

Научная статья
УДК 546.882'883:542.61
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.040

ОСОБЕННОСТИ ЭКСТРАКЦИОННОЙ СЕРНОКИСЛОТНО-ФТОРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ НИОБИЙ- И ТАНТАЛСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

**Александр Всеволодович Смирнов¹, Станислав Викторович Жуков²,
Александр Павлович Орлов³, Андрей Валерьевич Нечаев⁴**

^{1, 2, 3, 4}ГК «Русредмет», Санкт-Петербург, Россия

¹asmirnov@rusredmet.ru

²szhukov@rusredmet.ru

³orlov.ostrov@yandex.ru

⁴anechaev@rusredmet.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований вскрытия ниобий- и танталсодержащего сырья растворами фтористоводородной и серной кислот. Проведены исследования по экстракционной очистке и разделению ниобия и тантала из фторидно-сернокислых растворов с получением оксидов ниобия и оксидов тантала требуемого качества с использованием октанола-1 в качестве экстрагента. Показана возможность утилизации отработанных технологических сульфатно-фторидных растворов с получением сульфата магния семиводного. Изложена информация о проведении работ по использованию пирогидролитиза как безреагентного метода выделения товарных соединений и регенерации фтористоводородной кислоты.

Ключевые слова:

ниобий- и танталсодержащее сырье, вскрытие, экстракция, октанол-1, оксид ниобия, оксид тантала, сульфат магния семиводный, брусит, пирогидролитиз, фтористоводородная кислота

Для цитирования:

Особенности экстракционной сернокислотно-фторидной технологии переработки ниобий- и танталсодержащего сырья / А. В. Смирнов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 1. С. 223–228. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.040

Original article

FEATURES OF THE EXTRACTION SULFURIC ACID-FLUORIDE TECHNOLOGY FOR PROCESSING NIOBIUM- AND TANTALUM-CONTAINING RAW MATERIALS

Alexander V. Smirnov¹, Stanislav V. Zhukov², Alexander P. Orlov³, Andrey V. Nechaev⁴

^{1, 2, 3, 4}GK "Rusredmet", Saint Petersburg, Russia

¹asmirnov@rusredmet.ru

²szhukov@rusredmet.ru

³orlov.ostrov@yandex.ru

⁴anechaev@rusredmet.ru

Abstract

The results of researching of the leaching of niobium- and tantalum-containing raw materials by solutions of hydrofluoric and sulfuric acids are presented. Researching have been carried out on the solvent extraction purification and separation of niobium and tantalum from their fluoride-sulfuric acid solutions to obtain niobium oxides and tantalum oxides of the required quality using octanol-1 as an extractant. The possibility of recycling waste technological sulphate-fluoride solutions with the production of magnesium sulfate heptahydrate is shown. Information on the work on the use of pyrohydrolysis as a reagentless method for the isolation of products and the regeneration of hydrofluoric acid is presented.

Keywords:

niobium- and tantalum-containing raw materials, leaching, solvent extraction, octanol-1, niobium oxide, tantalum oxide, magnesium sulfate heptahydrate, brucite, pyrohydrolysis, hydrofluoric acid

For citation:

Features of the extraction sulfuric acid-fluoride technology for processing niobium- and tantalum-containing raw materials / A. V. Smirnov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 223–228. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.040

При переработке ниобий- и танталсодержащих концентратов и сырья используется фтористоводородная (плавиковая) кислота [1, 2]. В связи с высокой стоимостью данного реагента проблема его рационального использования с целью снижения операционных затрат не теряет актуальности. С этим также тесно связаны вопросы утилизации фторсодержащих растворов и экологической опасности производств.

Несмотря на то что экстракционный метод извлечения, разделения и получения чистых и высокочистых оксидов ниобия и тантала из сульфатно-фторидных сред достаточно хорошо изучен [2–4], при разработке экстракционной технологии переработки ниобий- и танталсодержащего сырья необходимо учитывать специфику исходных материалов, осуществить выбор наиболее эффективного экстрагента, оптимизировать условия получения соединений ниобия и тантала на различных стадиях экстракционного процесса, а также опробовать методы обращения с отработанными растворами (например, рафинатами после экстракционного процесса) и способы регенерации дорогостоящей фтористоводородной кислоты.

На основании многолетнего опыта и доступных данных (в том числе подготовленных учеными Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук) [4, 5] нами проведены исследования по разработке гидрометаллургических схем переработки ниобий- и танталсодержащего сырья с получением оксида ниобия и оксида тантала в виде готовой продукции, основные результаты которых представлены в работах [5, 6]. Базовая технологическая схема предлагаемой технологии известна и включает следующие основные стадии: сульфатно-фторидное вскрытие сырья → экстракционное разделение ниобия и тантала с очисткой их от примесей → получение Nb_2O_5 и Ta_2O_5 , однако вопросам рационального использования фтористоводородной кислоты и утилизации фторсодержащих растворов исследователями уделяется незначительное внимание.

Ранее нами было показано [5, 6], что определяющим условием для успешной организации экстракционного разделения при переработке редкометалльных материалов, содержащих Nb_2O_5 и Ta_2O_5 в соотношении от 10 : 1 (например, колумбитовый концентрат) до 1 : 1 (природный колумбито-танталит), является процесс вскрытия исходного сырья. Испытаниями установлены параметры сульфатно-фторидного вскрытия обоих материалов: температура, концентрация и расход фтористоводородной кислоты, а также содержание в смеси до 350–400 г/л серной кислоты положительно влияют на степень извлечения Nb_2O_5 и Ta_2O_5 как из колумбитового концентрата, так и из колумбито-танталита. Показано, что повышение температуры, а также увеличение содержания в смеси фтористоводородной кислоты до 230 г/л и до 400 г/л серной кислоты существенно и положительно влияют на степень извлечения ниобия и тантала. При использовании фтористоводородной кислоты в избытке 30 % от стехиометрически необходимого, через 6 ч в раствор переходит более 90 % Nb_2O_5 и Ta_2O_5 . Наименьшее извлечение ниобия и тантала в раствор отмечено в опытах, характеризующихся низкой концентрацией серной кислоты в растворе, — 0 и 100 г/л, а также низкой температурой — 50 °С (извлечение падает до 58,1–60,8 %). Тонину помола и продолжительность процесса выщелачивания в изученном интервале значений можно отнести к факторам второго порядка по степени их влияния на показатели процесса. Достигнутая в ряде лучших опытов концентрация ниобия и тантала в растворе вполне удовлетворяет требованиям последующего процесса их экстракционного разделения. С этой точки зрения нецелесообразно увеличивать и соотношение жидкой и твердой фаз при выщелачивании концентрата, остановившись на величине Ж : Т на уровне 4,5–5,0. В итоге при вскрытии необходимо выдержать такие условия, чтобы в исходном растворе на экстракционное разделение концентрация Nb_2O_5 находилась на уровне не менее 80–100 г/л, H_2SO_4 ~ 350–400 г/л, F^- — 220–240 г/л, Ta_2O_5 — 7–9 г/л. Раствор данного состава направляется на экстракционное разделение ниобия и тантала с очисткой их от примесей.

Для переработки ниобий- и танталсодержащих растворов выбрана схема с коллективной экстракцией ниобия и тантала, промывкой насыщенного экстракта и последующим разделением элементов на стадии селективной реэкстракции и экстракционным разделением Nb_2O_5 и H_2SO_4 из образующегося реэкстракта ниобия; в качестве экстрагента используется октанол-1. Проведены укрупненные непрерывные испытания предлагаемой технологии на многоступенчатом экстракционном каскаде, содержащем экстракторы типа смеситель-отстойник; отработаны режимы экстракции, промывки, реэкстракции ниобия и тантала, экстракционного разделения Nb_2O_5 и H_2SO_4 с получением реэкстрактов ниобия и тантала требуемого для получения оксида ниобия (содержание основного вещества не менее 99,5 %) и оксида тантала (содержание основного вещества не менее 99,9 %) качества.

Изучено распределение Nb_2O_5 и Ta_2O_5 в органической и водной фазах по камерам экстракционного каскада. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что процесс экстракции идет эффективно на 10–12 ступенях. Для стадии промывки насыщенного экстракта достаточно 5–6 ступеней, для селективной реэкстракции ниобия — 20 ступеней; для реэкстракции тантала — 6–8 ступеней, для экстракционного разделения Nb_2O_5 и H_2SO_4 из образующегося реэкстракта ниобия — 15 ступеней. Установлено, что в оптимальных условиях экстракционного процесса содержание целевых компонентов в реэкстракте ниобия: Nb_2O_5 — 150–170 г/л, Ta_2O_5 — < 0,05 г/л; в реэкстракте тантала: Ta_2O_5 — 15–25 г/л, Nb_2O_5 — 0,05–0,10 г/л.

Далее раствор, содержащий тантал в форме фтортанталовой кислоты, подвергается дополнительной экстракционной очистке для получения оксида тантала чистотой не менее 99,99 % с использованием октанола-1 в качестве экстрагента по разработанной нами ранее технологии [7]. При этом рафинат направляется на утилизацию сульфатно-фторидных растворов с получением сульфата магния семиводного с использованием способа, описание которого представлено ниже.

Реэкстракт ниобия предполагается перерабатывать методом пирогидролиза, разработка которого осуществляется нами в настоящее время.

После осаждения, промывки, просушки и прокалки получены экспериментальные образцы оксида ниобия чистотой не менее 99,5 % и оксида тантала чистотой не менее 99,9 %, соответствующие требованиям российского и мирового рынков редких металлов.

Для разработки новых технологических схем переработки ниобий- и танталсодержащего сырья предлагаются следующие приемы: способ утилизации отработанных технологических сульфатно-фторидных растворов с получением сульфата магния семиводного; использование пирогидролиза как безреагентного метода выделения товарных соединений ниобия и тантала и регенерации основного реагента технологии — фтористоводородной кислоты [8].

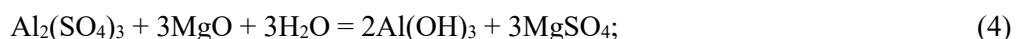
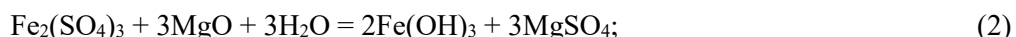
Утилизация отработанных технологических сульфатно-фторидных растворов с получением сульфата магния семиводного

К настоящему времени основным способом утилизации сульфатно-фторидных рафинатов (и других отработанных растворов) является нейтрализация «известковым молоком», характеризующаяся значительными затратами на приобретение извести и последующим получением большого количества твердых отходов.

В связи с этим для утилизации сульфатно-фторидных растворов предложен способ с использованием природного гидроксида магния — брусита. Брусит обладает рядом преимуществ перед гидратной известью: благодаря его использованию магний, содержащийся в утилизируемых растворах, становится не отходом производства, а продуктом — семиводным сульфатом магния, который потенциально может использоваться в качестве удобрений. При использовании брусита также снижается общее количество образующихся твердых и жидких отходов.

В работе используется брусит марки «Агромаг-М» (фракция 0–10 мм). В соответствии со стехиометрией реакций нейтрализации серной кислоты гидроксидом магния и гидроксидом кальция брусита требуется на ~ 20 % меньше, чем извести, что положительно сказывается на объеме приобретаемого материала и затратах на него. Брусит доступен на рынке российского природного сырья и имеет стоимость, сопоставимую со стоимостью гидратной извести.

Для получения сульфата магния семиводного рафинат после экстракционного разделения ниобия и тантала, а также после экстракционного разделения Nb_2O_5 и H_2SO_4 подвергается нейтрализации и очистке от примесей. Рафинат представляет собой сильноокислый сульфатно-фторидный раствор с содержанием сульфатов железа, марганца, титана, циркония, алюминия, кальция и др. При нейтрализации компоненты исходного раствора взаимодействуют с пульпой брусита следующим образом:



Учитывая рН гидратообразования указанных выше элементов, раствор необходимо нейтрализовать до рН = 10,0–11,0 для количественного осаждения всех примесей. Однако при этом начинает осажаться $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ($\text{pH}_{\text{гидр.}}^0 \sim 10$ ед.), что приводит к значительным потерям магния с железистым осадком. Поэтому в процессе нейтрализации необходимо поддерживать рН = 7,0–7,5. В данном интервале рН количественно осаждаются гидроксиды железа (III), алюминия (III), тогда как гидроксиды железа (II) и марганца (II) осаждаются частично. Поэтому необходимо окислять образующиеся в результате нейтрализации гидроксиды железа (II) и марганца (II) до легкоосаждаемых форм.

Исходя из результатов химического анализа рассчитано необходимое стехиометрическое количество MgO для нейтрализации сульфатно-фторидных рафинатов. Требуемое количество брусита добавляется к раствору порционно, при перемешивании и контролировании рН получаемой пульпы. При достижении рН значения 7,0–7,5 ед. подача прекращается. Поскольку в исходном растворе основная примесь — железо (+2) — находится в растворимой форме, для осаждения железа (+3) в полученную пульпу добавляется требуемое количество 35 %-й перекиси водорода. Выдержка пульпы проводится при перемешивании в течение 2,5–3,0 ч при температуре 70–90 °С. Следует отметить, что нейтрализация раствора сульфата магния и очистка от примесей проводятся с использованием брусита, содержащего также и до 5 % CaO . Оксид кальция также участвует в нейтрализации свободной серной кислоты с образованием гипса CaSO_4 , что приводит к значительному улучшению фильтрации осадка гидроксидов. Далее очищенный раствор подвергается упарке и кристаллизации с получением сульфата магния семиводного.

В готовом продукте (сульфате магния семиводном) лимитируется содержание таких токсичных примесей, как свинец, ртуть, кадмий, мышьяк. В результате работ получен экспериментальный образец, результаты химического анализа которого приведены в таблице.

Результаты химического анализа образца сульфата магния семиводного

Показатель	Результат
Массовая доля кальция (Ca), %	0,10
Массовая доля железа (Fe), %	< 0,01
Массовая доля марганца (Mn), %	< 0,01
Массовая доля свинца (Pb), мг/кг	< 0,5
Массовая доля ртути (Hg), мг/кг	< 0,1
Массовая доля кадмия (Cd), мг/кг	< 0,05
Массовая доля мышьяка (As), мг/кг	< 0,5

Образец удовлетворяет требованиям по содержанию макро- и микроэлементов, а также токсичных примесей, предъявляемым к сульфату магния семиводному, предназначенному для внесения при подкормке под овощные, кормовые, плодовые, ягодные, цветочные культуры, выращиваемые в открытом и защищённом грунтах в сельских коллективных и фермерских хозяйствах [9].

Пирогидролиз

Как показывает мировая практика, наиболее эффективным методом получения высокочистых соединений из растворов является метод жидкостной экстракции с использованием селективных экстрагентов, а способом получения из растворов порошков металлов с минимальным содержанием примесей — газофазный метод (spray roasting), или пирогидролиз солевых растворов в аппаратах типа «Андриц Рутнер» или их аналогах [8, 10].

В этом направлении в последние годы нами накоплен существенный задел. Показано, что методы пирогидролиза нашли наиболее широкое применения в черной металлургии для регенерации травильных растворов, главным образом хлорида железа. В то же время имеется достаточно исследований, позволяющих осуществить промышленную реализацию процессов пирогидролиза фтотитановых, фторниобиевых и фтортанталовых кислот с высокой степенью регенерации фтористоводородной кислоты. Однако освоению данного способа препятствуют недостаточная изученность процесса и сложности в аппаратном оформлении. Также проведена сравнительная экономическая оценка инвестиционных и операционных затрат на создание производства оксида ниобия двумя методами: аммиачным гидролизом (классическая технология) и пирогидролизом. По проведенной оценке, инвестиционные затраты для создания производства оксида ниобия методом пирогидролиза в ~ 1,8–2,0 раза

меньше инвестиционных затрат для создания производства по осадительному методу. При этом усредненная реагентная себестоимость оксида ниобия в производстве по пирогидролизному методу в ~ 7 раз ниже себестоимости товарных продуктов по осадительному методу.

Подготовлена конструкторская документация и — впервые в России — создана установка пирогидролиза фторидных растворов ниобия и тантала производительностью до 20 л/ч. Причем отличием от классической реализации является то, что процесс организован в режиме прямотока и сжигание раствора осуществляется в пламени. В настоящее время установка находится в стадии пусконаладочных работ.

Возвратная (образующаяся в процессе пирогидролиза раствора фторниобиевой кислоты) фтористоводородная кислота имеет концентрацию фтористого водорода, составляющую не более 20 % мас., и не пригодна без её укрепления для возврата в процесс и дальнейшего использования в получении ниобия и тантала из исходного сырья. Такое содержание не соответствует требуемому для процесса вскрытия, в связи с чем ставится задача по повышению концентрации возвратной фтористоводородной кислоты до 35–38 % мас. В связи с этим нами предложен способ ректификации возвратной фтористоводородной кислоты с отгонкой излишнего количества воды и получением на выходе требуемой концентрации кислоты [11].

В итоге следует отметить следующие особенности процессов экстракционного разделения ниобия и тантала при переработке ниобий- и танталсодержащего сырья: 1) определяющим условием для успешной организации экстракционного передела при переработке ниобий- и танталсодержащего сырья является процесс вскрытия исходного сырья; 2) наличие у октанолов благоприятного набора физико-химических свойств, сочетающегося с высокой экстракционной эффективностью и селективностью, выделяет их из ряда известных нейтральных кислородсодержащих реагентов и делает целесообразным для практического применения для экстракционного разделения ниобия и тантала; на основании укрупненно-лабораторных и пилотных испытаний разработана и опробована схема экстракционного разделения ниобия и тантала с использованием октанола-1 в качестве экстрагента; 3) утилизация отработанных технологических сульфатно-фторидных растворов в сульфат магния семиводный позволяет минимизировать количество отходов (твердых и жидких); исследованиями показано, что при использовании брусита осуществляется нейтрализация и очистка технологических растворов от примесей с образованием раствора сульфата магния; раствор сульфата магния содержит минимальное количество примесей и может быть рассмотрен для получения кристаллического сульфата магния семиводного, используемого в качестве удобрений; 4) работы по освоению процесса пирогидролиза имеют большой практический интерес, заключающийся в разработке технологии получения оксидов ниобия и тантала из кислотных растворов с регенерацией фтористоводородной кислоты, повторно используемой в технологическом процессе.

В настоящее время исследования по тематике продолжаются.

Список источников

1. Ниобий и тантал / А. Н. Зеликман, Б. Г. Коршунов, А. В. Елютин, А. М. Захаров. М.: Металлургия, 1990. 296 с.
2. Калинин В. Т., Николаев А. И., Захаров В. И. Гидрометаллургическая комплексная переработка нетрадиционного титано-редкометалльного и алюмосиликатного сырья. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1999. 225 с.
3. Николаев А. И. Переработка нетрадиционного титанового сырья Кольского полуострова. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1991. 118 с.
4. Разделение и очистка ниобия и тантала экстракцией октанолом из растворов переработки отечественного колумбитового концентрата / И. В. Бакланова, В. Г. Майоров, В. К. Копков и др. // Химическая технология. 2001. № 2. С. 28–32.
5. Нечаев А. В., Смирнов А. В., Сибилев А. С., Соколов В. Д., Кознов А. В., Поляков Е. Г. Гидрометаллургическая переработка колумбитового концентрата Зашихинского месторождения // Химическая технология. 2017. № 2. С. 81–88.
6. Смирнов А. В., Сибилев А. С., Нечаев А. В. и др. Гидрометаллургическая переработка колумбитового концентрата // Сб. тр. Кольского научного центра РАН. 2015. № 2. С. 94–96.
7. Нечаев А. В. Инновационная технология магнийтермического получения высокочистого металлического тантала: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 173 с.
8. Склокин Л. И., Зоц Н. В., Герасимова Л. Г., Николаев А. И., Калинин В. Т. Метод пирогидролиза фторидных растворов ниобия и титана в пламени природного газа в технологии лопарита // Труды Всеросс. конф.: Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов. М., 2002. С. 290–294.

9. Технические условия № 20.20.19–006–50721851–2019 «Сульфат магния семиводный».
10. Nikolaev A. I., Maiorov V. G. New approaches to niobium and tantalum extraction technology // *Doklady Chemistry*. 2007. Vol. 415, Part I. P. 167–169.
11. Заявка № 2022111497/04(024198) РФ, МПК С 01 В 7/19 (2006.01). Способ концентрирования фтористоводородной кислоты; заявл. 27.04.2022.

References

1. Zelikman A. N., Korshunov B. G., Elyutin A. V., Zaharov A. M. *Niobij i tantal* [Niobium and tantalum]. Moscow, Metallurgiya, 1990, 296 p. (In Russ.).
2. Kalinnikov V. T., Nikolaev A. I., Zaharov V. I. *Gidrometallurgicheskaya kompleksnaya pererabotka netradicionnogo titan-redkometall'nogo i al'yumosilikatnogo syr'ya* [Hydrometallurgical complex processing of non-traditional titanium-rare-metal and aluminosilicate raw materials]. Apatity, Izd. KNCz RAN, 1999, 225 p. (In Russ.).
3. Nikolaev A. I. *Pererabotka netradicionnogo titanovogo syr'ya Kol'skogo poluostrova* [Processing of non-traditional titanium raw materials of the Kola Peninsula]. Apatity, Izd. KNCz RAN, 1991, 118 p. (In Russ.).
4. Baklanova I. V., Majorov B. G., Kopkov V. K. i dr. Razdelenie i oчитка niobiya i tantala ekstrakciej oktanolom iz rastvorov pererabotki otechestvennogo kolumbitovogo koncentrata [Separation and purification of niobium and tantalum by extraction with octanol from solutions of processing domestic columbite concentrate]. *Himicheskaya tehnologiya* [Chemical technology], 2001, No. 2, pp. 28–32. (In Russ.).
5. Nechaev A. V., Smirnov A. V., Sibilev A. S., Sokolov V. D., Koznov A. V., Polyakov E. G. *Gidrometallurgicheskaya pererabotka kolumbitovogo koncentrata Zashihinskogo mestorozhdeniya* [Hydrometallurgical processing of columbite concentrate from the Zashikhinsk deposit]. *Himicheskaya tehnologiya* [Chemical technology], 2017, No. 2, pp. 81–88. (In Russ.).
6. Smirnov A. V., Sibilev A. S., Nechaev A. V. etc. *Gidrometallurgicheskaya pererabotka kolumbitovogo koncentrata* [Hydrometallurgical processing of columbite concentrate]. *Sb. tr. Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Collect. Proc. of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, No. 2, pp. 94–96. (In Russ.).
7. Nechaev A. V. *Innovacionnaya texnologiya magnijtermicheskogo polucheniya vy'sokochistogo metallichesкого tantala: dis. kand. texn. nauk* [Innovative technology of magnesium-thermal production of high-purity metallic tantalum: dis. Cand. Tech. Sciences]. Saint Petersburg, 2011, 173 p. (In Russ.).
8. Sklokin L. I., Zocz N. V., Gerasimova L. G., Nikolaev A. I., Kalinnikov V. T. *Metod pirogidroliza fluoridnyh rastvorov niobiya i titana v plameni prirodnogo gaza v texnologii loparita* [Method of pyrohydrolysis of fluoride solutions of niobium and titanium in a natural gas flame in loparite technology]. *Trudy Vseross. konf.: Processy goreniya i vzryva v fizikoximii i texnologii neorganicheskix materialov* [Proceedings of the All-Russian Conf.: Combustion and explosion processes in physical chemistry and technology of inorganic materials]. Moscow, 2002, pp. 290–294. (In Russ.).
9. *Texnicheskie usloviya* [Technical conditions]. No. 20.20.19–006–50721851–2019 “Sul'fat magniya semivodnyj” [Magnesium sulfate heptahydrate]. (In Russ.).
10. Nikolaev A. I., Maiorov V. G. New approaches to niobium and tantalum extraction technology. *Doklady Chemistry*, 2007, Vol. 415, Part I, pp. 167–169.
11. Zayavka No [Application] 2022111497/04(024198) RF, МПК C01B7/19 (2006.01). *Sposob koncentrirvaniya fluoristovodorodnoj kisloty* [Method for concentrating hydrofluoric acid], appl. 27.04.2022. (In Russ.).

Информация об авторах

А. В. Смирнов — кандидат технических наук, руководитель НИЦ;
С. В. Жуков — кандидат технических наук, заместитель руководителя НИЦ;
А. П. Орлов — кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог;
А. В. Нечаев — кандидат технических наук, генеральный директор.

Information about the authors

A. V. Smirnov — PhD (Engineering), head of R & D Department;
S. V. Zhukov — Deputy Head of R & D Department
A. P. Orlov — PhD (Engineering), lead process-engineer;
A. V. Nechaev — PhD (Engineering), CEO.

Статья поступила в редакцию 31.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 31.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.