

Научная статья
УДК 669.014.2:669.14
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.025

ЭКСТРАКЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ВАНАДИЯ(V) ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ТИТАНОМАГНЕТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

**Анна Михайловна Дворникова¹, Елена Анатольевна Белогурова²,
Александр Георгиевич Касиков³, Роман Иванович Корнейков⁴, Иван Гундарович Тананаев⁵**

^{1–5}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹a.dvornikova@chemy.kolasc.net.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1829-8947>

²e.shchelokova@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3374-6856>

³cobaltag@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7694-0910>

⁴r.korneikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9178-364X>

⁵i.tananaev@chemy.kolasc.net.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2159-8182>

Аннотация

В статье представлены результаты изучения возможности жидкостной экстракции ванадия (V) из карбонатных растворов выщелачивания титаномagnetита. Установлено, что вторичные высокомолекулярные спирты не эффективны для этих целей из-за высокого солевого фона. Перспективными экстрагентами являются третичные амины и ЧАО, способные извлекать ванадий из раствора выщелачивания, содержащего значительные количества Na₂SO₄, после корректировки pH.

Ключевые слова:

титаномagnetит, ванадий, жидкостная экстракция, 2-октанол, 2-октанон, Alamine 308, Aliquat 336

Благодарности:

статья выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук № FMEZ-2025-0065.

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2025-0065.

Для цитирования:

Экстракционное извлечение ванадия(V) при переработке титаномagnetитового концентрата / А. М. Дворникова [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 137–143. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.025.

Original article

SOLVENT EXTRACTION OF VANADIUM(V) AT TITANOMAGNETITE CONCENTRATE PROCESSING

**Anna M. Dvornikova¹, Elena A. Belogurova², Alexander G. Kasikov³, Roman I. Korneykov⁴,
Ivan G. Tananaev⁵**

^{1–5}Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

¹a.dvornikova@chemy.kolasc.net.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1829-8947>

²e.shchelokova@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3374-6856>

³cobaltag@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7694-0910>

⁴r.korneikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9178-364X>

⁵i.tananaev@chemy.kolasc.net.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2159-8182>

Abstract

The paper presents results of studying the possibility of vanadium(V) solvent extraction (SX) from carbonate solutions of titanomagnetite leaching. It was found that secondary high-molecular alcohols are not effective for these purposes due to the high salt concentration. Tertiary amines and quaternary ammonium salts are promising extractants. They are capable of extracting vanadium from a leach solution containing significant amounts of Na₂SO₄ after pH adjustment.

Keywords:

titanomagnetite, vanadium, SX, 2-octanol, 2-octanone, Alamine 308, Aliquat 336

Acknowledgments:

The article was prepared with the support of the federal budget on the topic of the state assignment for Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” No. FMEZ-2025-0065.

Funding:

State task on the topic of research No FMEZ-2025-0065.

For citation:

Solvent extraction of vanadium(V) at titanomagnetite concentrate processing / A. M. Dvornikova [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 137–143. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.025.

Введение

В 2020-х гг. на рынке ванадия наблюдался устойчивый рост за счет перспектив его использования в ванадиевых аккумуляторных редокс-батареях. По оценке специалистов Atlantic, прогнозировалось увеличение потребления ванадия в этом секторе до 50 % к 2025 г. [1]. Мировое производство ванадия в эти годы также демонстрировало устойчивый рост: в частности, с 2010 по 2019 г. оно возросло в 1,5 раза — с 64,6 до 103,6 тыс. т [2]. Несмотря на то, что в 2020 г. объемы производства, как и спрос, сократились в результате кризиса, вызванного пандемией COVID-19, снижение цен на металл способствовало возобновлению интереса к исследованиям ванадиевых аккумуляторов; любой прорыв в данной области приведет к значительному росту спроса на ванадий, что может стать причиной дефицита и повышения цен на металл [3].

Таким образом, в связи с оптимистичностью прогнозов по рынку ванадия, наряду с ограниченностью сырьевой базы, актуальным является исследование возможности переработки техногенного ванадийсодержащего сырья, которое ранее считалось малоперспективным.

В хвостохранилищах апатитонегелинового производства Кольского полуострова еще к концу прошлого века было накоплено порядка 750 млн т техногенного ванадийсодержащего сырья (содержание титаномagnetита более 1,5 %), и ежегодно в отвалы продолжает выводиться порядка 300 тыс. т отходов, имеющих в своем составе высокотитанистый титаномagnetит (15–17 % TiO_2) [4]. Вовлечение в переработку альтернативных сырьевых источников, помимо расширения сырьевой базы, будет способствовать снижению антропогенной нагрузки на экосистемы и улучшению экологической обстановки Арктического региона, поэтому разработка эффективных современных технологий для его переработки является актуальной задачей [5].

Целью настоящей работы является разработка эффективной экстракционной технологии для извлечения ванадия из растворов, полученных при комбинированной пиро-гидрометаллургической переработке титаномagnetитового концентрата Хибинского месторождения.

В качестве объекта исследования были использованы растворы выщелачивания титаномagnetитового концентрата (ТМК) Хибинского месторождения; исходный ТМК содержал приблизительно 0,58 % V_2O_5 . Для эффективного извлечения ванадия в раствор исходный продукт подвергали обжигу при температуре 400–1100 °C в присутствии щелочных добавок с последующим селективным карбонатным выщелачиванием металла. Полученные растворы выщелачивания содержали до 2 г/л V(V) в присутствии 20–40 г/л Na_2CO_3 .

Модельные растворы ванадия (V) готовили из реактивных солей метаванадата аммония и сульфата натрия квалификации не ниже «Ч», корректировку pH проводили добавлением разбавленных растворов H_2SO_4 и NaOH под контролем pH-метра И-160МИ. Процесс экстракции проводили в пробирках объемом 0,05 л при ручном встряхивании (при комнатной температуре), в экспериментах при повышенной температуре — в термостатируемой круглодонной колбе с магнитным перемешиванием на установке на основе IKA Werke C-MAG HS7 с термодатчиком ETS D5.

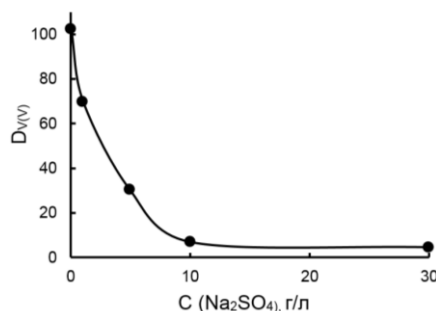
Из обзора литературных данных следует, что для извлечения ванадия (V) из слабощелочных и близких к нейтральным солевым растворам перспективны вторичные алифатические спирты [6; 7] и экстрагенты аминного типа [8; 9]. В настоящей работе для экстракционного извлечения ванадия (V) в качестве экстрагентов были опробованы вторичный октиловый спирт DL-2-октанол (ОКЛ2) квалификации 97,0 % импортного производства (Acros Organics) и его смеси с октиловым кетоном

2-октанолом (ОКН2) квалификации «Ч» отечественного производства («Вектон»), а также классические экстрагенты аминного типа — третичные и четвертичные (ЧАО) амины марок Alamine 308 и Aliquat 336 импортного производства (BASF) в виде растворов в углеводородном разбавителе Russol D70. Содержание ванадия в рабочих растворах определяли по спектрометрической методике, описанной в [7], по окрашенному комплексу, образуемому в присутствии H_2O_2 , на приборе Unico 1201. Показатели извлечения ванадия (V) при экстракции рассчитывали из материального баланса эксперимента.

Результаты

В ходе изучения экстракционного способа извлечения ванадия из растворов щелочного выщелачивания спека было установлено, что прямое извлечение ванадия из растворов без корректировки pH невозможно ни одним из опробованных экстрагентов.

Несмотря на то, что вторичные алифатические спирты способны селективно извлекать ванадий (V) при pH 2–3 [6; 7], его экстракция из раствора выщелачивания ТМК ОКЛ2 и смесями ОКЛ2 с 10–50 об. % ОКН2, которые в ряде случаев проявляли синергетические свойства [10; 11], не происходит из-за высокого содержания солей натрия (≥ 20 г/л Na_2CO_3 , см. рисунок). Синергетический эффект не обнаружен и при экстракции ванадия (V) из модельных растворов в отсутствии солевого фона (табл. 1).



Влияние концентрации Na_2SO_4 на коэффициенты распределения при экстракции ванадия (V) ОКЛ2.
 $C(V)_{исх} = 0,5$ г/л; pH = 2,5; О:В = 1:1; $\tau = 10$ мин; $T = 60$ °C

Таблица 1

Влияние состава экстрагента на степень извлечения ванадия (V) из модельных растворов

Компонент	Содержание, об. %			
ОКЛ2	100	90	70	50
ОКН	0	10	30	50
Степень извлечения E_V , %	82,5	75,2	52,6	52,6

Примечание. $C(V)_{исх} = 1,14$ г/л; pH = 2,5; О:В = 1:1; $T = 60$ °C; $\tau = 10$ мин.

Экстракционные смеси на основе ЧАО с добавкой ОКЛ2 также оказались малоэффективны для прямого извлечения ванадия (V) из раствора выщелачивания (без корректировки pH); степень извлечения не превышала 22,4 % даже для концентрированного 30 об. % Aliquat 336 (табл. 2). К тому же наблюдались затруднения на стадии расслаивания фаз и образование третьей фазы в экстрактах с низким содержанием октилового спирта (5–10 % ОКЛ2).

При нейтрализации карбонатных растворов выщелачивания серной кислотой (в зависимости от pH) возможна достаточно эффективная экстракция ванадия (V) экстрагентами аминного типа (Aliquat 336, Alamine 308) даже при достаточно высоком солевом фоне (≥ 40 г/л Na_2CO_3). Установлено, что высокое содержание октилового спирта в смеси с амином (20 % ЧАО + 80 % ОКЛ2) заметно подавляет экстракцию ванадия (V) даже при нейтрализации раствора до pH = 7,2 ($E_V = 27,6$ %), поэтому далее использовали экстракционные смеси на основе аминов, содержащие небольшие количества спирта или кетона в качестве модификатора.

Таблица 2

Экстракция V (V) из карбонатных растворов выщелачивания
без корректировки pH экстракционными смесями
на основе Aliquat 336 и ОКЛ2 или ОКН2 в качестве модификаторов

Компонент	Содержание, об. %			
Aliquat 336	10	10	15	30
Модификатор	—	40 ОКЛ2	5 ОКЛ2	10 ОКЛ2
Разбавитель	90 ОКЛ2	50 ОКН	80 Russol D70	60 Russol D70
E_V , %	Экстракции нет	Экстракции нет	20,0	22,4

Примечание. $C(\text{Na}_2\text{CO}_3) \sim 20\text{--}40$ г/л; $C(V)_{\text{исх}} \sim 0,6$ г/л; pH $\sim 12\text{--}12,5$; O:B = 1:1; $T = 25$ °C; $\tau = 5$ мин.

Оптимизация процесса выщелачивания показала, что для высокоселективного извлечения ванадия необходимо содержание карбоната натрия в растворах порядка 40 г/л при содержании ванадия 0,5–1 г/л. Прямая нейтрализация таких растворов до pH, необходимого для последующей экстракции ванадия (V), требует значительного расхода кислоты при корректировке pH, что также приводит к разбавлению растворов и увеличению объемов потоков. С целью снижения объемов растворов, подаваемых на экстракцию, опробована схема с предварительным концентрированием ванадия путем упаривания. При упаривании в 5–7 раз из раствора выпадал осадок Na_2CO_3 , который можно отделить и вернуть на стадию переработки ванадиевого концентрата.

Однако в результате последующей нейтрализации упаренного раствора до pH = 8,52 из раствора выпал трудно фильтруемый осадок (вероятно, на основе кремниевой кислоты), который, помимо прочего, способен частично сорбировать ванадий, что приводит к его потерям. Поэтому, несмотря на достаточно высокие показатели экстракции ванадия 30 % Aliquat 336 с добавкой 10 % ОКЛ2 из маточного раствора фильтрации ($E_V = 91,2$ %) на высоком солевом фоне (~ 200 г/л Na_2CO_3), такая схема малоприменима для применения на практике.

Проведена оценка необходимой глубины нейтрализации растворов выщелачивания для последующего эффективного извлечения ванадия (V). Установлено, что основной расход кислотного реагента приходится на нейтрализацию растворов до pH $\sim 6\text{--}7$, которая происходит с достаточно бурным выделением CO_2 и занимает значительное время (10–15 мин в условиях лабораторного эксперимента), после установления pH ниже 6 выделение газа практически прекращается и на доведение pH до более кислых значений требуется небольшое количество кислоты. Более глубокая нейтрализация и подкисление раствора до pH $\sim 2\text{--}3$ делает возможной извлечение ванадия (V) менее основными, чем ЧАО, реагентами класса третичных аминов, в частности Alamine 336 [12–17]. Преимуществом последних является более легкая реэкстракция и часто более высокая селективность, чем при использовании ЧАО.

Получены данные по влиянию кислотности водной фазы на экстракцию ванадия (V) экстрагентами различного состава (табл. 3).

Таблица 3

Влияние pH на экстракцию ванадия (V) экстрагентами аминного типа
из раствора выщелачивания ТМК после корректировки pH

Состав экстрагента, об. %	pH исходного раствора						
	1,99	3,01	4,32	6,20	7,67	8,10	8,52
30 Aliquat 336 + 10 ОКЛ2	90,9	99,0	Н/д	Н/д	Н/д	84,6	93,2
30 Alamine 308 + 10 ОКЛ2	88,3	99,8	97,5	94,6	84,0	Н/д	Н/д
30 Alamine 308 + 30 ОКН	Н/д	100,0	99,2	98,0	92,3	Н/д	Н/д

Примечание. $C(\text{Na}_2\text{CO}_3) \sim 20\text{--}40$ г/л; $C(V)_{\text{исх}} = 0,4\text{--}0,5$ г/л; O:B = 1:1; $T = 25$ °C; $\tau = 5$ мин. Н/д — нет данных.

Как видно из табл. 3, в условиях эксперимента эффективная экстракция ванадия (V) 30 об.% Alamine 308 возможна в более широком диапазоне pH ($\text{pH} \sim 3\text{--}6$), чем заявлено в литературных источниках [12–17], что, возможно, связано с высоким солевым фоном в исследуемой системе.

Изучена возможность щелочной реэкстракции из экстрактов аминного типа. Установлено, что из экстрактов на основе 30 % Alamine 308 возможна реэкстракция $\sim 80\text{--}81$ % ванадия (V) 3 моль/л аммиаком, при этом в таких условиях реэкстракция ванадия из ЧАО аналогичной концентрации не идет. Для выделения ванадия из последних нужны более жесткие условия, например, растворы 5 моль/л H_2SO_4 (степень реэкстракции, $E_{\text{p/3}} \sim 34$ %) или 1–2 моль/л NaOH ($E_{\text{p/3}} \sim 21$ %), поэтому для получения более чистых растворов товарной формы ванадия в виде солей аммония более перспективны экстрагенты на основе третичных аминов.

Тем не менее известно [15; 18], что в присутствии ванадия классические экстрагенты на основе третичных аминов с добавлением спирта в процессе эксплуатации в достаточно кислых растворах ($\text{pH} \leq 1$) могут подвергаться гидролизу, поэтому для извлечения ванадия, возможно, следует использовать экстракционные смеси, которые могут работать в менее кислых средах и не содержат спирта, в частности смеси Alamine 308 с кетоном ОКН2. Следует отметить, что устойчивость экстрагентов такого состава к гидролизу требует дополнительных исследований перед внедрением в производственную практику.

Выводы

Установлено, что для извлечения ванадия из раствора выщелачивания ТМК перспективно использовать экстрагенты аминного типа после предварительной корректировки pH; 10–30 об. % растворы третичных аминов и ЧАО достаточно эффективно экстрагируют ванадий (V) из растворов с высоким содержанием солей (в том числе после упарки приблизительно в 5–7 раз) при pH 2 и 8,5 соответственно (до 93,2 %), при этом реэкстракция из третичных аминов, в отличие от ЧАО, возможна растворами аммиака с концентрацией 50 г/л.

Список источников

1. Влияние параметров обжига и реагентов на извлечение ванадия из техногенного сырья / М. В. Шубина [и др.] // Теория и технология металлургического производства. 2023. Т. 46, № 3. С. 4–9.
2. Колоскова И. С. Мировой и российский рынок ванадия // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2022. Т. 177, № 2. С. 80–84.
3. Обзор мирового рынка ванадия и перспективы развития до 2034 г. 2025. URL: https://marketpublishers.ru/report/industry/metallurgy/vanadium_market_review.html (дата обращения: 04.06.2025).
4. Щукина Е. С., Виноградова С. В., Закурко Д. В. Поведение титаномагнетита при его взаимодействии с раствором серной кислоты // Труды КНЦ РАН. Сер. Технические науки. 2024. Т. 15, № 1. С. 435–442.
5. Касиков А. Г., Арешина Н. С. Утилизация и комплексная переработка продуктов и отходов газоочистки медно-никелевого производства. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. 196 с.
6. Способ извлечения ванадия из кислых растворов: пат. 2492254 Рос. Федерация МПК С 22 В 34/22, 3/26; заявл. 29.06.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 25. 9 с.
7. Kasikov A. G., Sokolov A., Shchelokova E. Extraction of iron(III) from nickel chloride solutions by mixtures of aliphatic alcohols and ketones // Solv. Extr. Ion Exch. 2022. Vol. 40, no. 3, pp. 1–18.
8. Solvent extraction of vanadium from sodium carbonate–sodium bicarbonate solution using Aliquat-336 / F. Yang [et al.] // Mining, Metallurgy and Exploration. 2020, no. 37. P. 1667–1672.
9. Preparation of vanadyl sulfate electrolyte for vanadium flow battery from vanadium slag using calcium salt precipitation, sodium carbonate leaching and solvent extraction / Z. Wang [et al.] // Hydrometallurgy. 2023. Vol. 222. P. 106146.
10. Дворникова А. М., Касиков А. Г. Синергетическая экстракция ванадия (V) смесями на основе высокомолекулярных алифатических спиртов и кетонов из сернокислых растворов // Труды КНЦ РАН. Химия и материаловедение. 2020. Т. 11, № 3–4. С. 51–54.
11. Kasikov A. G., Sokolov A., Shchelokova E. Extraction of iron(III) from nickel chloride solutions by mixtures of aliphatic alcohols and ketones // Solv. Extr. Ion Exch. 2022, Vol. 40, no. 3, pp. 1–18.
12. Recovery of pure vanadium pentoxide from spent catalyst by solvent extraction / S. Sadanandam [et al.] // Trans. Indian Inst. Met. 1996. Vol. 49, no. 6. P. 795–801.

13. Lozano L. J., Godínez C. Comparative study of solvent extraction of vanadium from sulphate solutions by primene 81R and Alamine 336 // *Minerals Engineering*. 2003. Vol. 16, no. 3. P. 291–294.
14. Vanadium recovery from oil fly ash by leaching, precipitation and solvent extraction processes / R. Navarro [et al.] // *Waste Management*. 2007. Vol. 27, no. 3. P. 425–438.
15. Speciation of vanadium (V) extracted from acidic sulfate media by trioctylamine in n-dodecane modified with 1-tridecanol / A. Chagnes [et al.] // *Hydrometallurgy*. 2010. Vol. 104. P. 20–24.
16. G. Ye [et al.] Extraction of vanadium from direct acid leaching solution of clay vanadium ore using solvent extraction with N235 // *Hydrometallurgy*. 2018. Vol. 177. P. 27–33.
17. Recovery of vanadium from leach solutions of vanadium slag using solvent extraction with N235 / Z. Qin [et al.] // *Hydrometallurgy*. 2020. Vol. 192. P. 105259.
18. Chemical degradation of trioctylamine and 1-tridecanol phase modifier in acidic sulfate media in the presence of vanadium (V) / A. Chagnes [et al.] // *Hydrometallurgy*. 2011. Vol. 105, no. 3. P. 328–333.

References

1. Shubina M. V., Mahotkina E. S., Shubin I. G. Vliyanie parametrov obzhiga i reagentov na izvlechenie vanadiya iz tehnoгенного syriya [Influence of roasting parameters and reagents on the extraction of vanadium from technogenic raw materials]. *Theor. i technol. metallurg. proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgy], 2023, Vol. 46, no. 3, pp. 4–9. (In Russ.).
2. Koloskova I. S. Mirovoy i Rossiyskiy rynek vanadiya [Vanadium market of Russia]. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources. Economics and Management], 2022, Vol. 177, no. 2, pp. 80–84. (In Russ.).
3. *Obzor mirovogo rynka vanadiya i perspektivy razvitiya do 2034 g.* [World's vanadium market review and its prospects up to 2034]. 2025. Available at: https://marketpublishers.ru/report/industry/metallurgy/vanadium_market_review.html (accessed 04.06.2025). (In Russ.).
4. Schukina E. S., Vinogradova S. V., Zakurko D. V. Povedenie titanomagnetita pri ego vzaimodeistvii s rastvorom sernoi kisloty [Behavior of titanomagnetite during its interaction with sulfuric acid solution]. *Trudy KNC RAN. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Technical Sciences Series], 2024, Vol. 15, no. 1, pp. 435–442. (In Russ.).
5. Kasikov A. G., Areshina N. S. *Utilizatsiya i kompleksnaya pererabotka produktov i otkhodov gazoochistki medno-nikelievogo proizvodstva* [Utilization and complex processing of gas purification products and waste of copper-nickel production]. Apatity, FITZ KNC RAN, 2019, 196 p.
6. Kasikov A. G., Petrov V. N., Petrova A. M. Sposob izvlecheniya vanadiya iz kislykh rastvorov. Pat. 2492254 Russia IPC C 22 B 34/22, 3/26. [Method for extracting vanadium from acid solutions. Patent 2492254 Russia IPC C 22 B 34/22, 3/26], appl. 29.06.2012, publ. 10.06.2013, Bul. no. 25. (In Russ.).
7. Kasikov A. G., Petrov V. N., Petrova A. M. Extraction of vanadium (V) from acid solutions with octyl alcohol isomers. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2013, Vol. 86, no. 3, pp. 355–359.
8. Yang F., Li X., Han L., Gao F., He Ch., Wei Y. Solvent extraction of vanadium from sodium carbonate–sodium bicarbonate solution using Aliquat-336. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 2020, no. 37, pp. 1667–1672.
9. Wang Z., Chen L., Yin R., Li Z., Deng G., Liang B., Zhu Y., Wu K., Luo D. Preparation of vanadyl sulfate electrolyte for vanadium flow battery from vanadium slag using calcium salt precipitation, sodium carbonate leaching and solvent extraction. *Hydrometallurgy*, 2023, Vol. 222, p. 106146.
10. Dvornikova A. M., Kasikov A. G. Sinergeticheskaya ekstrakciya reniya (VII) smesyami na osnove visokomolekulyarnykh alifaticheskikh spirtov i ketonov iz sernokislykh rastvorov [Rhenium (VII) synergistic solvent extraction with mixtures on the basis of high-molecular aliphatic alcohols and ketones from sulphuric acid solutions]. *Trudy KNC RAN. Khimiya i materialovedenie* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Chemistry and Materials Science], 2020, Vol. 11, no. 3–4, pp. 51–54. (In Russ.).
11. Kasikov A. G., Sokolov A., Shchelokova E. Extraction of iron(III) from nickel chloride solutions by mixtures of aliphatic alcohols and ketones. *Solv. Extr. Ion Exch.*, 2022, Vol. 40, no. 3, pp. 1–18.
12. Sadanandam S., Fonseca N. F., Gharat S. S., Menon N. K., Tangri S. K., Mukherjee T. K. Recovery of pure vanadium pentoxide from spent catalyst by solvent extraction. *Trans. Indian Inst. Met.*, 1996, Vol. 49, no. 6, pp. 795–801.
13. Lozano L. J., Godínez C. Comparative study of solvent extraction of vanadium from sulphate solutions by primene 81R and Alamine 336. *Minerals Engineering*, 2003, Vol. 16, no. 3, pp. 291–294.
14. Navarro R., Guzman J., Saucedo I., Revilla J., Guibal E. Vanadium recovery from oil fly ash by leaching, precipitation and solvent extraction processes. *Waste Management*, 2007, Vol. 27, no. 3, pp. 425–438.
15. Chagnes A., Rager M.-N., Courtaud B., Thiry J., Cote G. Speciation of vanadium (V) extracted from acidic sulfate media by trioctylamine in n-dodecane modified with 1-tridecanol. *Hydrometallurgy*, 2010, Vol. 104, pp. 20–24.

16. Ye G., Hu Y., Tong Z., Lu L. Extraction of vanadium from direct acid leaching solution of clay vanadium ore using solvent extraction with N235. *Hydrometallurgy*, 2018, Vol. 177, pp. 27–33.
17. Qin Z., Zhang G., Xiong Y., Luo D., Li C., Tang S. Recovery of vanadium from leach solutions of vanadium slag using solvent extraction with N235. *Hydrometallurgy*, 2020, Vol. 192, pp. 105259.
18. Chagnes A., Fosse C., Courtaud B., Thiry J., Cote G. Chemical degradation of trioctylamine and 1-tridecanol phase modifier in acidic sulfate media in the presence of vanadium (V). *Hydrometallurgy*, 2011, Vol. 105, no. 3, pp. 328–333.

Информация об авторах

А. М. Дворникова — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
Е. А. Белогурова — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
А. Г. Касиков — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник;
Р. И. Корнейков — кандидат технических наук, заместитель директора по инновациям;
И. Г. Тананаев — академик РАН, доктор химических наук, директор.

Information about the authors

A. M. Dvornikova — PhD (Engineering), Senior Researcher;
E. A. Belogurova — PhD (Engineering), Senior Researcher;
A. G. Kasikov — PhD (Chemistry), Leading Researcher;
R. I. Korneykov — PhD (Engineering), Deputy Director for Innovation;
I. G. Tananaev — Academician of RAS, DSc (Chemistry), Director.

Статья поступила в редакцию 27.05.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 01.07.2025.
The article was submitted 27.05.2025; approved after reviewing 17.06.2025; accepted for publication 01.07.2025.