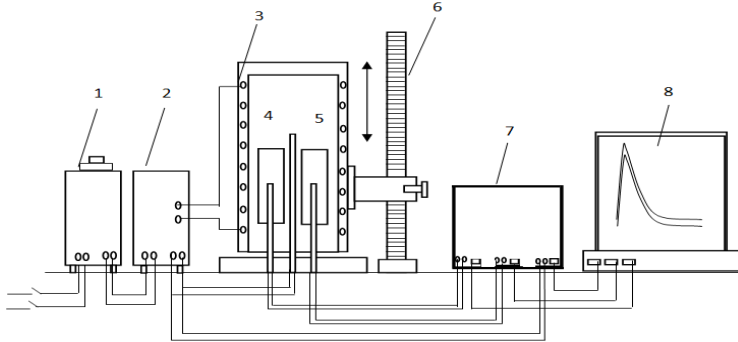


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме охлаждения  
 Fig. 1. The unit used to determine heat capacity of solids in a cooling mode

### Результаты и их обсуждение

Полученные экспериментально кривые охлаждения образцов из сплавов системы Pb-Cd представлены на **рис. 2,а**.

Полученные зависимости температуры сплавов от времени с достаточной точностью описываются уравнением вида

$$T = ae^{-bt} + pe^{-kt}, \quad (6)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $p$ ,  $k$  – постоянные константы для изучаемых образцов,  $t$  – время их охлаждения.

Дифференцируя (6) по  $t$ , имеем уравнение для определения скорости охлаждения (**рис. 2,б**) образцов из сплавов в виде зависимости

$$\frac{dT}{dt} = -abe^{-bt} - pke^{-kt}. \quad (7)$$

В **табл. 1** представлены значения постоянных  $a$ ,  $b$ ,  $p$ ,  $k$ ,  $ab$ ,  $pk$  в уравнении (7) для исследованных сплавов.

Для температурной зависимости удельной теплоемкости сплавов системы Pb-Cd получено общее уравнение типа

$$c = \alpha + bt + cT^2 + dT^3. \quad (8)$$

В **табл. 2** обобщены значения коэффициентов в уравнении (8).

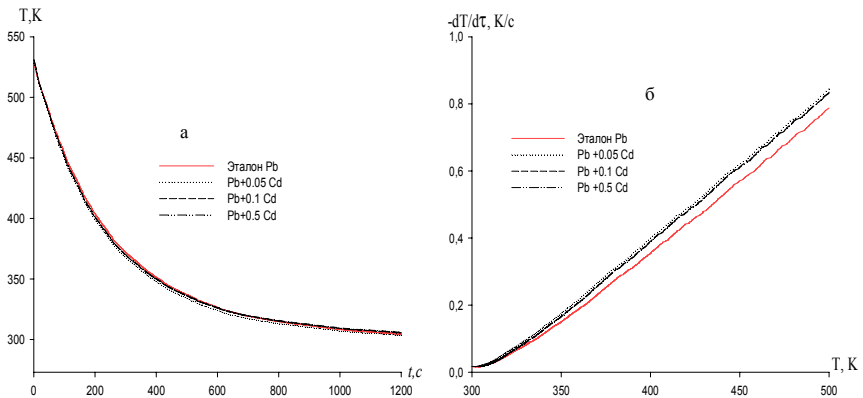


Рис. 2. Зависимость температуры от времени (а) и скорости (б) охлаждения образцов из сплавов системы Pb-Cd  
 Fig. 2. Relationship between temperature and time (a) and cooling rate (б) of the Pb-Cd alloy samples

Результаты расчета  $c$  по уравнениям (5) и (8) через 50 К представлены в табл. 3 и на рис. 3,а. Удельная теплоемкость сплавов от температуры и концентрации кадмия в свинце увеличивается.

Температурную зависимость коэффициента теплоотдачи сплавов системы Pb-Cd вычислили, используя экспериментально полученные значения скорости охлаждения образцов и их удельную теплоемкость, по уравнению

$$\alpha = \frac{cm \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0) \cdot S}, \quad (9)$$

где  $T_0$  и  $T$  – температуры окружающей среды и образца,  $m$ ,  $S$  – масса образца и площадь поверхности соответственно. Температурная зависимость  $\alpha$  для сплавов системы Pb-Cd представлена на рис. 3,б. Видно, что с ростом температуры и добавок кадмия в свинце  $\alpha$  увеличивается.

Таблица 1. Значения постоянных  $a$ ,  $b$ ,  $p$ ,  $k$ ,  $ab$ ,  $pk$  в уравнении (7) для сплавов системы Pb-Cd и эталона (Pb марки C00) T a b 1 e. Values of constants  $a$ ,  $b$ ,  $p$ ,  $k$ ,  $ab$ ,  $pk$  in equation (7) for Pb-Cd alloys and the reference standard (Pb grade C00)

Содержание кадмия в свинце, мас.%	$a$ , К	$b$ , $с^{-1}$	$p$ , К	$k \cdot 10^{-5}$ , $с^{-1}$	$a \cdot b$ , $К \cdot с^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2}$ , $К \cdot с^{-1}$
Эталон	209,36	4,33	319,27	4,31	9,07	1,38
0.05Cd	207,28	4,60	320,12	4,75	9,54	1,52
0.1 Cd	207,29	4,60	322,12	4,72	9,54	1,52
0.5 Cd	207,30	4,60	322,52	4,71	9,54	1,52

Таблица 2. Значения коэффициентов уравнении (8) для сплавов системы Pb-Cd и эталона (Pb марки C00) T a b 1 e 2. Coefficient values in equation (8) for Pb-Cd alloys and the reference standard (Pb grade C00)

Содержание кадмия в свинце, мас.%	$a$ , Дж/кг·К	$b$ , Дж/кг·К <sup>2</sup>	$c \cdot 10^{-3}$ , Дж/кг·К <sup>3</sup>	$d \cdot 10^{-6}$ , Дж/кг·К <sup>4</sup>	Коэффициент корреляции R, %
Эталон	105,600	0,0940	-0,085	0,05	1,0
0.05Cd	-68,1776	1,3252	-2,90	2,19	0,9988
0.1 Cd	-69,5321	1,3347	-2,92	2,21	0,9989
0.5 Cd	-68,8769	1,3229	-2,87	2,16	0,9989

Таблица 3. Температурная зависимость  $c$ , кДж/(кг·К), сплавов системы Pb-Cd и эталона (Pb марки C00) T a b 1 e 3. Temperature dependence  $c$ , kJ/(kg·K), of Pb-Cd alloys and the reference standard (Pb grade C00)

Содержание кадмия в свинце, мас.%	T, К				
	300	350	400	450	500
Эталон	127,50	130,23	132,80	135,24	137,60
0.05Cd	127,51	134,29	138,06	140,48	143,17
0.1 Cd	127,75	134,67	138,59	141,17	144,08
0.5 Cd	128,01	135,17	139,32	142,08	145,07

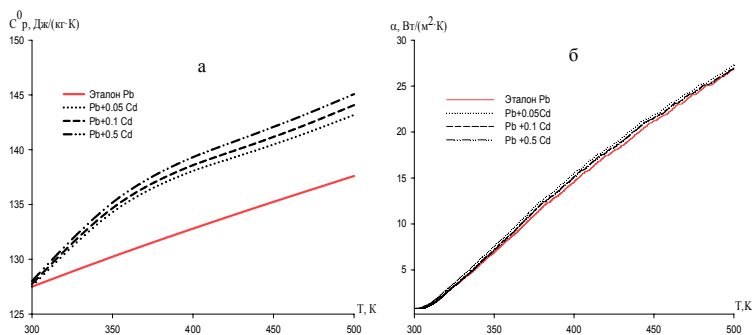


Рис. 3. Температурная зависимость  $c$  (а) и  $\alpha$  (б) сплавов системы Pb-Cd Fig. 3. Temperature dependence  $c$  (a) and  $\alpha$  (b) of Pb-Cd alloys

Расчет температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса сплавов проводился с помощью интеграла от удельной теплоемкости по уравнениям:

$$[H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4) ; \quad (10)$$

$$[S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3) ; \quad (11)$$

$$[G^{\circ}(T) - G^{\circ}(T_0)] = [H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0)] - T[S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0)] \quad (12)$$

где  $T_0 = 298,15$  К.

Результаты расчета температурных зависимостей изменений термодинамических функций сплавов системы Pb-Cd по уравнениям (10)–(12) через 50 К представлены в **табл. 4**.

Как известно [10,11] элементы-модификаторы структуры металлов тормозят их рост, адсорбируясь на зарождающихся кристаллах. Результатом этого является уменьшение поверхностной энергии вновь зарождающихся кристаллов, что в свою очередь способствует образованию сплава с высокодисперсной структурой.

Таблица 4. Зависимость изменений термодинамических функций сплавов системы Pb-Cd и эталона (Pb марки C00) от температуры

T a b l e 4. Thermodynamic functions-temperature dependence of Pb-Cd alloys and the reference standard (Pb grade C00)

Содержание кадмия в свинце, мас. %	T, К				
	300	350	400	450	500
	$[H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0^*)]$ , кДж/кг, для сплавов				
Эталон	0,2358	6,6798	13,2562	19,9577	26,7791
0.05Cd	0,2356	6,7965	13,6144	20,5801	27,6667
0.1 Cd	0,2360	6,8123	13,6527	20,6488	27,7749
0.5 Cd	0,2365	6,8321	13,7036	20,7412	27,9158
	$[S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0^*)]$ , кДж/(кг·К), для сплавов				
Эталон	0,0008	0,0206	0,0382	0,0540	0,0684
0.05Cd	0,0008	0,0210	0,0392	0,0556	0,0705
0.1 Cd	0,0008	0,0210	0,0393	0,0558	0,0708
0.5 Cd	0,0008	0,0211	0,0395	0,0560	0,0711
	$[G^{\circ}(T) - G^{\circ}(T_0^*)]$ , кДж/кг, для сплавов				
Эталон	-0,0007	-0,5477	-2,0275	-4,3391	-7,4033
0.05Cd	-0,0007	-0,5541	-2,0673	-4,4445	-7,6037
0.1 Cd	-0,0007	-0,5553	-2,0723	-4,4567	-7,6269
0.5 Cd	-0,0007	-0,5567	-2,0788	-4,4728	-7,6576

\*  $T_0 = 298,15$  К.

По величине обобщенного момента, который характеризует адсорбционную способность металлов в зависимости от эффективности радиуса иона и заряда, кадмий располагается после свинца ( $Pb_{7,1}^{2+}$ ). Металлы, расположенные правее свинца, являются активными модификаторами [12]. С учётом этого, следует заключить, что увеличение теплоемкости свинца при его легировании кадмием объясняется ростом степени гетерогенности структуры свинца. Диффузия в металлах быстрее происходит вдоль границ зерен, нежели в самих зёрнах. Наличие границ зерен влияет на такие свойства поликристаллов, как внутреннее трение, скольжение, тепловые и теплофизические свойства [13]. Таким образом, рост теплоемкости свинца легированием его кадмием можно объяс-

нить изменением зернистости микроструктуры сплава. Это подтверждают имеющиеся предположки о роли модифицирующих добавок в изменении физико-химических и механических свойств сплавов [10,11].

## Выводы

1. В режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из свинца марки C00 установлена температурная зависимость теплоемкости сплавов системы Pb-Cd.

2. Получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса) системы Pb-Cd в интервале температур 300–500 К.

3. С помощью полученных полиноминых зависимостей показано, что с ростом температуры теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтропия и энтропия сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается.

4. Установлено, что добавки кадмия в изученном концентрационном интервале (0,05–0,5 мас.%) увеличивает теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтропию и энтропию свинца и уменьшает величину энергии Гиббса.

#### Список литературы

1. Taranjot K., Jeewan Sh., Tejbir S. Feasibility of Pb-Zn Binary Alloys as Gamma Rays Shielding Materials // International Journal of Pure and Applied Physics. 2017. Vol. 13. No 1. P. 222–225.
2. Chikova O.A., Sakun G.V., Tsepelev V.S. Formation of Cu-Pb alloys by means of liquid metal homogenization // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2016. Vol. 57. P. 580–585.
3. Asiful H.S., El-Sayed M.S., Sohail M.A., Khan M., Muneer B., Mohammad A.A., Nabeel A. Microstructure characterization and corrosion resistance properties of Pb-Sb alloys for lead acid battery spine produced by different casting methods // PLOS ONE 13(5): e0197227. 8 May 2018.
4. Osório W.R., Rosa D.M., Garcia A. Electrochemical behaviour of a Pb-Sb alloy in 0.5m NaCl and 0.5 MH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions // Materials & Design 2012. No. 34. P. 660–665.
5. Osório W.R., Freitas E.S., Peixoto L.C., Spinelli J.E., Garcia A. The effects of tertiary dendrite arm spacing and segregation on the corrosion behavior of a Pb-Sb alloy for lead-acid battery components // J. Power Sour. 2012. No. 207. P. 183–190.
6. Дунаев Ю.Д. Нерастворимые аноды из сплавов на основе свинца. Алма-Ата: Наука, 1978. 316 с.
7. Муллоева Н.М., Ганиев И.Н. Сплавы свинца с щелочноземельными металлами. Душанбе: Андалеб Р., 2015. 166 с.
8. Муллоева Н.М., Ганиев И.Н., Махмадуллоев Х. Теплофизические и термодинамические свойства сплавов свинца с ЦЗМ. Германия, Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 66 с.
9. Умаров М.А., Ганиев И.Н. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций свинца марки С2 // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20. № 1. С. 23–29.
10. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.
11. Модифицирование силуминов стронцием / Ганиев И.Н., Пархутки П.А., Вахобов А.В., Куприянова И.Ю. Минск: Наука и техника, 1985. 152 с.
12. Брынцева В.И., Дунаев Ю.Д. Кинетика и механизм электрохимических реакций. Алма-Ата: Наука, 1977. 47 с.
13. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. М.:ИЛ, 1962. 610 с.

#### References

1. Taranjot K., Jeewan Sh., Tejbir S. Feasibility of Pb-Zn binary alloys as gamma rays shielding materials. International Journal of Pure and Applied Physics, 2017, vol. 13, no 1, pp. 222–225.
2. Chikova O.A., Sakun G.V., Tsepelev V.S. Formation of Cu-Pb alloys by means of liquid metal homogenization. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2016, vol. 57, pp. 580–585.
3. Asiful H.S., El-Sayed M.S., Sohail M.A., Khan M., Muneer B., Mohammad A.A., Nabeel A. Microstructure characterization and corrosion resistance properties of Pb-Sb alloys for lead acid battery spine produced by different casting methods. PLOS ONE 13(5): e0197227. 8 May 2018.
4. Osório W.R., Rosa D.M., Garcia A. Electrochemical behaviour of a Pb-Sb alloy in 0.5m NaCl and 0.5 MH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions. Materials & Design, 2012, no. 34, pp. 660–665.
5. Osório W.R., Freitas E.S., Peixoto L.C., Spinelli J.E., Garcia A. The effects of tertiary dendrite arm spacing and segregation on the corrosion behavior of a Pb-Sb alloy for lead-acid battery components. J. Power Sour. 2012, no. 207, pp. 183–190.
6. Dunaev Yu.D. *Nerastvorimye anody iz splavov na osnove svintsya* [Insoluble lead alloy anodes]. Alma-Ata: Science, 1978, 316 p. (In Russ.)
7. Mulloeva N.M., Ganiev I.N. *Splavy svintsya s shchelochnozemelnyimi metallami* [Alloys of lead with alkaline earth metals]. Dushanbe: Andaleb R., 2015, 166 p. (In Russ.)
8. Mulloeva N.M., Ganiev I.N., Makhamduloev Kh. *Teplofizicheskie i termodinamicheskie svoystva splavov svintsya s shchelochnozemelnyimi metallami* [Thermophysical and thermodynamic properties of lead alloys with alkaline earth metals]. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 66 p. (In Russ.)
9. Umarov M.A., Ganiev I.N. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of C2 grade lead. *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, vol. 20, no. 1, pp. 23–29. (In Russ.)
10. Maltsev M.V. *Modifitsirovanie struktury metallov i splavov* [Modification of the structure of metals and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1984, 280 p. (In Russ.)
11. Ganiev I.N., Parkhutik P.A., Vakhobov A.V., Kupriyanova I.Yu. *Modifitsirovanie siluminov strontsiem* [Modification of silumins with strontium]. Minsk: Science and technology, 1985, 152 p. (In Russ.)
12. Bryntseva V.I., Dunaev Yu.D. *Kinetika i mekhanizm elektrokhimicheskikh reaktsiy* [In the book: Kinetics and the mechanism of electrochemical reactions]. Alma-Ata: Science, 1977, 47 p. (In Russ.)
13. Van Bueren. *Defekty v kristallakh* [Defects in crystals]. Moscow: IL, 1962, 610 p. (In Russ.)

**Наврузов Хуршед Парвизович** – магистрант Института химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана. Душанбе, Республика Таджикистан

**Ганиев Изатулло Наврузович** – д-р хим. наук, профессор, академик НАНТ, зав. лабораторией Института химии В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана. Душанбе, Республика Таджикистан. Email: ganiev48@mail.ru

**Хайрулло Амонулло** – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры «Материаловедение, металлургические машины и оборудование» Таджикского технического университета им. М.С. Осими. Душанбе, Республика Таджикистан

**Эшов Бахтиёр Бадалович** – д-р техн. наук, доц., директор Государственного научного учреждения «Центр исследования инновационных технологий при Национальной академии наук Таджикистана». Душанбе, Республика Таджикистан. Email: ishov1967@mail.ru

**Муллоева Нукра Мазабшоевна** – зав. лабораторией Государственного научного учреждения «Центр исследования инновационных технологий при Национальной академии наук Таджикистана». Душанбе, Республика Таджикистан.

**Khurshed P. Navruzov** – Master's student, Nikitin Institute of Chemistry, the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, the Republic of Tajikistan.

**Izatullo N. Ganiev** – DrSc (Chem.), Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Head of the Laboratory, Nikitin Institute of Chemistry, the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, the Republic of Tajikistan. Email: ganiev48@mail.ru

**Amonullo Khayrullo** – PhD (Eng.), Senior Lecturer, the Department of Materials Science, Metallurgical Machines and Equipment, Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan.

**Bakhtier B. Eshov** – DrSc (Eng.), Associate Professor, Director of the State Scientific Institution Center for Research of Innovative Technologies at the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan. Email: ishov1967@mail.ru

**Nukra M. Mulloeva** – Head of the Laboratory, State Scientific Institution Center for Research of Innovative Technologies at the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan.