

Научная статья
УДК 546.883
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.027

СОРБЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ТАНТАЛА ИЗ СУЛЬФАТНО-ФТОРИДНЫХ РАСТВОРОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ОТХОДОВ РЕНИЙ-НИКЕЛЕВОГО СУПЕРСПЛАВА

Максим Александрович Солодовников¹, Ирина Дмитриевна Трошкина²

^{1, 2}Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Россия

¹solodovnikovmaksim1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-3497-160X>

²troshkina.i.d@muctr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5523-0247>

Аннотация

В работе исследована сорбционная технология извлечения тантала из сульфатно-фторидных растворов, образующихся при переработке тантал-вольфрамового полупродукта отходов рений-никелевого жаропрочного суперсплава ЖС32 ВИ. Цель исследования — разработка эффективного метода рекуперации ценного тантала из сложного вторичного сырья. Методология включала сравнительный анализ эффективности сильноосновных анионитов (Lewatit K6367, Axionit VPA G2.4, Purolite A600) при исходной концентрации тантала 4037 мг/л, концентрациях H₂SO₄ и HF по 1 М и соотношении фаз Т:Ж = 1:50. Установлено, что максимальная степень извлечения тантала (85,3 %) достигается на анионите Lewatit K6367. Кинетические исследования выявили различные лимитирующие стадии: для гелевого анионита Axionit VPA G2.4 — внутренняя диффузия (k 8,99 г·мг^{-0.5}·мин^{-0.5}), для макропористых Purolite A600 и Lewatit K6367 — химическая реакция обмена (k 10,2·10⁻³ мин⁻¹ и 15,1·10⁻³ мин⁻¹ соответственно). Десорбция раствором фторида аммония (100 г/л) обеспечила извлечение 85 % сорбированного тантала.

Ключевые слова:

тантал, сорбция, суперсплав

Благодарности:

исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования имени Д. И. Менделеева.

Финансирование:

работа выполнена на инициативной основе.

Для цитирования:

Солодовников М. А., Трошкина И. Д. Сорбционное извлечение тантала из сульфатно-фторидных растворов выщелачивания отходов рений-никелевого суперсплава // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 4. С. 142–149. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.027.

Original article

SORPTION RECOVERY OF TANTALUM FROM SULFATE-FLUORIDE LEACHING SOLUTIONS OF RHENIUM-NICKEL SUPERALLOY WASTE

Maksim A. Solodovnikov¹, Irina D. Troshkina²

^{1, 2}D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

¹solodovnikovmaksim1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-3497-160X>

²troshkina.i.d@muctr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5523-0247>

Abstract

This study investigates a sorption-based technology for recovering tantalum from sulfate-fluoride leaching solutions generated during the processing of tantalum-tungsten intermediate product derived from rhenium-nickel superalloy ZhS32 VI waste. The research aimed to develop an efficient method for reclaiming valuable tantalum from complex secondary raw materials. The methodology involved a comparative analysis of the efficiency of strongly basic anion exchange resins (Lewatit K6367, Axionit VPA G2.4, Purolite A600) under the following conditions: initial Ta concentration 4037 mg/L, 1 M H₂SO₄, 1 M HF, and solid-to-liquid ratio S:L — 1:50. It was found that the maximum tantalum recovery (85.3 %) was achieved using Lewatit K6367. Kinetic studies revealed different rate-determining steps: internal diffusion for the gel-type resin Axionit VPA G2.4 (k 8.99 g·mg⁻¹·min^{-0.5}), and chemical exchange reaction for the macroporous resins Purolite A600 and Lewatit K6367 (k 10.2·10⁻³ min⁻¹ and 15.1·10⁻³ min⁻¹, respectively). Desorption using an ammonium fluoride solution (100 g/L) recovered 85 % of the sorbed tantalum.

Keywords:

tantalum, sorption, superalloys

Acknowledgments:

the research was conducted using the equipment of the D.I. Mendeleev Collective Usage Center.

Funding:

the work was carried out on an initiative basis.

For citation:

Solodovnikov M. A., Troshkina I. D. Sorption recovery of tantalum from sulfate-fluoride leaching solutions of rhenium-nickel superalloy waste // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 4. P. 142–149. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.027.

Введение

Переработка отходов — одна из важнейших проблем современных технологий [1, 2]. Отходы от производства и использования специальных сплавов являются вторичным сырьем. Разработка и усовершенствование технологий переработки отходов позволит значительно увеличить доступность тантала — ценного ресурса для различных отраслей промышленности [3].

Среди ренийевых сплавов, содержащих тантал, особое место занимают суперсплавы на основе никеля. Отходы Re-Ni-сплавов содержат большое количество ценных компонентов, которые могут быть использованы для производства новых продуктов. Рений-никелевые суперсплавы характеризуются многокомпонентным составом, включают в себя дорогостоящие редкие и цветные металлы, по этой причине к технологии утилизации отходов, образующихся в результате обработки изделий из этих сплавов, предъявляются требования комплексности переработки [4–7].

Тантал является ценным элементом, уступающим по своим химическим свойствам лишь благородным металлам [8–10]. Например, он не переходит в раствор в такой агрессивной среде, как царская водка, устойчив к воздействию большинства минеральных кислот, не подвергается коррозии, поэтому широко используется во многих отраслях промышленности [11].

Ввиду того, что количество потребителей танталосодержащей продукции значительно увеличилось, возросло и количество отходов, содержащих этот металл. В связи с этим разработка новых более эффективных способов его извлечения из вторичного сырья и усовершенствование существующих является важной задачей.

Наиболее распространенным гидрометаллургическим методом переработки отходов суперсплавов является выщелачивание минеральными кислотами [12–14]. При проведении процесса происходит переход большинства цветных металлов и рения в жидкую фазу, в сухом остатке концентрируются такие элементы, как: тантал, титан, молибден и вольфрам. Отделение вольфрама и молибдена от тантала осуществляют преимущественно электрохимическими методами [15, 16], однако возможно проведение спекания полупродукта с гидроксидом натрия или его солями, зачастую с Na_2CO_3 [17]. При таком способе переработки образуются вольфрамат и молибдат натрия, которые в процессе водного выщелачивания переходят из твердой фазы в жидкую, Ta и Ti концентрируются в сухом остатке.

Цель работы — сорбционное извлечение тантала из растворов выщелачивания танталового полупродукта переработки отходов рений-никелевого суперсплава.

Результаты исследований

Танталовый продукт выщелачивали смесью плавиковой и серной кислот — 22,4 и 18 М соответственно, по окончании процесса раствор разбавляли до остаточной кислотности ~ 1 М по обеим кислотам.

Одним из способов извлечения тантала из сульфатно-фторидного раствора выщелачивания танталосодержащего полупродукта, образующегося при переработке отходов суперсплава ЖС32 ВИ, выбран сорбционный метод, т. к., в сравнении с экстракцией, сорбция имеет некоторые преимущества, а именно — более глубокое извлечение целевого компонента, а также пожаро-взрывобезопасность за счет отсутствия потоков легковоспламеняющихся жидкостей.

Сорбцию тантала проводили в статическом режиме [18]. Исходный раствор контактировали с сорбентами при постоянном перемешивании с помощью орбитального шейкера при соотношении фаз сорбент:раствор — 1:50 (г:мл). После сорбции фазы разделяли центрифугированием и проводили анализ водного раствора на содержание металла.

Содержание ионов металла в сорбенте (СЕ, мг/г) рассчитывали по изменению концентраций сорбируемого вещества в растворе до и после сорбции:

$$\text{СЕ} = (C_{\text{Ta}_0} - C_{\text{Ta}_X}) \cdot V/m, \quad (1)$$

где C_{Ta_0} , C_{Ta_X} — концентрация тантала в растворе до и после сорбции соответственно, г/л; V — объем исходного раствора, мл; m — навеска воздушно-сухого сорбента, г.

Степень сорбции тантала рассчитывали по уравнению:

$$E_{\text{Ta}} = ((C_{\text{Ta}_0} - C_{\text{Ta}_X}) / C_{\text{Ta}_0}) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где C_{Ta_0} , C_{Ta_X} — концентрация тантала в растворе до и после сорбции соответственно, г/л.

На основании работ по сорбции и экстракции тантала из сульфатно-фторидных сред [19–21] в качестве сорбентов были апробированы материалы, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Сорбция тантала из сульфатно-фторидного раствора*

Сорбент	Равновесная степень извлечения, %
Axionit VPA G2.4	82,7
Purolite A600	81,3
ТВЭКС-ТАА 55 %	63,0
Lewatit MDS TP 260	14,2
ТВЭКС-ТБФ 55 %	18,0
Импрегнат МИБК	48,8
Lewatit K6367	85,3

* Условия: [Ta] — 4037 мг/л; [H₂SO₄] — 1 М, [HF] — 1 М; соотношение фаз Т:Ж = 1:50 (г:мл).

Наибольшая степень извлечения тантала из сульфатно-фторидного раствора наблюдалась при использовании сильноосновных анионитов Axionit VPA G2.4, Lewatit K6367, Purolite A600, в связи с чем дальнейшее извлечение целевого компонента проводили с их использованием (табл. 2).

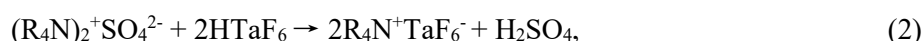
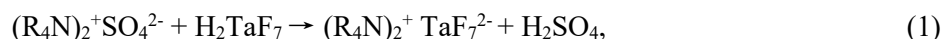
Таблица 2

Сорбция тантала из сульфатно-фторидного раствора на выбранных сорбентах

Сорбент	C _{равн.} , мг/л	Степень извлечения тантала за 1 контакт, %
Axionit VPA G2.4	699,2	82,7
Purolite A600	754,2	81,3
Lewatit K6367	592,5	85,3

* Условия: [Ta] — 4037 мг/л; [H₂SO₄] — 1 М, [HF] — 1 М; соотношение фаз Т:Ж = 1:50 (г:мл).

Основываясь на сведениях о классе функциональных групп, выбранных для последующей работы сорбентов (Purolite A600, Lewatit K6367 — четвертичный аммоний I типа; Axionit VPA G2.4 — винил-пиридиновые группы), механизм сорбции может быть описан следующими реакциями:



Для изучения основных кинетических показателей сорбции были построены интегральные кинетические кривые, представленные на рис. 1. Кинетику изучали методом ограниченного объема раствора.

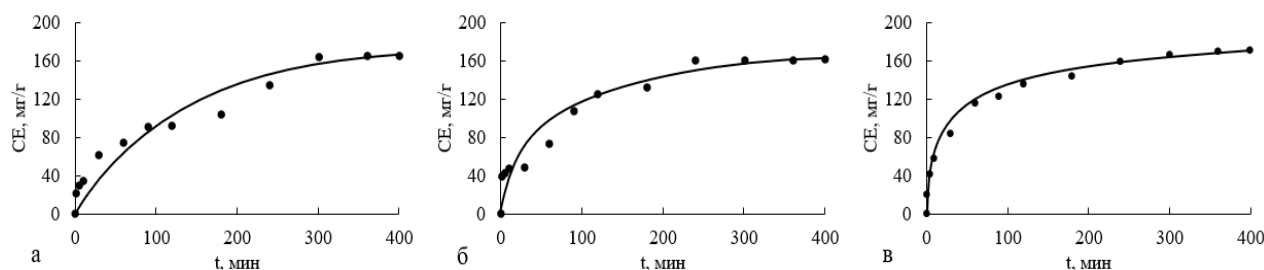


Рис. 1. Интегральные кинетические кривые сорбции тантала из сульфатно-фторидного раствора на анионитах Axionit VPA G2.4 (а), Purolite A600 (б), Lewatit K6367 (в).

Условия: [Ta] — 4037 мг/л, [H₂SO₄] — 1 М, [HF] — 1 М; соотношение фаз Т:Ж = 1:50 (г:мл)

Математическую обработку интегральных кинетических кривых (рис. 1) осуществляли в соответствии с кинетическими и диффузионными моделями путем их линейаризации (рис. 2, табл. 3) по следующим уравнениям [22–23]:

модель псевдо-первого порядка Лагергрена:

$$\ln(CE - CE_{(t)}) = \ln(CE) - k_1 t;$$

модель псевдо-второго порядка Хо и Маккея:

$$t/CE_{(t)} = 1/(k_2 \cdot (CE)^2) + t/CE;$$

модель Бойда – Адамса – Майерса:

$$Bt = -\ln(1 - F);$$

модель Вебера – Морриса:

$$CE = k_{id} t^{1/2} + C,$$

где CE — равновесная сорбционная емкость, мг/г; $CE_{(t)}$ — сорбционная емкость в момент времени t , мг/г; k_1 — константа скорости модели псевдо-первого порядка Лагергрена, мин⁻¹; k_2 — константа скорости модели псевдо-второго порядка Хо и Маккея, г·мг⁻¹·мин⁻¹; Bt — кинетический коэффициент модели Бойда – Адамса – Майерса в момент времени t , ммоль/г; $F_{(t)}$ — безразмерный параметр модели Бойда – Адамса – Майерса в момент времени t ; k_{id} — константа скорости внутренней диффузии мг·г⁻¹·мин^{-1/2}; C — константа, связанная с толщиной пограничного слоя, мг/г.

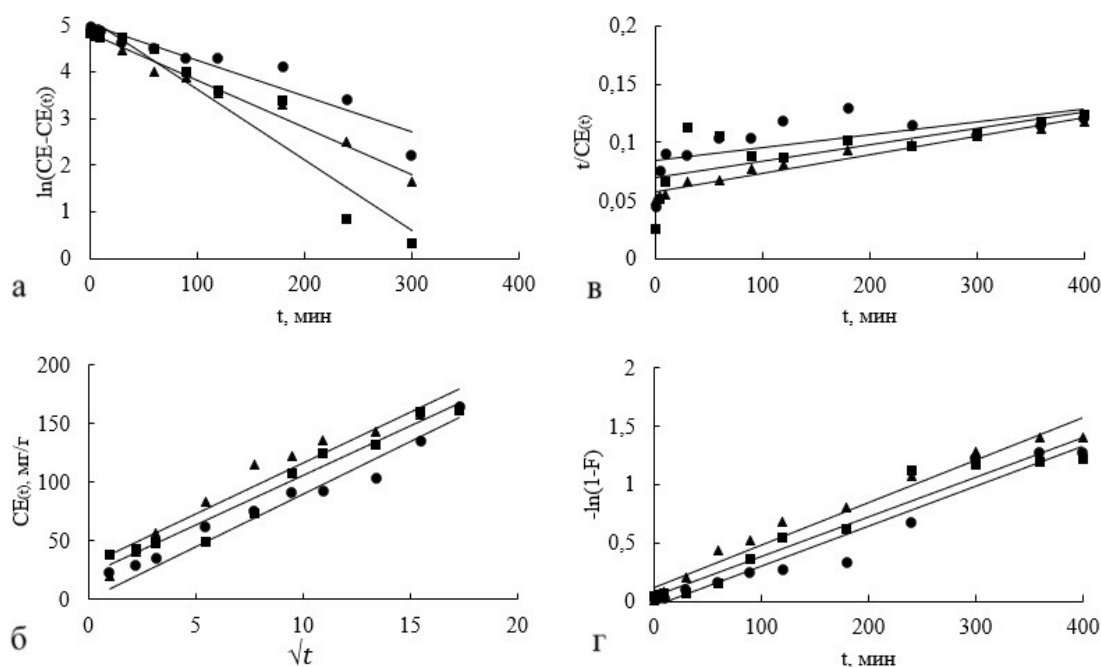


Рис. 2. Линейаризация интегральных кинетических кривых сорбции тантала из сульфатно-фторидного раствора по моделям псевдо-первого порядка (а), Вебера – Морриса (б), псевдо-второго порядка (в), Бойда – Адамса – Майерса (г). Axionit VPA G2.4 (•), Purolite A600 (■), Lewatit K6367 (▲)

На основании математической обработки кинетических данных установлено, что лимитирующей стадией сорбции тантала на анионите Axionit VPA G2.4 является внутренняя диффузия (R^2 0,9502, модель Вебера – Морриса) с константой скорости K_{id} 8,99 г·мг⁻¹·мин^{-0,5}. Для анионита Purolite A600 процесс контролируется химической реакцией обмена (R^2 0,9799, модель псевдо-первого порядка) при константе k_1 10,2·10⁻³ мин⁻¹, тогда как для анионита Lewatit K6367 лимитирующей стадией является внутренняя диффузия (R^2 0,9689, модель Бойда – Адамса – Майерса) с константой модели B 3,6·10⁻³ г·мг⁻¹·мин⁻¹.

Таблица 3

Кинетические характеристики сорбентов

Сорбент	Модель псевдо-первого порядка		Модель псевдо-второго порядка		Модель Бойда – Адамса – Майерса		Модель Вебера – Морриса	
	R^2	$k_1 \cdot 10^{-3},$ 1/мин	R^2	$k_2 \cdot 10^{-3},$ г/(г·мин)	R^2	$B \cdot 10^{-3},$ мг/г	R^2	$\frac{K_{id},}{\text{г}} \cdot \frac{1}{\text{мг} \cdot \text{мин}^2}$
Axionit VPA G2.4	0,9052	7,60	0,4525	0,37	0,9461	3,4	0,9502	8,99
Purolite A600	0,9799	10,2	0,4914	0,38	0,9483	3,4	0,9580	8,44
Lewatit K6367	0,9218	15,1	0,9600	0,35	0,9689	3,6	0,9461	8,70

В статическом режиме была проведена десорбция тантала раствором фторида аммония концентрацией 100 г/л с выбранных сорбентов [24, 25]. Кривые десорбции представлены на рис. 3.

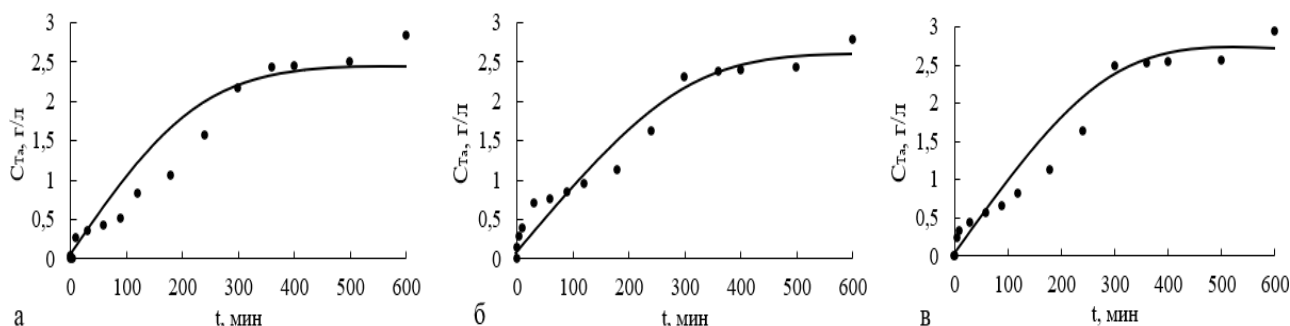


Рис. 3. Интегральные кинетические кривые десорбции тантала раствором NH_4F (100 г/л) с анионитов: Axionit VPA G2.4 (а); Purolite A600 (б); Lewatit K6367 (в)

Как видно из рис. 3, равновесие десорбции тантала для выбранных сорбентов наступает через ~ 350 мин.

Максимальная достигнутая степень десорбции Та за один контакт составила 85 % для каждого из выбранных сорбентов.

Выводы

Установлена высокая эффективность сильноосновных анионитов (Lewatit K6367, Axionit VPA G2.4, Purolite A600) для извлечения тантала из сульфатно-фторидных растворов. Кинетика процесса лимитируется внутренней диффузией для гелевого анионита Axionit VPA G2.4 (модель Вебера – Морриса) с константой скорости K_{id} 8,99 г·мг⁻¹·мин^{-0,5}, химической реакцией обмена для макропористого анионита Purolite A600 (модель псевдо-первого порядка) с константой скорости k_1 10,2·10⁻³ мин⁻¹ и внутренней диффузией для анионита Lewatit K6367 (модель Бойда – Адамса – Майерса) с константой модели B 3,6·10⁻³ г·мг⁻¹·мин⁻¹.

Десорбция раствором фторида аммония (100 г/л) обеспечивает извлечение 85 % тантала.

Список источников

1. Колобов Г. А., Панов В. С., Ракова Н. Н. Технологии вторичных тугоплавких редких металлов (обзор) // Изв. вузов. Цвет. метал. 2015. № 1. С. 41–48.
2. Максимова А. М. Извлечение редких и редкоземельных металлов из техногенных объектов как путь к рациональному освоению недр // Вестн. евразийской науки. 2016. Т. 8, № 5(36). С. 43.

3. Hassan E. S. R., Chen Y., Abdel-Khalek N. A., Elbendari A. M. Enhanced tantalum and niobium recovery from fine-grained low-grade Abu Dabbab ore using Falcon concentration and magnetic separation. *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, no. 1, p. 10432.
4. Simco M. M., Bradshaw R. C., Hyers R. W. Recovery of Rhenium from Superalloy Swarf, Grindings, Turnings, and Scrap. *TMS Annual Meeting & Exhibition*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 165–173.
5. Leszczyńska-Sejda K., Malarz J., Ciszewski M., Kopyto D., Goc K., Grzybek A., Benke G. Hydrometallurgical Technology for Producing Rhenium (VII) and Cobalt (II) from Waste. *Crystals*, 2024, vol. 14, no. 9, p. 783.
6. Ferron C. J., Peer J., Andrews J., Fleming C. A. Hydrometallurgical Production of High-Purity Ammonium Perrhenate from Superalloy Scrap. *Conference of Metallurgists*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 1217–1223.
7. Kowalik P., Kopyto D., Benke G., Ciszewski M., Grzybek A., Malarz J., Leszczyńska-Sejda K. Application of Electrodialysis to Production of High-Purity Perrhenic Acid. *Separations*, 2024, vol. 11, no. 9, p. 253.
8. Li X. T., Li J., Liu S. Q., Du S. H., Wang S. J., Chen J., Cheng S. B. Dual External Field Strategy in Regulating the Superhalogen Characteristics of the Non-Noble Metal Constituted Tantalum Oxide Clusters. *J. Phys. Chem. A*, 2024, vol. 128, no. 27, pp. 5298–5306.
9. Moradizadeh L., Johar M., Chellehbari Y. M., Li X., Shahgaldi S. Optimized tantalum interlayer thickness for PTLs: Enhancing PEMWE performance, stability, and reducing precious metal loading. *J. Power Sources*, 2025, vol. 647, p. 237360.
10. Watanabe Y., Tange M., Kanaya Y., Okuyama H., Tanaka S. Tantalum Processing Development for Medical Applications Insights from Relationship of Thermal Processes and Mechanical Properties by LMM-based AM and MIM. *J. Japan Soc. Powder Metall.*, 2025, vol. 72, suppl., pp. S1099–S1102.
11. Yuan J., Wang Y., Hou X., Zhong J., Tan D. The influence of low degree of deformation on the corrosion resistance of pure tantalum in corrosive media. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 2024, vol. 125, p. 106899.
12. Targanov I. E., Bardysh A. V., Troshkina I. D. Sorption of Rhenium from Cobalt–Nickel Mother Liquors Formed in Complex Processing of Rhenium-Containing Superalloy Waste. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2022, vol. 95, no. 11, pp. 1715–1722.
13. Targanov I. E., Solodovnikov M. A., Troshkina I. D. Oxidative leaching of rhenium from grinding waste of rhenium-containing superalloys. *Izv. Non-Ferr. Metall.*, 2023, vol. 29, pp. 25–33.
14. Liu J., Tang J., Sun Y., Zhou Y., Shi F. Recovery of Ni and Co elements from superalloy leaching solution by sodium roasting and water leaching. *JOM*, 2024, vol. 76, no. 7, pp. 3393–3401.
15. Кузнецова О. Г., Левин А. М., Севостьянов М. А. Электрохимическая переработка отходов тяжелых вольфрамовых сплавов в аммиачно-карбонатных растворах под действием постоянного и переменного тока // Тр. Кольск. науч. центра РАН. Сер.: Техн. науки. 2022. Т. 13, № 1. С. 155–159.
16. Chen X., Sun Y., Wang L., Qu X., Zhao Y., Xie H. W., Yin H. Y. Electrochemically recycling degraded superalloy and valorizing CO₂ in the affordable borate-modified molten electrolyte. *Tungsten*, 2024, vol. 6, no. 2, pp. 382–393.
17. Рузиев У. Н., Гуро В. П., Шарипов Х. Т., Каюмов Б. Б. У., Ниязатов А. А. Сырье для модифицированных твердых сплавов на основе карбида вольфрама // Хим. журн. Казахстана. 2022. № 1(77). С. 37–50.
18. Panova Y., Aubakirov Y., Arbag H. Selection of sorption materials for the extraction of nickel and cobalt from the ore of the Gornostaevskoye deposit. *Chem. Bull. Kazakh Nation. Univ.*, 2021, vol. 102, no. 3, pp. 4–12.
19. Vodolazov L., Shvab A. Mathematical modeling of the kinetics of ion exchange of tantalum and niobium. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1981, vol. 261, no. 5, p. 1183.
20. de Souza Gonçalves G. A., de Carvalho T. C., Garjulli F., de Carvalho M. S., Espinosa D. C. R. Adsorption of niobium and tantalum contained in tin slag by ion-exchange resins: Equilibrium isotherms, kinetic and thermodynamic studies. *Zh. Ustoich. Metall.*, 2023, vol. 9, no. 3, pp. 1329–1343.
21. Warshawsky A. Solvent impregnated resins. *Ion Exch. Solvent Extr.*, 1981, vol. 8, p. 229.
22. Ezzati R., Ezzati S., Azizi M. Exact solution of the Langmuir rate equation: New Insights into pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetics models for adsorption. *Vacuum*, 2024, vol. 220, p. 112790.
23. Taraba B., Bulavová P. Second or pseudo-second-order model for adsorption kinetics? *Sep. Sci. Technol.*, 2022, vol. 57, no. 10, pp. 1558–1562.
24. El-Kamash A. M. Evaluation of zeolite A for the sorptive removal of Cs⁺ and Sr²⁺ ions from aqueous solutions using batch and fixed bed column operations. *J. Hazard. Mater.*, 2008, vol. 151, no. 2–3, pp. 432–445.
25. Turkowska M., Karoń K., Milewski A., Jakóbk-Kolon A. Solvent-impregnated sorbents for tantalum from niobium separation using a fixed-bed column. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 4, p. 1513.

References

1. Kolobov G. A., Panov V. S., Rakova N. N. Tekhnologii vtorichnykh tugoplavkikh redkikh metallov (obzor) [Technologies of secondary refractory rare metals (review)]. *Izv. Vuzov. Tsvetn. Metall.*, 2015, no. 1, pp. 41–48. (In Russ.).
2. Maksimova A. M. Izvlechenie redkikh i redkozemel'nykh metallov iz tekhnogennykh ob'ektov kak put' k ratsional'nomu osvoeniyu neдр [Extraction of rare and rare-earth metals from technogenic sources as a path to rational subsoil development]. *Vestn. Evraziiskoi Nauki*, 2016, vol. 8, no. 5 (36), p. 43. (In Russ.).
3. Hassan E. S. R., Chen Y., Abdel-Khalek N. A., Elbendari A. M. Enhanced tantalum and niobium recovery from fine-grained low-grade Abu Dabbab ore using Falcon concentration and magnetic separation. *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, no. 1, p. 10432.
4. Simco M. M., Bradshaw R. C., Hyers R. W. Recovery of Rhenium from Superalloy Swarf, Grindings, Turnings, and Scrap. *TMS Annual Meeting & Exhibition*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 165–173.
5. Leszczyńska-Sejda K., Malarz J., Ciszewski M., Kopyto D., Goc K., Grzybek A., Benke G. Hydrometallurgical Technology for Producing Rhenium (VII) and Cobalt (II) from Waste. *Crystals*, 2024, vol. 14, no. 9, p. 783.
6. Ferron C. J., Peer J., Andrews J., Fleming C. A. Hydrometallurgical Production of High-Purity Ammonium Perrhenate from Superalloy Scrap. *Conference of Metallurgists*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 1217–1223.
7. Kowalik P., Kopyto D., Benke G., Ciszewski M., Grzybek A., Malarz J., Leszczyńska-Sejda K. Application of Electrodialysis to Production of High-Purity Perrhenic Acid. *Separations*, 2024, vol. 11, no. 9, p. 253.
8. Li X. T., Li J., Liu S. Q., Du S. H., Wang S. J., Chen J., Cheng S. B. Dual External Field Strategy in Regulating the Superhalogen Characteristics of the Non-Noble Metal Constituted Tantalum Oxide Clusters. *J. Phys. Chem. A*, 2024, vol. 128, no. 27, pp. 5298–5306.
9. Moradizadeh L., Johar M., Chellehbari Y. M., Li X., Shahgaldi S. Optimized tantalum interlayer thickness for PTLs: Enhancing PEMWE performance, stability, and reducing precious metal loading. *J. Power Sources*, 2025, vol. 647, p. 237360.
10. Watanabe Y., Tange M., Kanaya Y., Okuyama H., Tanaka S. Tantalum Processing Development for Medical Applications Insights from Relationship of Thermal Processes and Mechanical Properties by LMM-based AM and MIM. *J. Japan Soc. Powder Powder Metall.*, 2025, vol. 72, suppl., pp. S1099–S1102.
11. Yuan J., Wang Y., Hou X., Zhong J., Tan D. The influence of low degree of deformation on the corrosion resistance of pure tantalum in corrosive media. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 2024, vol. 125, p. 106899.
12. Targanov I. E., Bardysh A. V., Troshkina I. D. Sorption of Rhenium from Cobalt–Nickel Mother Liquors Formed in Complex Processing of Rhenium-Containing Superalloy Waste. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2022, vol. 95, no. 11, pp. 1715–1722.
13. Targanov I. E., Solodovnikov M. A., Troshkina I. D. Oxidative leaching of rhenium from grinding waste of rhenium-containing superalloys. *Izv. Non-Ferr. Metall.*, 2023, vol. 29, pp. 25–33.
14. Liu J., Tang J., Sun Y., Zhou Y., Shi F. Recovery of Ni and Co elements from superalloy leaching solution by sodium roasting and water leaching. *JOM*, 2024, vol. 76, no. 7, pp. 3393–3401.
15. Kuznetsova O. G., Levin A. M., Sevost'yanov M. A. Elektrokhimicheskaya pererabotka otkhodov tyazhelykh vol'framovykh spлавov v ammonochno-karbonatnykh rastvorakh pod deistviem postoyannogo i peremennogo toka [Electrochemical processing of heavy tungsten alloy waste in ammonia-carbonate solutions under direct and alternating current]. *Tr. Kol'sk. Nauch. Tsentra RAN. Ser.: Tekh. Nauki*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 155–159. (In Russ.).
16. Chen X., Sun Y., Wang L., Qu X., Zhao Y., Xie H. W., Yin H. Y. Electrochemically recycling degraded superalloy and valorizing CO₂ in the affordable borate-modified molten electrolyte. *Tungsten*, 2024, vol. 6, no. 2, pp. 382–393.
17. Ruziev U. N., Guro V. P., Sharipov Kh. T., Kayumov B. B. U., Niyazmatov A. A. Syr'e dlya modifitsirovannykh tverdykh spлавov na osnove karbida vol'frama [Raw materials for modified cemented carbides based on tungsten carbide]. *Khim. Zh. Kazakhstana*, 2022, no. 1 (77), pp. 37–50. (In Russ.).
18. Panova Y., Aubakirov Y., Arbag H. Selection of sorption materials for the extraction of nickel and cobalt from the ore of the Gornostaeviskoye deposit. *Chem. Bull. Kazakh Natl. Univ.*, 2021, vol. 102, no. 3, pp. 4–12.
19. Vodolazov L., Shvab A. Mathematical modeling of the kinetics of ion exchange of tantalum and niobium. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1981, vol. 261, no. 5, p. 1183. (In Russ.).
20. de Souza Gonçalves G. A., de Carvalho T. C., Garjulli F., de Carvalho M. S., Espinosa D. C. R. Adsorption of niobium and tantalum contained in tin slag by ion-exchange resins: Equilibrium isotherms, kinetic and thermodynamic studies. *Zh. Ustoich. Metall.*, 2023, vol. 9, no. 3, pp. 1329–1343. (In Russ.).
21. Warshawsky A. Solvent impregnated resins. *Ion Exch. Solvent Extr.*, 1981, vol. 8, p. 229.

22. Ezzati R., Ezzati S., Azizi M. Exact solution of the Langmuir rate equation: New Insights into pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetics models for adsorption. *Vacuum*, 2024, vol. 220, p. 112790.
23. Taraba B., Bulavová P. Second or pseudo-second-order model for adsorption kinetics? *Sep. Sci. Technol.*, 2022, vol. 57, no. 10, pp. 1558–1562.
24. El-Kamash A. M. Evaluation of zeolite A for the sorptive removal of Cs^+ and Sr^{2+} ions from aqueous solutions using batch and fixed bed column operations. *J. Hazard. Mater.*, 2008, vol. 151, no. 2–3, pp. 432–445.
25. Turkowska M., Karoń K., Milewski A., Jakóbik-Kolon A. Solvent-impregnated sorbents for tantalum from niobium separation using a fixed-bed column. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 4, p. 1513.

Информация об авторах

М. А. Солодовников — аспирант;

И. Д. Трошкина — доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

M. A. Solodovnikov — Graduate Student;

I. D. Troshkina — Dr. Sc. (Engineering), professor.

Статья поступила в редакцию 24.06.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 27.08.2025.
The article was submitted 24.06.2025; approved after reviewing 25.08.2025; accepted for publication 27.08.2025.