



Научная статья

УДК 661.849:661.862:66.048.1–982

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-336-347>

Фазовые равновесия в системе Hg–Al при вакуумной дистилляции

Алексей Анатольевич Королев¹, Владимир Александрович Шунин^{2✉},
Константин Леонидович Тимофеев³, Геннадий Иванович Мальцев⁴,
Роман Сергеевич Воинков⁵

¹⁻⁵ Акционерное общество «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма, Россия

³ Технический университет Уральской горно-металлургической компании, г. Верхняя Пышма, Россия

¹ A.Korolev@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0338-9774>

² V.Shunin@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5265-1006>

³ K.Timofeev@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9525-6476>

⁴ mgi@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

⁵ R.Voinkov@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6697-1596>

Резюме. Целью работы является расчет равновесных состояний «газ–жидкость», включая зависимости состава фаз от температуры (T -х) и давления (P -х) для Hg–Al сплава при вакуумной перегонке. Объектами исследования являлись Hg–Al сплавы состава, моль %: 20–80 Hg; 80–20 Al, образование которых возможно в процессе переработки медеэлектролитного шлама при получении товарного концентрата селена. Для расчета коэффициентов активности компонентов Hg–Al сплава использована упрощенная версия объемной модели молекулярного взаимодействия типа simple molecular interaction volume model. Для предварительного выбора температуры и давления системы, оценки эффективности разделения компонентов используют фазовые диаграммы температуры (T -х) и давления (P -х). Новизна выполненных исследований обусловлена расчетом коэффициентов активности с использованием выбранной упрощенной версии модели. В интервале температур 823–1073 К рассчитаны давления насыщенного пара для Hg (p_{Hg}^*) и Al (p_{Al}^*). Высокие значения соотношения $p_{\text{Hg}}^* / p_{\text{Al}}^* \geq 3 \cdot 10^{10}$ и коэффициента разделения $\log \beta_{\text{Hg}} \geq 10$ создают теоретические предпосылки для селективного выделения этих металлов вакуумной дистилляцией, когда ртуть концентрируется в газовой фазе ($\beta_{\text{Hg}} > 1$), а алюминий – в жидкой. Для границы раздела фаз «жидкость–газ» Hg–Al сплава определены значения изменения энергии Гиббса, энтальпии и энтропии: $-\Delta G_m^E = 1\text{--}3$ кДж/моль; $-\Delta H_m^E = 1\text{--}3$ кДж/моль; $\pm \Delta S_m^E = 0,03\text{--}0,17$ Дж/моль·К. Практическая значимость состоит в сокращении количества установочных опытов при переработке Hg–Al композиций для оптимизации значений температуры и давления процесса вакуумной дистилляции.

Ключевые слова: равновесная фазовая диаграмма, вакуумная дистилляция, молекулярная объемная модель взаимодействия, ртуть, алюминий, энергия Гиббса

Для цитирования: Королев А. А., Шунин В. А., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И., Воинков Р. С. Фазовые равновесия в системе Hg–Al при вакуумной дистилляции // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 336–347. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-336-347>.

METALLURGY

Original article

Phase equilibria in Hg–Al system during vacuum distillation

Aleksey A. Korolev¹, Vladimir A. Shunin^{2✉}, Konstantin L. Timofeev³,
Gennady I. Maltsev⁴, Roman S. Voinkov⁵

¹⁻⁵ JSC «Uralelectromed», Verkhnyaya Pyshma, Russia

³ Technical University of the Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia

¹ A.Korolev@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0338-9774>

² V.Shunin@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5265-1006>

© Королев А. А., Шунин В. А., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И., Воинков Р. С., 2022

³K. Timofeev@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9525-6476>

⁴mgi@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

⁵R. Voinkov@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6697-1596>

Abstract. In this work, gas-liquid equilibrium states are calculated, including phase composition dependences on temperature (T - x) and pressure (P - x) for the Hg–Al alloy during vacuum distillation. The objects of research comprised Hg–Al alloys having the following composition, mole %: 20–80 Hg; 80–20 Al, whose formation may occur during the processing of copper anode slime upon producing commercial selenium concentrate. A simplified molecular interaction volume model was used to calculate the activity coefficients of the components in the Hg–Al alloy. Phase diagrams of temperature (T - x) and pressure (P - x) are used for the preliminary selection of temperature and pressure in the system, as well as for the evaluation of the separation efficiency of components. The novelty of the research stems from calculating activity coefficients using the selected simplified model. Saturated vapour pressures for Hg (p_{Hg}^*) and Al (p_{Al}^*) were calculated in the temperature range of 823–1073 K. The high values of the $p_{\text{Hg}}^*/p_{\text{Al}}^* \geq 3 \cdot 10^{10}$ ratio and separation coefficient $\log \beta_{\text{Hg}} \geq 10$ provide theoretical premises for selective extraction of these metals by vacuum distillation, where mercury is concentrated in the gas phase ($\beta_{\text{Hg}} > 1$) and aluminium in the liquid phase. The values of excess Gibbs's energy, enthalpy and entropy changes for the liquid-gas interface of Hg–Al alloy were determined: $-\Delta G_m^E = 1\text{--}3$ kJ/mol; $-\Delta H_m^E = 1\text{--}3$ kJ/mol; $\pm \Delta S_m^E = 0.03\text{--}0.17$ J/mol·K. The practical significance of the research lies in minimising the number of initial experiments during the processing of Hg–Al compositions for optimising the temperature and pressure in the vacuum distillation process.

Keywords: equilibrium phase diagram, vacuum distillation, molecular volume interaction model, mercury, aluminum, Gibbs energy

For citation: Korolev A. A., Shunin V. A., Timofeev K. L., Maltsev G. I., Voinkov R. S. Phase equilibria in Hg–Al system during vacuum distillation. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):336–347. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-336-347>.

ВВЕДЕНИЕ

Для переработки металлических сплавов с целью разделения компонентов применяют вакуумную дистилляцию – высокопроизводительный и экологически безопасный пирометаллургический процесс, использующий разницу в давлении при одинаковой температуре насыщенных паров разделяемых металлов (P^*) между газовой и жидкой фазами, количественно характеризующихся коэффициентами разделения (β) [1–4]. Расчет состава продуктов возгонки и степень разделения компонентов сплава осуществляют при помощи равновесных фазовых диаграмм VLE (от англ. vapor liquid equilibrium) температура–состав « T – x » и давление–состав « P – x » [5–8]. Для определения значений β нужно вычислить коэффициенты активности компонентов (γ_i , γ_j), изменяющиеся в зависимости от температуры и состава сплава с помощью объемной модели молекулярного взаимодействия MIVM (от англ. molecular interaction volume model). В расчете задействованы координационные числа (Z), молярные объемы (V_m), потенциальные энергии парного взаимодействия (B) компонентов сплава. Диаграммы VLE позволяют прогнозировать значения температуры и давления для заданной степени разделения компонентов исходного

материала и составов образующихся газовой и жидкой фаз.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс расчета MIVM является сложным, например, расчет первых координационных чисел Z_i и молекулярного объема V_{mi} компонентов сплавов, поэтому был использован метод, содержащий меньшее количество параметров системы, а именно – упрощенный MIVM или SMIVM (от англ. simple molecular interaction volume model), с помощью которого были рассчитаны активность компонентов Hg–Al сплавов и фазовые диаграммы VLE. Прогнозируемые оптимальные параметры разделения компонентов сплавов можно получать из VLE фазовых диаграмм [9–12].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись Hg–Al сплавы состава, % мол.: 20–80 Hg; 80–20 Al, образование которых возможно в процессе переработки медьэлектролитного шлама при получении товарного концентрата селена. Лабораторные эксперименты по дистилляции компонентов сплавов проводились в вертикальной вакуумной печи. Степень вакуума в печи на время эксперимента составляла 1,33–133 Па, температура была 800–1100 К.

Состав образцов возгонов и остатков определяли из предварительно полученных растворов атомно-абсорбционным методом на установке GBC 933AB Plus. В экспериментах использовали образцы сплавов цилиндрической формы. Сначала образец помещали в цилиндрический тигель ($h = 40$ мм, $d = 40$ мм) из тонкодисперсных зерен графита высокой плотности. Затем тигель переносили в вакуумную печь и нагревали, контролируя температуру. Для предотвращения испарения металлов на стадии плавления образца процесс осуществляли в атмосфере аргона при нормальном давлении. Разрежение в рабочей камере производили паромасляным диффузионным насосом при достижении необходимой температуры – этот момент считали началом вакуумной перегонки ($\tau = 0$). Затем поддерживали в камере давление и температуру в течение заданного времени эксперимента. По окончании опыта выключали обогреватель, аргон заполнял камеру, давление в которой нормализовалось. Металлы, перешедшие в возгоны, конденсировались на холодной пластине, подключенной к циркуляционной водной системе. При температуре 40°C возгоны и остаток вынимали из печи и взвешивали.

Упрощенная объемная модель молекулярного взаимодействия SMIVM использована для расчета коэффициентов активности компонентов исходных сплавов [13–16]. В решеточной теории растворов координационное число Z имеет одно и то же постоянное значение (6)–(12). Установлено, что разница между координационными числами компонентов незначительно влияет на точность прогнозирования MIVM. Однако лучшие результаты получены, когда $Z \approx 10$. Кроме того, молярный объем i -компонента в жидком состоянии V_{mi} может быть заменен его молярным объемом в твердом состоянии V_i , поскольку разность плотностей для вещества между жидким и твердым состоянием небольшая. Уравнения для определения коэффициентов активности компонентов спла-

вов (y_i , y_j) приобретают вид [17–20]:

$$\ln y_i = 1 + \ln \left(\frac{V_i}{x_i V_i + x_j V_j B_{ji}} \right) - \left(\frac{x_i V_i}{x_i V_i + x_j V_j B_{ji}} + \frac{x_j V_j B_{ij}}{x_j V_j + x_i V_i B_{ij}} \right) - 5x_j^2 \left(\frac{B_{ji}^2 \ln B_{ji}}{(x_i + x_j B_{ji})^2} + \frac{B_{ij}^2 \ln B_{ij}}{(x_j + x_i B_{ij})^2} \right); \quad (1)$$

$$\ln y_j = 1 + \ln \left(\frac{V_j}{x_j V_j + x_i V_i B_{ij}} \right) - \left(\frac{x_j V_j}{x_j V_j + x_i V_i B_{ij}} + \frac{x_i V_i B_{ji}}{x_i V_i + x_j V_j B_{ji}} \right) - 5x_i^2 \left(\frac{B_{ij}^2 \ln B_{ij}}{(x_j + x_i B_{ij})^2} + \frac{B_{ji}^2 \ln B_{ji}}{(x_i + x_j B_{ji})^2} \right). \quad (2)$$

Давление насыщенных паров чистых компонентов, необходимое для расчета VLE, может быть получено следующим образом⁶ [21–25]:

$$\lg p^{\text{sat}} = AT^{-1} + B \lg T + CT + D, \quad (3)$$

где p^{sat} – давление насыщенных паров чистого компонента в Па; T – абсолютное значение температуры, К; коэффициенты A – D являются константами испарения.

Для проверки адекватности расчетных значений содержания компонентов сплавов в жидкой и газовой фазах сравнили их с экспериментальными данными. Для этого были вычислены показания среднего относительного отклонения (S_i , %) и среднего квадратичного отклонения (S_i^* , мол. доли):

$$S_i = \pm \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x(y)_{i,\text{exp}} - x(y)_{i,\text{cal}}}{x(y)_{i,\text{exp}}} \right| \cdot 100 \% ; \quad (4)$$

$$S_i^* = \pm \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x(y)_{i,\text{exp}} - x(y)_{i,\text{cal}}]^2 \right]^{0.5}, \quad (5)$$

где $x(y)_{i,\text{exp}}$ и $x(y)_{i,\text{cal}}$ – экспериментальные и расчетные значения содержания мольных долей компонента i в жидкой (x) и газовой (y) фазах, соответственно; n – количество экспериментальных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные характеристики Hg–Al сплава

⁶Лидин Р. А., Молочко В. А., Андреева Л. Л. Химические свойства неорганических веществ: учеб. пособ. 3-е изд., испр. М.: Изд-во «Аргамак-Медиа», 2017. 480 с.

приведены в табл. 1.

Ртуть легко возгоняется (высокие значения $p_{\text{Hg}}^* = (1,42 - 10,46) \cdot 10^6$ Па в отличие от алюминия (низкие значения $p_{\text{Al}}^* = 1,33 \cdot 10^{-8} - 3,54 \cdot 10^{-4}$ Па, который концентрируется в жидкой фазе, что позволяет достаточно полно их разделить вакуумной дистилляцией (табл. 2). Возможность отделения Hg от Al из их сплава вакуумной дистилляцией характеризуется коэффициентом разделения (β), для расчета которого используют коэффициенты активности (табл. 3, 4).

Значения $\beta_{\text{Hg}} > 1$, поскольку содержание

Hg в газовой фазе больше, чем в жидкой ($y_{\text{Hg}} \gg x_{\text{Hg}}$). Ртуть концентрируется в газовой фазе, алюминий – в кубовом остатке ($x_{\text{Al}} \gg y_{\text{Al}}$), что разделяет исходный сплав Hg–Al на ртуть и алюминий.

Коэффициент разделения ртути и алюминия возрастает ($\log \beta_{\text{Hg}} = 10,024 - 14,781$) по мере снижения температуры процесса (1073–823 K) и доли алюминия ($x_{\text{Al}} = 0,9 - 0,1$) в составе бинарного сплава (рис. 1).

Данные по количественному составу продуктов дистилляции представлены на рис. 2 и в табл. 4, 5.

Таблица 1. Значения параметров γ_i^∞ , γ_j^∞ , B_{ij} , B_{ji} , Z_i , Z_j , p_i^* , p_j^* , $V_{m(i,j)}$ сплава Hg–Al

Table 1. Values of γ_i^∞ , γ_j^∞ , B_{ij} , B_{ji} , Z_i , Z_j , p_i^* , p_j^* , $V_{m(i,j)}$ parameters of the Hg–Al alloy

<i>i–j</i> сплав	<i>T, K</i>	$\gamma_{\text{Hg}}^\infty / \gamma_{\text{Al}}^\infty$		<i>B</i>		<i>Z</i>	
				$B_{\text{Hg–Al}}$	$B_{\text{Al–Hg}}$	Hg	Al
Hg/Al	710	0,415/0,487		1,0263	1,3117	10	10
Металл	–A	–B	C	D	$V_m = f(T)$, см ³ /моль		
Hg	3066	–	–	9,877	$5,3[1 + 1,9 \cdot 10^{-4}(T - 752,9)]$		
Al	15630	–	–	11,115	$11,3[1 + 1,5 \cdot 10^{-4}(T - 933,52)]$		

Таблица 2. Рассчитанные давления паров Hg и Al

Table 2. Calculated pressures of Hg and Al vapors

<i>T, K</i>	p_{Hg}^* , Па	p_{Al}^* , Па	$p_{\text{Se}}^* / p_{\text{Al}}^*$
823	$1,418 \cdot 10^6$	$1,33 \cdot 10^{-8}$	$1,066 \cdot 10^{14}$
923	$3,591 \cdot 10^6$	$1,51 \cdot 10^{-6}$	$2,378 \cdot 10^{12}$
1023	$7,585 \cdot 10^7$	$6,86 \cdot 10^{-5}$	$1,106 \cdot 10^{12}$
1073	$1,046 \cdot 10^7$	$3,54 \cdot 10^{-4}$	$2,959 \cdot 10^{10}$

Таблица 3. Рассчитанные значения коэффициентов активности Hg и Al в расплаве

Table 3. Calculated values of Hg and Al activity coefficients in the melt

<i>T, K</i>	γ	x_{Hg}				
		0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
823	$\gamma_{\text{Hg}} / \gamma_{\text{Al}}$	0,258/0,982	0,426/0,847	0,632/0,619	0,839/0,370	0,979/0,173
923		0,298/0,984	0,469/0,863	0,668/0,655	0,858/0,420	0,982/0,220
1023		0,335/0,986	0,507/0,876	0,698/0,685	0,873/0,463	0,984/0,264
1073		0,352/0,986	0,523/0,881	0,711/0,698	0,880/0,482	0,985/0,284

Таблица 4. Рассчитанные значения коэффициента разделения Hg и Al ($\lg \beta_{\text{Hg}}$)

Table 4. Calculated values of the Hg and Al separation coefficient ($\lg \beta_{\text{Hg}}$)

<i>T, K</i>	x_{Hg}	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
823	$\lg \beta_{\text{Hg}}$	13,448	13,73	14,037	14,384	14,781
	$\lg y_{\text{Al}}$	-12,493	-13,362	-14,037	-14,752	-15,735
923	$\lg \beta_{\text{Hg}}$	11,716	12,109	12,383	12,684	13,024
	$\lg y_{\text{Al}}$	-10,761	-11,741	-12,383	-13,052	-13,978
1023	$\lg \beta_{\text{Hg}}$	10,575	10,806	11,052	11,319	11,615
	$\lg y_{\text{Al}}$	-9,62	-10,438	-11,052	-11,687	-12,569
1073	$\lg \beta_{\text{Hg}}$	10,024	10,245	10,479	10,733	11,011
	$\lg y_{\text{Al}}$	-9,07	-9,877	-10,479	-11,101	-11,966

Таблица 5. Рассчитанные значения $\lg y_{\text{Al}}$ сплава Hg–Al
Table 5. Calculated values $\lg y_{\text{Al}}$ of the Hg–Al alloy

T, K	x_{Hg}	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09
823	$\gamma_{\text{Hg}}/\gamma_{\text{Al}}$	0,199/1,0	0,212/0,998	0,224/0,996	0,238/0,991	0,251/0,986
	$\lg y_{\text{Al}}$	-11,331	-11,846	-12,101	-12,285	-12,429
923	$\gamma_{\text{Hg}}/\gamma_{\text{Al}}$	0,235/1,0	0,249/0,999	0,262/0,996	0,276/0,992	0,208/0,987
	$\lg y_{\text{Al}}$	-9,75	-10,261	-10,515	-10,695	-10,693
1023	$\gamma_{\text{Hg}}/\gamma_{\text{Al}}$	0,269/1,0	0,283/0,999	0,297/0,996	0,312/0,993	0,327/0,988
	$\lg y_{\text{Al}}$	-8,478	-8,986	-9,239	-9,417	-9,559
1073	$\gamma_{\text{Hg}}/\gamma_{\text{Al}}$	0,285/1,0	0,299/0,999	0,314/0,997	0,329/0,993	0,344/0,989
	$\lg y_{\text{Al}}$	-7,93	-8,438	-8,691	-8,868	-9,008

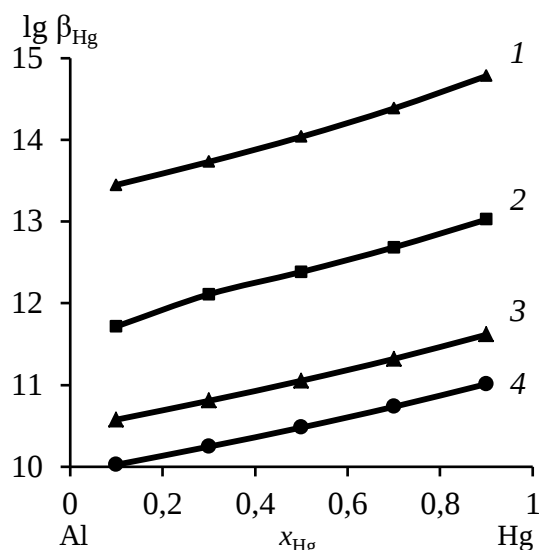


Рис. 1. Коэффициент разделения ртути при вакуумной дистилляции Hg–Al сплава при температуре, К: 823 (1); 923 (2); 1023 (3); 1073 (4)
Fig. 1. Mercury separation coefficient under vacuum distillation of the Hg–Al alloy at temperature, K: 823 (1); 923 (2); 1023 (3); 1073 (4)

Ртуть можно отделить от алюминия возгонкой при температуре $\leq 550^\circ\text{C}$. Исходя из состава сплава (x_{Al}) можно прогнозировать температуру, при которой количество возгоняемой примеси алюминия в конденсированной ртути не будет превышать заданную величину: для x_{Al} (ат. % / масс. %) равного 10/1,35 при 550°C значения y_{Al} (ат. % / масс. %) составляют $1,84 \cdot 10^{-16}/0,25 \cdot 10^{-16}$, а для 800°C – y_{Al} (ат. % / масс. %) достигает $1,081 \cdot 10^{-12}/0,146 \cdot 10^{-12}$. В этом случае, при увеличении температуры возгонки на 250°C , содержание Al в Hg-конденсате возрастает в 5870 раз.

Активности Hg и Al (a_{Hg} , a_{Al}) в расплаве определены с использованием рассчитанных значений коэффициентов активности этих компонентов (γ_{Hg} , γ_{Al}) (см. рис. 3, табл. 3).

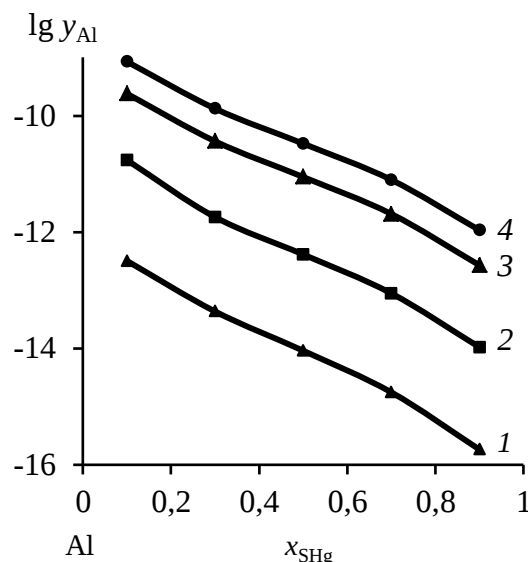


Рис. 2. Содержание Al в возгонах при температуре, К: 823 (1); 923 (2); 1023 (3); 1073 (4)
Fig. 2. Al content in fumes at temperature, K: 823 (1); 923 (2); 1023 (3); 1073 (4)

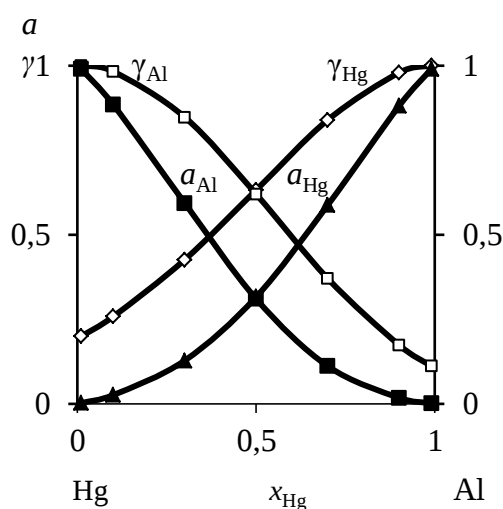


Рис. 3. Активности (a) и коэффициенты активности (γ) компонентов Hg–Al сплава при температуре 823 К
Fig. 3. Activities (a) and activity coefficients (γ) of Hg–Al alloy components at the temperature of 823 K

При построении «Т-х» диаграммы бинарной системы Hg–Al для каждой фиксированной температуры подбирали состав сплава (x_{Hg}), при котором сумма парциальных давлений ртути и алюминия уравнивала внешнее давление (рис. 4 а, табл. 6).

Установлено, что при увеличении глубины вакуума переход из жидкой в газовую фазу происходит в более узком диапазоне температур и способствует разделению Hg и Al, а именно: для получения конденсата ртути с возгонкой 90–99% элемента при давлении 133/13,3/1,33 Па и температуре 632–525/538–458/468–406 К содержание примеси алюминия составит не более $1,9 \cdot 10^{-16}/8,7 \cdot 10^{-20}/4 \cdot 10^{-23}$ мол. долей, что свидетельствует о благоприятном воздействии низкого остаточного давления в системе и, соответственно, температуры процесса на селективность при заданной степени возгонки ртути. Одновременно в кубовом остатке в указанных интервалах давления и температуры содержание алюминия возрастает на 90–99% металла.

Определены значения относительного ($S_i = 1,42\%$) и квадратичного ($S_i^* = 7,54 \text{ К}$) отклонений между вычисленными и опытными значениями температур (рис. 4 а). Относительно невысокие абсолютные значения вычисленных средних отклонений свидетельствуют об адекватности модели процесса вакуумной дистилляции бинарного сплава в исследованных интервалах изменения давления (Р) и температуры (Т). Для фазовых диаграмм VLE может быть использовано правило рычага (правило отрезков) для прогнозирования количества вещества, остатков и возгонов при заданной температуре. Пред-

полагая, что мол. доля Hg в сырье сплава $x_0 = 0,5$, соответствующая температуре перегонки 490 К и давлению 133 Па, по правилу «рычага» может быть построена линия связи АВ на «Т-х» диаграмме (рис. 4 а), где кривые жидкости и пара пересекаются в точке А и В. Когда система достигает равновесия, составы А и В равняются x_{liq} и y_{gas} , соответственно. По правилу рычага:

$$\frac{n_{\text{liq}}}{n_{\text{gas}}} = \frac{x_0 - y_{\text{gas}}}{x_{\text{liq}} - x_0} = \frac{|OB|}{|OA|} = \frac{0,5 - 0,999}{0,2 - 0,5} = \frac{0,499}{0,3},$$

где $n_{\text{liq}} = 0,499$ и $n_{\text{gas}} = 0,3$ – количество вещества в остатках и возгонах; $|OB|$ и $|OA|$ – длина соответствующих отрезков на линии АВ. Общее количество молей вещества исходного сплава будет n , следовательно $n = n_{\text{liq}} + n_{\text{gas}}$:

$$n_{\text{liq}} = \frac{x_0 - y_{\text{gas}}}{x_{\text{liq}} - y_{\text{gas}}} n = \frac{|OB|}{|AB|} n = \frac{0,499}{0,799} n = 0,625 n,$$

$$n_{\text{gas}} = \frac{x_{\text{liq}} - x_0}{x_{\text{liq}} - y_{\text{gas}}} n = \frac{|OA|}{|AB|} n = \frac{0,3}{0,799} n = 0,375 n.$$

Результаты расчета диаграмм «Р-х» представлены на рис. 4 б, табл. 7, 8.

Диаграмма «Р-х» иллюстрирует возможность управления процессом дистилляции Hg–Al сплава при фиксированной температуре путем изменения величины остаточного давления в системе. Например, при температуре 823 К равновесное содержание 0,1 – мол. доля ртути в кубовом остатке, что соответствует 90% возгонке элемента, достигается при давлении $p_{\text{liq}} = 0,37 \cdot 10^5$ Па. При повышении температуры до 1023 К аналогичная степень возгонки ртути достигается при

Таблица 6. Рассчитанные значения T_{liq} , y_{Al} Hg–Al сплава для «Т-х» диаграмм
Table 6. Calculated values of T_{liq} , y_{Al} of the Hg–Al alloy for "Т-х" diagrams

Р, Па	x_{Hg}	0,01	0,03	0,05	0,10	0,90	0,95	0,97	0,99
133	$T_{\text{liq}}, \text{К}$	632,5	580,0	557,5	525,6	399,2	397,0	396,2	395,69
	y_{Al}	$1,88 \cdot 10^{-16} - 1,59 \cdot 10^{-21}$				$3,68 \cdot 10^{-34} - 2,83 \cdot 10^{-36}$			
13,3	$T_{\text{liq}}, \text{К}$	538,1	499,8	482,4	458,1	353,48	351,53	350,93	350,46
	y_{Al}	$8,71 \cdot 10^{-20} - 6,49 \cdot 10^{-25}$				$9,77 \cdot 10^{-39} - 3,52 \cdot 10^{-41}$			
1,33	$T_{\text{liq}}, \text{К}$	468,2	438,8	425,3	405,9	317,21	315,45	314,92	314,52
	y_{Al}	$4,01 \cdot 10^{-23} - 2,65 \cdot 10^{-28}$				$1,99 \cdot 10^{-43} - 3,24 \cdot 10^{-46}$			

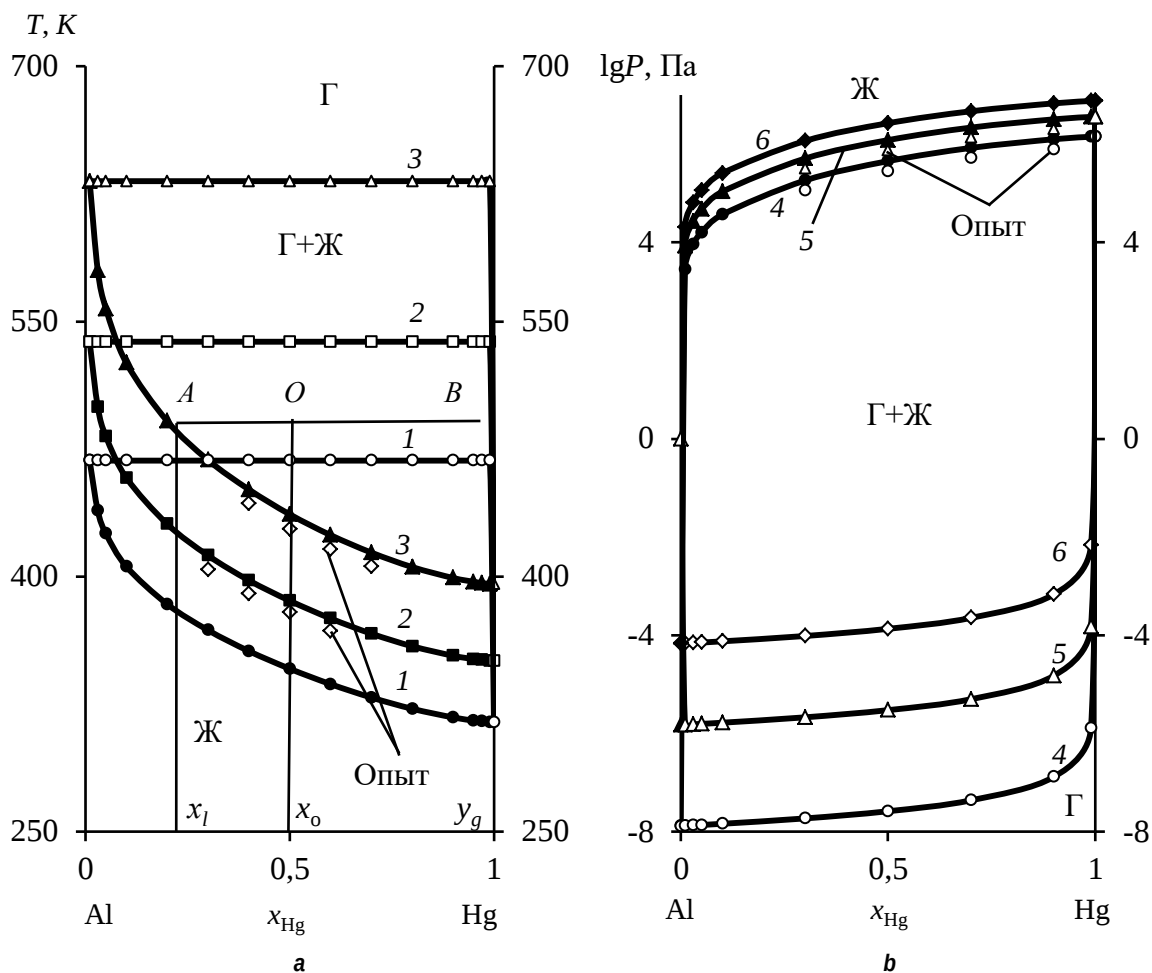


Рис. 4. Фазовые диаграммы «Т-х» (а) и «Р-х» (б) Hg–Al сплава при P , Па: 1,33 (1); 13,33 (2); 133,3 (3) и T , К: 823 (4); 923 (5); 1023 (6)
Fig. 4. Phase diagrams of "T-x" (a) and "P-x" (b) of the Hg–Al alloy at P , Pa: 1.33 (1); 13.33 (2); 133.3 (3) and T , K: 823 (4); 923 (5); 1023 (6)

Таблица 7. Рассчитанные значения $P_{liq} \cdot 10^6$ (Па) Hg–Al сплава
Table 7. Calculated values of $P_{liq} \cdot 10^6$ (Pa) of the Hg–Al alloy

T, K	x_{Hg}				
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
823	0,037	0,181	0,448	0,832	1,25
923	0,107	0,506	1,199	2,158	3,177
1023	0,254	1,153	2,649	4,634	6,714

Таблица 8. Значения x_{Hg} , P_{gas} (Па), y_{Hg} , $y_{Al} = 1,0$ для «Р-х» диаграмм Hg–Al сплава
Table 8. Values x_{Hg} , P_{gas} (Pa), y_{Hg} , $y_{Al} = 1.0$ for "P-x" diagrams of the Hg–Al alloy

T, K	y_{Hg}	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
823	$x_{Hg} \cdot 10^{-14}$	0,534	2,061	4,808	11,82	43,28
	y_{Hg}			0,193		
	$P_{gas} \cdot 10^{-8}$	1,462	1,88	2,631	4,386	13,16
923	$x_{Hg} \cdot 10^{-12}$	0,203	0,783	1,826	4,262	16,44
	y_{Hg}			0,229		
	$P_{gas} \cdot 10^{-6}$	1,669	2,146	3,004	5,007	15,02
1023	$x_{Hg} \cdot 10^{-11}$	0,38	1,465	3,419	7,975	30,77
	y_{Hg}			0,262		
	$P_{gas} \cdot 10^{-4}$	0,755	0,970	1,359	2,264	6,793

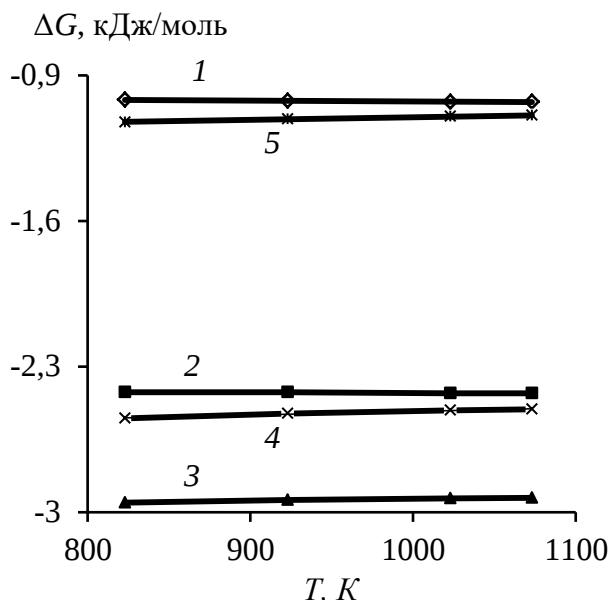


Рис. 5. Зависимость « $\Delta G - T$ » для Hg–Al сплава при x_{Hg} : 0,1 (1); 0,3 (2); 0,5 (3); 0,7 (4); 0,9 (5)
 Fig. 5. " $\Delta G - T$ " dependence for the Hg–Al alloy at x_{Hg} : 0.1 (1); 0.3 (2); 0.5 (3); 0.7 (4); 0.9 (5)

Таблица 9. Рассчитанные значения ΔG_m^E , ΔH_m^E , ΔS_m^E Hg–Al сплава
 Table 9. Calculated values of G_m^E , ΔH_m^E , ΔS_m^E of the Hg–Al alloy

T, K	$-\Delta G_m^E$, кДж/моль				
	x_{Hg}				
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
823	1,019	2,423	2,952	2,547	1,126
923	1,023	2,423	2,940	2,525	1,110
1023	1,028	2,427	2,933	2,510	1,099
1073	1,030	2,429	2,931	2,504	1,094
$-\Delta H_m^E$, кДж/моль	0,982	2,401	3,019	2,686	1,229
ΔS_m^E , Дж/моль·K	–0,044	–0,025	0,084	0,171	0,127

большем значении остаточного давления $p_{\text{liq}} = 2,54 \cdot 10^5$ Па. Содержание ртути в газовой фазе $y_{\text{Hg}} = 90\%$ при температуре 823/1023 K обеспечивается при давлении $P_{\text{gas}} = 1,3 \cdot 10^{-7}/6,8 \cdot 10^{-4}$ Па. Данные «P–x» диаграмм дополняют сведения «T–x» диаграмм для бинарного сплава Hg–Al.

Изменение энергии Гиббса ΔG_m^E для бинарной смеси Hg–Al определяется процессом удерживания вещества в пограничном слое фаз при переходе «жидкость–газ», обусловленном соотношением компонентов в сплаве и температурой системы (рис. 5, табл. 9).

Величина изменения энтальпии пограничного слоя (ΔH_m^E) определяется энергией Гиббса и теплотой образования поверхности ($T\Delta S_m^E$), где ΔS_m^E – изменение энтропии. От-

рицательные значения изменения энтальпии $\Delta H_m^E < 0$ свидетельствуют об экзотермическом процессе дистилляции компонентов Hg–Al сплава. Небольшие значения изменения энергии Гиббса $\Delta G_m^E \leq 3,0$ кДж/моль отражают слабое взаимодействие между атомами ртути и алюминия в составе сплава, что на два порядка меньше энергии межатомного взаимодействия в твердой фазе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для расчета коэффициентов активности компонентов Hg–Al сплава использована упрощенная версия объемной модели молекулярного SMIVM.

2. Для предварительного выбора температуры и давления системы оценки эффек-

тивности разделения компонентов при вакуумной перегонке используют фазовые диаграммы температуры (T -х) и давления (P -х).

3. В интервале температур 823–1073 К рассчитаны давления насыщенного пара для Hg ($p_{\text{Hg}}^* = 1,42 \cdot 10^6 - 1,05 \cdot 10^7$ Па) и Al ($p_{\text{Al}}^* = 1,33 \cdot 10^{-8} - 3,54 \cdot 10^{-4}$ Па). Высокие значения соотношения $p_{\text{Hg}}^* / p_{\text{Al}}^* = 1,07 \cdot 10^{14} - 2,96 \cdot 10^{10}$ и коэффициента разделения $\log \beta_{\text{Hg}} = 10,02 - 14,78$ создают теоретические предпосылки для селективного выделения этих металлов вакуумной дистилля-

цией, когда газовая фаза обогащается ртутью ($\beta_{\text{Hg}} > 1$), а жидкая – алюминием.

4. Мольная доля алюминия в газовой фазе $y_{\text{Al}} \leq 8,51 \cdot 10^{-10} - 1,84 \cdot 10^{-16}$ уменьшается со снижением температуры 1073–823 К и мольной доли металла в сплаве $x_{\text{Al}} = 0,9 - 0,1$.

5. Для границы раздела фаз «жидкость–газ» Hg–Al сплава определены значения изменения энергии Гиббса, энтальпии и энтропии: $-\Delta G_m^E = 1,02 - 2,95$ кДж/моль; $-\Delta H_m^E = 0,98 - 3,02$ кДж/моль; $\pm \Delta S_m^E = 0,025 - 0,171$ Дж/моль·К.

Список источников

1. Zhang Lei, Zhang Xiaowei, Li Zong-an, Chen De-hong. Distribution model of lowly volatile impurity in rare earth metal purified by vacuum distillation // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 262. P. 118314. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118314>.
2. Wang D., Chen Y., Li Y., Yang B. Experimental investigation and modeling of the Cu–Sn system in vacuum distillation // Calphad. 2020. Vol. 70. P. 101991. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2020.101991>.
3. Zhang Xiaofeng, Liu Dachun, Jiang Wenlong, Xu Wenjie, Deng Pan, Deng Juhai, et al. Application of multi-stage vacuum distillation for secondary resource recovery: potential recovery method of cadmium telluride photovoltaic waste // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9. Iss. 4. P. 6977–6986. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.032>.
4. Zhang Xiaofeng, Huang Daxin, Jiang Wenlong, Zha Guozheng, Deng Juhai, Deng Pan, et al. Selective separation and recovery of rare metals by vulcanization-vacuum distillation of cadmium telluride waste // Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 230. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.115864>.
5. Xiong Neng, Tian Yang, Yang Bin, Xu Baoqiang, Dai T., Dai Yong-nian. Results of recent investigations of magnesia carbothermal reduction in vacuum // Vacuum. 2019. Vol. 160. P. 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.11.007>.
6. Liu Tiantian, Qiu Keqiang. Removing antimony from waste lead storage batteries alloy by vacuum displacement reaction technology // Journal of Hazardous Materials. 2018. Vol. 347. P. 334–340. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.017>.
7. Jiang Wen-Long, Deng Yong, Yang Bin, Liu Da-Chun, Dai Yong-Nian, Xu Bao-Qiang. Application of vacuum distillation in refining crude indium // Rare Metals. 2013. Vol. 32. Iss. 6. P. 627–631. <https://doi.org/10.1007/s12598-013-0169-z>.
8. Yang Bin, Zha Guozheng, Hartley William, Kong Xiangfeng. Sustainable extraction of lead and re-use of valuable metals from lead-rich secondary materials // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 219. P. 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.011>.
9. Королев А. А., Краюхин С. А., Мальцев Г. И. Равновесные системы «газ–жидкость» для сплава Sn–Sb при вакуумной дистилляции // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2019. № 4. С. 488–503. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0151>.
10. Королев А. А., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И. Фазовые равновесия для Pb–Bi сплава при вакуумной дистилляции // Расплавы. 2020. № 3. С. 313–327. <https://doi.org/10.31857/S0235010620030056>.
11. Королев А. А., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И. Фазовые равновесия для Zn–Ag сплава при вакуумной дистилляции // Расплавы. 2021. № 2. С. 172–186. <https://doi.org/10.31857/S0235010621020043>.
12. Королев А. А., Шунин В. А., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И., Воинков Р. С. Фазовые равновесия в системе Se–Al при вакуумной дистилляции // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2021. Т. 23. № 4. С. 5–14. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2021.4.01>.
13. Bolzoni L., Ruiz-Navas E. M., Gordo E. Quantifying the properties of low-cost powder metallurgy titanium alloys // Materials Science and Engineering: A. 2017. Vol. 687. P. 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.049>.
14. Dong Longlong, Chen Wenge, Hou Lintao, Wang Jiaojiao, Song Jiulong. Metallurgical and mechanical examinations of molybdenum/graphite joints by vacuum arc pressure brazing using Ti–Zr filler materials // Journal of Materials Processing Technology. 2017. Vol. 249. P. 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.007>.
15. Martín F., García C., Blanco Y., Rodríguez-Mendez M. L. Influence of sinter-cooling rate on the mechanical properties of powder metallurgy austenitic, ferritic, and duplex stainless steels sintered in vacuum // Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 642. P. 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.097>.
16. Jiang WenLong, Zhang Cheng, Xu Na, Yang Bin, Xu BaoQiang, Liu DaChun, et al. Experimental investigation and modelling of phase equilibria for the Ag–Cu–Pb system in vacuum distillation // Fluid Phase Equilibria. 2016. Vol. 417. P. 19–24.

<https://doi.org/10.1016/j.fluid.2016.02.026>.

17. Kong Lingxin, Yang Bin, Li Yifu, Xu Baoqiang, Liu Dachun, Jia Guobin. Application of MIVM for Pb–Sn system in vacuum distillation // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2012. Vol. 43. P. P. 1649–1656. <https://doi.org/10.1007/s11663-012-9726-3>.
18. Kong Xiang-feng, Yang Bin, Xiong Heng, Kong Lingxin, Liu Da-chun, Xu Bao-qiang. Thermodynamics of removing impurities from crude lead by vacuum distillation refining // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. Vol. 24. Iss. 6. P. 1946–1950. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63275-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63275-1).
19. Yang HongWei, Xu BaoQiang, Yang Bin, Ma Wenhui, Tao DongPing. Calculation of phase equilibrium in vacuum distillation by molecular interaction volume model // *Fluid Phase Equilibria*. 2012. Vol. 341. P. 78–81. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2011.10.027>.
20. Thirunavukarasu G., Chatterjee S., Kundu S. Scope for improved properties of dissimilar joints of ferrous and non-ferrous metals // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017. Vol. 27. Iss. 7. P. 1517–1529. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60172-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60172-9).
21. Klippenstein S. J. From theoretical reaction dynamics to chemical modeling of combustion // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017. Vol. 36. Iss. 1. P. 77–111. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.100>.
22. Górak A., Olujić Z. Modeling of Distillation Processes // *Distillation: fundamentals and principles* / eds. A. Gorak, E. Sorensen. Chapter 10. Academic Press, 2014. P. 383–436.
23. Huang Liuqing, Lai Huixian, Gan Chuanhai, Xiong Huaping, Xing Pengfei, Luo Xuetao. Separation of boron and phosphorus from Cu-alloyed metallurgical grade silicon by CaO–SiO₂–CaCl₂ slag treatment // *Separation and Purification Technology*. 2016. Vol. 170. P. 408–416. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.004>.
24. Jaeger W. Heat transfer to liquid metals with empirical models for turbulent forced convection in various geometries // *Nuclear Engineering and Design*. 2017. Vol. 319. P. 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.04.028>.
25. Wilson G. M. Vapor-liquid equilibrium. XI: A new expression for the excess free energy of mixing // *Journal American Chemical Society*. 1964. Vol. 86. Iss. 2. P. 127–130.

References

1. Zhang Lei, Zhang Xiaowei, Li Zong-an, Chen De-hong. Distribution model of lowly volatile impurity in rare earth metal purified by vacuum distillation. *Separation and Purification Technology*. 2021;262:118314. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118314>.
2. Wang D., Chen Y., Li Y., Yang B. Experimental investigation and modeling of the Cu–Sn system in vacuum distillation. *Calphad*. 2020;70:101991. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2020.101991>.
3. Zhang Xiaofeng, Liu Dachun, Jiang Wenlong, Xu Wenjie, Deng Pan, Deng Juhai, et al. Application of multi-stage vacuum distillation for secondary resource recovery: potential recovery method of cadmium telluride photovoltaic waste. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(4):6977–6986. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.032>.
4. Zhang Xiaofeng, Huang Daxin, Jiang Wenlong, Zha Guozheng, Deng Juhai, Deng Pan, et al. Selective separation and recovery of rare metals by vulcanization-vacuum distillation of cadmium telluride waste. *Separation and Purification Technology*. 2020;230. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.115864>.
5. Xiong Neng, Tian Yang, Yang Bin, Xu Baoqiang, Dai T., Dai Yong-nian. Results of re-cent investigations of magnesita carbothermal reduction in vacuum. *Vacuum*. 2019;160:213–225. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.11.007>.
6. Liu Tiantian, Qiu Keqiang. Removing antimony from waste lead storage batteries alloy by vacuum displacement reaction technology. *Journal of Hazardous Materials*. 2018;347:334–340. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.017>.
7. Jiang Wen-Long, Deng Yong, Yang Bin, Liu Da-Chun, Dai Yong-Nian, Xu Bao-Qiang. Application of vacuum distillation in refining crude indium. *Rare Metals*. 2013;32(6):627–631. <https://doi.org/10.1007/s12598-013-0169-z>.
8. Yang Bin, Zha Guozheng, Hartley William, Kong Xiangfeng. Sustainable extraction of lead and re-use of valuable metals from lead-rich secondary materials. *Journal of Cleaner Production*. 2019;219:110–116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.011>.
9. Korolev A. A., Krayukhin S. A., Maltsev G. I. The Equilibrium of the System “Gas–Liquid” for Alloy Sn–Sb in Vacuum Distillation. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering & technologies*. 2019;4:488–503. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0151>.
10. Korolev A. A., Timofeev K. L., Maltsev G. I. Phase equilibria for Pb–Bi alloy during vacuum distillation. *Rasplavy*. 2020;3:313–327. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0235010620030056>.
11. Korolev A. A., Timofeev K. L., Maltsev G. I. Phase equilibria for Zn–Ag alloy during vacuum distillation. *Rasplavy*. 2021;2:172–186. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0235010621020043>.
12. Korolev A. A., Shanin V. A., Timofeev K. L., Maltsev G. I., Voinkov R. S. Phase equilibria in the Se–Al system during vacuum distillation. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2021;23(4):5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2021.4.01>.
13. Bolzoni L., Ruiz-Navas E. M., Gordo E. Quantifying the properties of low-cost powder metallurgy titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;687:47–53. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.049>.
14. Dong Longlong, Chen Wenge, Hou Lintao, Wang Jiaojiao, Song Jiulong. Metallurgical and mechanical examinations of molybdenum/graphite joints by vacuum arc pressure brazing using Ti–Zr filler materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;249:39–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.007>.
15. Martín F., García C., Blanco Y., Rodríguez-Mendez M.

L. Influence of sinter-cooling rate on the mechanical properties of powder metallurgy austenitic, ferritic, and duplex stainless steels sintered in vacuum. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;642:360-365. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.097>.

16. Jiang WenLong, Zhang Cheng, Xu Na, Yang Bin, Xu BaoQiang, Liu DaChun, et al. Experimental investigation and modelling of phase equilibria for the Ag–Cu–Pb system in vacuum distillation. *Fluid Phase Equilibria*. 2016;417:19-24. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2016.02.026>.

17. Kong Lingxin, Yang Bin, Li Yifu, Xu Baoqiang, Liu Dachun, Jia Guobin. Application of MVM for Pb–Sn system in vacuum distillation. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2012;43:1649-1656. <https://doi.org/10.1007/s11663-012-9726-3>.

18. Kong Xiang-feng, Yang Bin, Xiong Heng, Kong Lingxin, Liu Da-chun, Xu Bao-qiang. Thermodynamics of removing impurities from crude lead by vacuum distillation refining. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014;24(6):1946-1950. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63275-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63275-1).

19. Yang HongWei, Xu BaoQiang, Yang Bin, Ma Wenhui, Tao DongPing. Calculation of phase equilibrium in vacuum distillation by molecular interaction volume model. *Fluid Phase Equilibria*. 2012;341:78-81.

<https://doi.org/10.1016/j.fluid.2011.10.027>.

20. Thirunavukarasu G., Chatterjee S., Kundu S. Scope for improved properties of dissimilar joints of ferrous and non-ferrous metals. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017;27(7):1517-1529. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60172-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60172-9).

21. Klippenstein S. J. From theoretical reaction dynamics to chemical modeling of combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017;36(1):77-111. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.100>.

22. Górak A., Olujić Z. Modeling of Distillation Processes. In: Gorak A., Sorensen E. (eds.). *Distillation: fundamentals and principles*. Chapter 10. Academic Press; 2014, p. 383-436.

23. Huang Liuqing, Lai Huixian, Gan Chuanhai, Xiong Huaping, Xing Pengfei, Luo Xuetao. Separation of boron and phosphorus from Cu-alloyed metallurgical grade silicon by CaO–SiO₂–CaCl₂ slag treatment. *Separation and Purification Technology*. 2016;170:408-416. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.004>.

24. Jaeger W. Heat transfer to liquid metals with empirical models for turbulent forced convection in various geometries. *Nuclear Engineering and Design*. 2017;319:12-27. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.04.028>.

25. Wilson G. M. Vapor-liquid equilibrium. XI: A new expression for the excess free energy of mixing. *Journal American Chemical Society*. 1964;86(2):127-130.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Королев Алексей Анатольевич,
кандидат технических наук,
главный инженер,
АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Шунин Владимир Александрович,
заместитель начальника,
Исследовательский центр АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Тимофеев Константин Леонидович,
доктор технических наук,
доцент кафедры металлургии,
Технический университет Уральской горно-
металлургической компании;
начальник технического отдела,
АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Мальцев Геннадий Иванович,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
главный специалист,
Исследовательский центр АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksey A. Korolev,
Cand. Sci. (Eng.),
Chief Engineer of JSC “Uralelectromed”,
1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia

Vladimir A. Shunin,
Deputy Head of the
Research Center of JSC “Uralelectromed”,
1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia

Konstantin L. Timofeev,
Dr. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Metallurgy,
Technical University of Ural Mining and Metallurgical
Company,
Head of the Technical Department
of JSC “Uralelectromed”,
1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia

Gennady I. Maltsev,
Dr. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Chief Specialist of the Research Center
of JSC “Uralelectromed”,
1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia

Воинков Роман Сергеевич,
кандидат технических наук,
начальник ИЦ АО «Уралэлектромедь»,
Исследовательский центр АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Roman S. Voinkov,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Research Center of JSC “Uralelectromed”,
Research Center of JSC “Uralelectromed”,
1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.01.2022; одобрена после рецензирования 22.03.2022; принята к публикации 27.05.2022.

Information about the article

The article was submitted 18.01.2022; approved after reviewing 22.03.2022; accepted for publication 27.05.2022.