

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

MINING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.349.4'341.1:[669.295:669.292.3]
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-5-12



КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ЖЕЛЕЗНОГО КОНЦЕНТРАТА ТИТАНОМАГНЕТИТОВОЙ РУДЫ СЕЛЕКТИВНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЕМ ЖЕЛЕЗА, ВАНАДИЯ И ТИТАНА ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Медяник Н.Л., Смирнова А.В., Коляда Л.Г., Бессонова Ю.А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. В настоящее время комплексные титаномагнетитовые руды являются одним из ведущих промышленных источников железа и основным типом минерального сырья для получения титана, ванадия и других ценных компонентов. Руды Волковского месторождения по своему составу и генетическим особенностям являются уникальными. Единственное аналогичное месторождение за рубежом – Енжелес, США – не перерабатывается. Рентабельная переработка этих руд возможна только при применении комплексного подхода. На Красноуральской обогатительной фабрике «Святогор» из титаномагнетитовой руды Волковского месторождения получают железный концентрат с содержанием ценных компонентов в количестве, достаточном для их извлечения. Комплексная переработка железного концентрата предусматривает получение не только железа, но и приоритетно присутствующих в концентрате ванадия, титана химическими методами. Таким образом, целью работы являлось изучение возможности комплексной переработки железного концентрата титаномагнетитовой руды. В работе показана возможность селективного разделения и концентрирования ценных компонентов железного концентрата, полученного при обогащении титаномагнетитовой руды Волковского месторождения. Ввиду особенности химического и минералогического состава железного концентрата и опираясь на результаты гранулометрического, рентгеноструктурного и рентгенофлуоресцентного анализов в работе предлагается использовать химические методы обогащения. В ходе проведения исследований было установлено, что хлороводородным кислотным выщелачиванием железного концентрата возможно селективно разделить ванадий от железа и титана, выделяя в раствор, а титан сконцентрировать в кеке. В работе доказано, что нецелесообразно использовать растворы серной кислоты для селективного разделения железа, ванадия и титана из-за потерь титана в растворе.

Ключевые слова: железо, ванадий, титан, титаномагнетитовая руда, железный концентрат, селективное разделение, концентрирование, химические методы

© Медяник Н.Л., Смирнова А.В., Коляда Л.Г., Бессонова Ю.А., 2022

Для цитирования

Комплексная переработка железного концентрата титаномагнетитовой руды селективным разделением и концентрированием железа, ванадия и титана химическими методами / Медяник Н.Л., Смирнова А.В., Коляда Л.Г., Бессонова Ю.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-5-12>



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

COMPREHENSIVE PROCESSING OF AN IRON CONCENTRATE OF TITANOMAGNETITE ORE BY A SELECTIVE SEPARATION AND CONCENTRATION OF IRON, VANADIUM AND TITANIUM BY CHEMICAL METHODS

Medyanik N.L., Smirnova A.V., Kolyada L.G., Bessonova Yu.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Now, complex titanomagnetite ores are one of leading industrial sources of iron and a main type of mineral raw materials used to produce titanium, vanadium and other valuable components. The ores of the Volkovsky deposit are unique in their composition and genetic features. The only similar foreign deposit (Angeles, USA) is not processed. Profitable processing of these ores is possible only if applying a comprehensive approach. The Krasnouralsk concentrating plant of JSC Svyatogor produces an iron concentrate containing valuable components in an amount sufficient for their extraction from titanomagnetite ore of the Volkovsky deposit. The comprehensive processing of the iron concentrate provides for the production of not only iron, but also vanadium and titanium, which are predominantly present in the concentrate, by chemical methods. Thus, the research was aimed at studying potential comprehensive processing of the iron concentrate of titanomagnetite ore. The paper describes a selective separation and concentration of valuable components of the iron concentrate produced during enrichment of titanomagnetite ore from the Volkovsky deposit. It is proposed to use chemical methods of enrichment in view of the peculiarity of the chemical and mineralogical composition of the iron concentrate and the particle size, X-ray diffraction and X-ray fluorescence analyses. The studies revealed that it was possible to selectively separate vanadium from iron and titanium by hydrochloric acid leaching of the iron concentrate, releasing into the solution, and concentrate titanium in the cake. The paper demonstrates that it is not feasible to use sulfuric acid solutions for the selective separation of iron, vanadium and titanium due to titanium losses in the solution.

Keywords: iron, vanadium, titanium, titanomagnetite ore, iron concentrate, selective separation, concentration, chemical methods

For citation

Medyanik N.L., Smirnova A.V., Kolyada L.G., Bessonova Yu.A. Comprehensive Processing of an Iron Concentrate of Titanomagnetite Ore by a Selective Separation and Concentration of Iron, Vanadium and Titanium by Chemical Methods. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-5-12>

Введение

Полиминеральные титаномагнетитовые руды в настоящее время являются одним из ведущих промышленных источников железа и основным типом сырья для получения ванадия, титана и других ценных компонентов. Применение комплексного подхода при переработке титаномагнетитов с целью получения не только железного концентрата, но и других ценных компонентов, содержащихся в них, позволяет повысить инвестиционную привлекательность освоения таких месторождений. Кроме того, известно, что металлургическая отрасль испытывает определённые трудности в сырьевом сегменте в связи с истощением запасов высоколиквидных железных руд, альтернативой которых являются титаномагнетиты. Также на мировом рынке увеличивается спрос на ванадий и

титан, 90 и 60% мирового запаса данных металлов сосредоточены в титаномагнетитовых рудах [1, 9, 11]. Таким образом, проблема комплексной переработки титаномагнетитов является остроактуальной и требует новых подходов к ее решению.

Титаномагнетиты Волковского месторождения – это полиметаллическая руда, содержащая: Fe – 9,970%, Cu – 0,760%, P₂O₅ – 1,780%, V₂O₅ – 0,117%. По своему составу и генетическим особенностям данная руда является уникальной. Единственное аналогичное месторождение за рубежом – Енжелес, США – не перерабатывается [5]. В России на Красноуральской обогатительной фабрике АО «Святогор» из титаномагнетитовой руды Волковского месторождения получают медный и железный концентраты. На рис. 1 представлена схема переработки руды Волковского месторождения [4, 12].

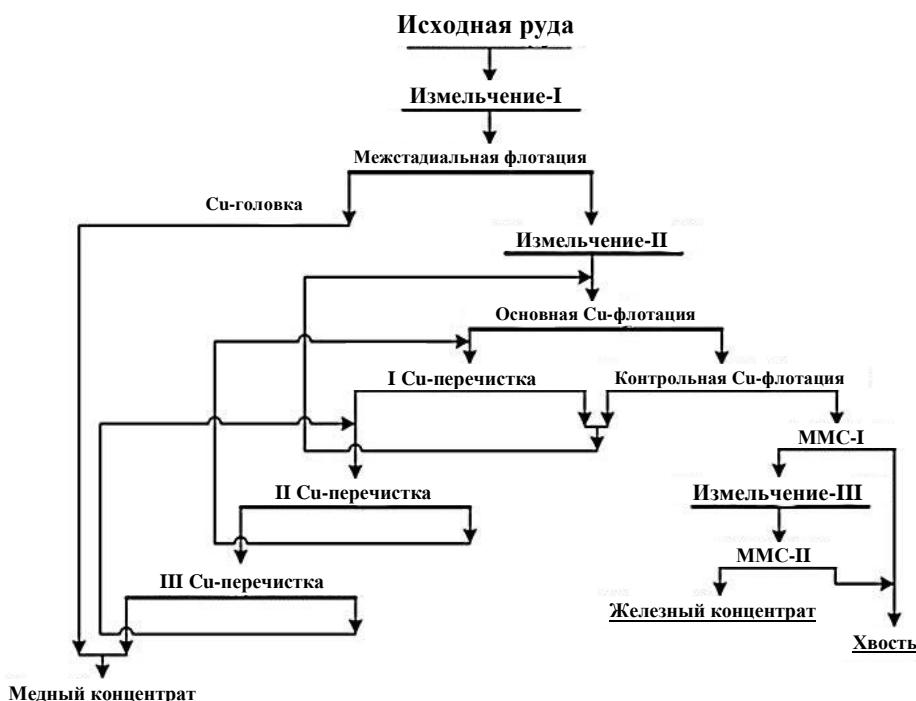


Рис. 1. Технологическая схема обогащения руды на АО «Святогор»
Fig. 1. Ore processing flow chart for JSC Svyatogor

Железный концентрат получают путем мокрой магнитной сепарации с предшествующими стадиями основной и контрольной медной флотации. Такой метод позволяет получать железный концентрат с содержанием самого железа до 59,09% [13]. Однако ванадий также попадает в магнитную фракцию, поскольку находится внутри титаномагнетитовой матрицы в виде катионов V^{3+} , главной формой нахождения которых является изоморфное замещение некоторых двух-, трех- и четырехвалентных катионов. Наибольшее сродство кристаллических свойств наблюдается у ванадия с рядом элементов семейства железа Fe, Cr, Ti, а также алюминия и магния [1].

Кроме того, в титаномагнетите обычно присутствуют тончайшие пластинчатые вrostки ильменита менее 0,01 мм [13], которые традиционным физико-механическим способом обогащения не поддаются [2].

Следовательно, ввиду изоморфизма ванадия с железом и крайне тонкого вкрапления ильменита в титаномагнетитовые зерна целью исследования являлось изучение возможности комплексной переработки железного концентрата титаномагнетитовой руды селективным разделением и концентрированием железа, ванадия и титана химическими методами.

В промышленности для извлечения ценных компонентов из титаномагнетитового сырья ис-

пользуют два основных способа: пирометаллургический (выплавка ванадиевого чугуна в доменных или электропечах с последующим получением из него ванадиевого шлака для гидрометаллургического извлечения ванадия) и гидрометаллургический (химическое извлечение ванадия из сырья). Но именно химическое извлечение является наиболее перспективным методом, поскольку оно отличается более высоким извлечением ванадия из руд и продуктов их обогащения по сравнению с пирометаллургическим. Этот способ основан на процессах выщелачивания [7, 16, 17].

Ванадийсодержащие материалы могут выщелачиваться по различным схемам, например, они могут обрабатываться кислотами (соляной, серной) различной концентрации, при этом используется одно-, двух-, трёх- и более стадийное выщелачивание. В качестве выщелачивающего реагента возможно применение и водных растворов соды с дальнейшей обработкой одноатомным спиртом и расслаиванием смеси на две фазы, а также растворов, состоящих из свободной и связанной серной кислоты. Изменяются время и температура процесса выщелачивания [7, 8, 13, 17].

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служил железный концентрат, полученный на АО «Святогор» из титаномагнетитовой руды Волковского месторождения.

В работе использован комплекс методов исследований, включающий гранулометрический, рентгеноструктурный и рентгенофлуоресцентный анализы.

Гранулометрический состав железного концентрата определялся по ГОСТ 27562-87 «Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Определение гранулометрического состава методом ситового анализа».

Химический состав исходного материала определен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на энергодисперсионном спектрометре «ARLQUANT'X».

Минеральный состав железного концентрата исследован рентгеноструктурным анализом на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000 в CrKa-излучении со стандартным фильтром Kβ.

В первой серии экспериментов образцы концентрата массой 10 г подвергали кислотному выщелачиванию при соотношении Т:Ж=1:10 при температуре 60-65°C и атмосферном давлении 725 мм рт. ст. Процесс выщелачивания проводили в течение одного часа при постоянном перемешивании интенсивностью 90 об/мин. В качестве выщелачивающих реагентов использовали соляную и серную кислоты с варьированием концентрации от 10 до 30%.

Во второй серии экспериментов выщелачивание проводили по аналогичной методике, но при температуре 92-98°C.

Осадок, полученный после фильтрования растворов выщелачивания, анализировали методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на энергодисперсионном спектрометре «ARLQUANT'X».

Полученные результаты и их обсуждение

Химический состав железного концентрата представлен в **табл. 1**.

Таблица 1. Химический состав железного концентрата
Table 1. Chemical composition of the iron concentrate

Содержание компонентов, %											
Fe общ.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	V ₂ O ₅	SO ₃	Cl	MnO	CaO	TiO ₂	ZnO	CuO
59,1	4,0	2,70	2,83	1,42	0,30	0,06	0,35	1,29	10,10	0,13	0,059

Таблица 2. Результаты извлечения железа и ванадия при температуре 60-65°C
Table 2. Iron and vanadium extraction at 60-65°C

Выщелачивающий реагент	HCl			H ₂ SO ₄		
	10	20	30	10	20	30
Концентрация, %						
Степень извлечения железа, %	3,55	23,86	84,01	1,86	6,09	31,98
Степень извлечения ванадия, %	4,93	18,31	61,27	0	4,93	63,38

По результатам рентгенофазового анализа в состав концентрата железной титаномагнетитовой руды входят магнетит Fe₃O₄(84%), ильменит FeTiO₃ (10%), а также смешанный оксид магния и ванадия (MgO·V₂O₃) и различные силикаты.

Гранулометрическим анализом установлено, что в железном концентрате преобладает материал крупностью менее 0,14 мм (более 80%), в том числе: фракция (-0,14+0,075) мм составляет 54%, фракция (-0,075+0,045) мм – 23% и менее 0,045 мм – 6%. Исходя из результатов анализа, в дальнейшем для проведения экспериментов был взят материал с крупностью зерен менее 0,14 мм. Именно в этой крупности происходит полное раскрытие рудных минералов [4].

Результаты экспериментов по извлечению железа и ванадия из железного концентраты титаномагнетитовой руды Волковского месторождения при кислотном выщелачивании (60-65°C) представлены в **табл. 2**.

Анализ полученных данных первой серии экспериментов показал, что при кислотном выщелачивании ванадий экстрагируется вместе с железом, поскольку ванадий в виде твердого раствора связан с титаномагнетитовой матрицей. С увеличением концентрации кислот от 10 до 30% степень извлечения ванадия возрастает в 12 раз. При 30%-й концентрации кислот степень извлечения ванадия примерно одинакова на уровне 61-63%. Для экстрагирования железа во всем диапазоне исследуемых концентраций эффективна только соляная кислота – степень извлечения железа достигает 84%.

После обработки железного концентраты кислотами титан не извлекается в раствор и концентрируется в кеке.

Результаты второй серии экспериментов представлены в **табл. 3**.

Таблица 3. Результаты извлечения железа и ванадия при температуре 92–98°C
Table 3. Iron and vanadium extraction at 92–98°C

Выщелачивающий реагент	HCl			H ₂ SO ₄		
	10	20	30	10	20	30
Концентрация, %	10	20	30	10	20	30
Степень извлечения железа, %	56,01	77,30	87,92	46,19	63,45	4,91
Степень извлечения ванадия, %	42,25	43,66	68,31	55,63	62,68	19,01

При повышении температуры выщелачивания до 92–98°C степень извлечения ванадия и железа значительно возрастает при обработке как соляной, так и серной кислотой, то есть нагрев способствует растворению железа и ванадия, улучшая кинетику выщелачивания. При использовании 30%-й серной кислоты степень извлечения ванадия и железа снижается, возможно, в результате частичной пассивации.

Экспериментальным путем было установлено, что дальнейшее повышение C_{HCl} > 30% при температуре ведения процесса 92–98°C не приводит к увеличению степени извлечения железа и ванадия, а лишь «способствует» активному разрушению технологического оборудования.

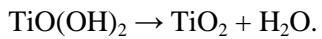
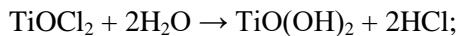
Концентрирование титана при обработке серной кислотой не происходит, так как оксид титана начинает растворяться в горячей серной кислоте [11, 15].

При кислотном выщелачивании железного концентрата возможны следующие химические реакции:

1) Реакция взаимодействия ильменита с соляной кислотой:

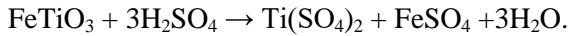


Далее хлорид титанила гидролизуется, в результате чего титан выделяется в твердую фазу:

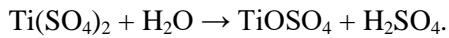


Таким образом, в результате выщелачивания соляной кислотой титан концентрируется в осадке (кеке).

2) Реакция взаимодействия ильменита с серной кислотой первоначально протекает с образованием нормального сульфата:



Нормальный сульфат титана подвергается гидролизу с образованием сульфата титанила:



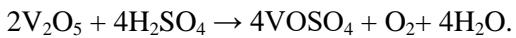
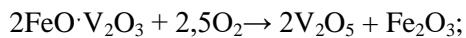
Титанил гидролизуется до геля гидратированного диоксида титана состава TiO₂·H₂O и

TiO₂·2H₂O [6]. Образование гелеобразной массы, затрудняющей процесс отделения фильтрата от кека, наблюдался при фильтровании раствора, полученного растворением концентрата в 30%-й серной кислоте.

3) Реакции взаимодействия магнетита с кислотами, в результате которых железо переходит в раствор, выражаются следующими уравнениями:



4) В железном концентрате ванадий присутствует в виде V³⁺. Он не образует индивидуальных фаз, а входит в состав твердых растворов – шпинелидов. Реакции выщелачивания ванадия можно выразить следующими уравнениями:



Сульфат ванадила VOSO₄ хорошо растворим в воде и образует кристаллогидраты типа VOSO₄·nH₂O, где n = 2, 3, 5, 7 и 13 [3].

Заключение

Опираясь на результаты химических, минералогических, гранулометрических и инструментальных методов исследований железного концентраты, полученного при обогащении титаномагнетитовой руды, в работе предлагается для селективного разделения и концентрирования входящих в его состав Fe, Ti и V использовать химические методы обогащения, а именно хлороводородное вскрытие:

– процесс рекомендуется проводить с использованием 30%-й соляной кислоты при температуре 92–98°C. Ванадия при этом извлекается до 68,31%, а титан индифферентен к таким растворам и полностью концентрируется в кеке;

– выбор граничного уровня концентрации хлороводородной кислоты в 30% обусловлен лучшими показателями по извлечению Fe, V и возможностью меньшего износа технологического оборудования;

– в работе доказано, что для селективного разделения титана и ванадия предпочтительно использовать именно соляную кислоту, а не серную, ввиду растворения диоксида титана в горячей серной кислоте, приводящего к потере титана.

Список источников

1. Алекторов Р.В., Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю. Исследование и совершенствование технологии переработки титаномагнетитового концентраты Гусевогорского месторождения текущего производства // Физико-химические основы металлургических процессов: Международная научная конференция имени академика А.М. Самарина, Москва, 25-28 ноября 2019 года. М.: Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), 2019. С. 65.
2. Бузмаков В.Н., Володина Ю.В. Оценка влияния минерального состава рудных тел титаномагнетитов Гусевогорского месторождения на концентрацию ванадия в продуктах их переработки // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. № 3(59). С. 62-68. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-62-68.
3. Вытоптова А.И., Тихомирова А.В. Извлечение соединений ванадия из отработанного ванадиевого катализатора // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: сборник материалов V Всероссийской конференции, Кемерово, 26-27 ноября 2020 года. Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева, 2020. С. 81-85.
4. Газалеева Г.И. Развитие технологии обогащения титаномагнетитов // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр». Екатеринбург, 2019. С. 14-18.
5. Комплексное обогащение медно-апатит-железо-ванадийсодержащих руд Волковского месторождения / Б.М. Корюкин, В.А. Бочаров, Л.О. Макаранец, И.Ф. Гарифуллин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 3. С. 115-117.
6. Малдыбаев Г.К., Найманбаев М.А., Лохова Н.Г. Влияние типа кислоты на структуру диоксида титана // Промышленность Казахстана. №2 (103). 2018. С. 28-31.
7. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Извлечение ванадия кислотным выщелачиванием концентратов титаномагнетитовых руд Урала // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2019. №1. С. 17-20.
8. Махоткина Е.С., Шубина М.В., Сучкова А.Я. Исследование режимов гидрометаллургического извлечения ванадия из «хвостов» титаномагнетитовой руды // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 16-20 апреля 2018 года. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. С. 19-20.
9. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Экологические и ресурсосберегающие аспекты использования техногенного ванадийсодержащего сырья // Бюллетень «Черная металлургия». №3. 2018. С. 81-85.
10. Медяник Н.Л., Смирнова А.В., Горбулина Д.П. Необходимость исследования вещественного состава титаномагнетитовых руд Волковского месторождения при выборе способа технологической переработки // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2021. Т. 12. № 1. С. 108-110.
11. Орлов В.В., Медведев Р.О., Амеличкин И.В. Выделение титана из титаномагнетитовой руды // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 24-27 апреля 2018 года. В 7-ми томах / под ред. И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2018. С. 234-236.
12. Смирнова А.В., Медяник Н.Л., Горбулина Д.П. Изучение возможности комплексной переработки железного концентрата титаномагнетитовых и меднотитаномагнетитовых руд // Современные достижения университетских научных школ: сборник докладов национальной научной школы-конференции, Магнитогорск, 25-26 ноября 2021 года. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. С. 156-161.
13. Смирнова А.В., Медяник Н.Л., Горбулина Д.П. Особенности переработки титаномагнетитовых и медно-титаномагнетитовых руд Волковского месторождения Среднего Урала // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2021), Владикавказ, 04-08 ноября 2021 года. Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), 2021. С. 71-73.
14. Чижевский В.Б., Шавакурова О.П., Гмызина Н.В. Обогащение титаномагнетитовых руд Южного Урала // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 2(38). С. 5-7.
15. Шарипов Х.Б., Джуркаулов И.Х., Кабутов К. Исследование термического разложения метатитановой кислоты при получении рутильного диоксида титана // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. 2019. № 1, 3(9, 11). С. 55-60.
16. Li R., Liu T., Zhang Y., Huang J., Xu C. Efficient Extraction of Vanadium from Vanadium-Titanium Magnetite Concentrate by Potassium Salt Roasting Additives // Minerals. 2018. 8 (25). Pp. 2-14.

17. Sachkov V.I., Nefedov R.A., Orlov V.V., Medvedev R.O., Sachkova A.S. Hydrometallurgical Processing Technology of Titanomagnetite Ores // Minerals. 2018. 8 (1). P. 2.

References

1. Alektorov R.V., Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu. Studying and improving the technology for processing the currently produced titanomagnetite concentrate of the Gusevogorsk deposit. *Fiziko-khimicheskie osnovy metallurgicheskikh processov: Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya imeni akademika A.M. Samarina* [Physics and Chemistry of Metallurgical Processes: Samarin International Scientific Conference]. Moscow: Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, 2019, 65 p. (In Russ.)
2. Buzmakov V.N., Volodina Yu.V. Assessing the effect of a mineral composition of ore bodies of titanomagnetites from the Gusevogorsk deposit on the concentration of vanadium in products of their processing. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of Ural State Mining University], 2020, no. 3 (59), pp. 62-68. (In Russ.) DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-62-68
3. Vytoptova A.I., Tikhomirova A.V. Extraction of vanadium compounds from a processed vanadium catalyst. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy. Sbornik materialov v vse-rossiyskoy konferentsii* [Chemistry and Chemical Technology: Achievement and Prospects. Proceedings of the 5th All-Russian Conference]. Kemerovo: Gorbachev Kuzbass State Technical University, 2020, pp. 81-85. (In Russ.)
4. Gazaleeva G.I. Development of the titanomagnetite beneficiation technology. *Sovremennye tendentsii v oblasti teorii i praktiki dobychi i pererabotki mineralnogo i tekhnogenного syrya: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 90-letiyu so dnya osnovaniya instituta «Uralmekhanobr»* [Current Trends in Theory and Practice of Mining and Processing of Mineral and Technology-Related Raw Materials: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 90th Anniversary of the Founding of the Uralmekhanobr Institute]. 2019, pp. 14-18. (In Russ.)
5. Koryukin B.M., Bocharov V.A., Makaranets L.O., Garifulin I.F. Comprehensive beneficiation of copperapatite-iron-vanadium-containing ores from the Volkovsky deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 1999, no. 3, pp. 115-117. (In Russ.)
6. Maldybaev G.K., Naimanbaev M.A., Lokhova N.G. Influence of the type of acid on the structure of titanium dioxide. *Promyshlennost Kazakhstana* [Industry of Kazakhstan], 2018, no. 2 (103), pp. 28-31. (In Russ.)
7. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Extraction of vanadium by acid leaching of concentrates of titanomagnetite ores of the Urals. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current Problems of Modern Science, Technology and Education], 2019, no. 1, pp. 17-20. (In Russ.)
8. Makhotkina E.S., Shubina M.V., Suchkova A.Ya. Study on schedules of the hydrometallurgical extraction of vanadium from tailings of titanomagnetite ore. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 76-y mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Current Problems of Modern Science, Technology and Education: abstracts of the 76th International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2018, pp. 19-20. (In Russ.)
9. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Ecological and resource-saving aspects of using technology-related vanadium-containing raw materials. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy], 2018, no. 3, pp. 81-85. (In Russ.)
10. Medyanik N.L., Smirnova A.V., Gorbulina D.P. Need for analyzing a material composition of titanomagnetite ores from the Volkovsky deposit, when choosing a processing method. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current Problems of Modern Science, Technology and Education], 2021, vol. 12, no. 1, pp. 108-110. (In Russ.)
11. Orlov V.V., Medvedev R.O., Amelichkin I.V. Extraction of titanium from titanomagnetite ore. *Perspektivy razvitiya fundamentalnykh nauk: Sbornik nauchnykh trudov XV Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Prospects for the Development of Basic Sciences: Proceedings of the 15th International Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists]. Tomsk: Tomsk State University, 2018, pp. 234-236. (In Russ.)
12. Smirnova A.V., Medyanik N.L., Gorbulina D.P. Study on potential comprehensive processing of the iron concentrate of titanomagnetite and copper-titanomagnetite ores. *Sovremennye dostizheniya universitetskikh nauchnykh shkol: sbornik dokladov natsionalnoy nauchnoy shkoly-konferentsii* [Modern achievement of university scientific schools: Collection of reports of the national scientific workshop-conference]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2021, pp. 156-161. (In Russ.)
13. Smirnova A.V., Medyanik N.L., Gorbulina D.P. Features of processing titanomagnetite and copper-titanomagnetite ores from the Volkovsky deposit of the Middle Urals. *Problemy kompleksnoy i ekologicheskoi bezopasnosti pererabotki prirodnogo i tekhnogenogo mineralnogo syrya (Plaksinskie chteniya - 2021)* [Problems of integrated and environmentally safe processing of natural and technology-related mineral raw materials (Plaksin Readings - 2021)]. Vladikavkaz: North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 2021, pp. 71-73. (In Russ.)

14. Chizhevskiy V.B., Shavakuleva O.P., Gmyzina N.V. Beneficiation of titanomagnetite ores of the South Urals. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 2(38), pp. 5-7. (In Russ.)
15. Sharipov Kh.B., Dzhurakulov I.Kh., Kabutov K. Study on a thermal decomposition of metatitanic acid, when producing rutile titanium dioxide. *Vestnik Filiala Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta imeni M.V. Lomonosova v gorode Dushanbe* [Bul-
- tin of the Dushanbe Branch of Lomonosov Moscow State University], 2019, no. 1, 3 (9, 11), pp. 55-60. (In Russ.)
16. Li R., Liu T., Zhang Y., Huang J., Xu C. Efficient extraction of vanadium from vanadium-titanium magnetite concentrate by potassium salt roasting additives. *Minerals*, 8 (25), 2-14 (2018).
17. Sachkov V.I., Nefedov R.A., Orlov V.V., Medvedev R.O., Sachkova A.S. Hydrometallurgical processing technology of titanomagnetite ores. *Minerals*, 8 (1), 2 (2018).

Поступила 03.06.2022; принята к публикации 04.07.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 03/06/2022; revised 04/07/2022; published 26.09.22

Медяник Надежда Леонидовна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: medyanikmagnitka@mail.ru. ORCID 0000-0003-0973-8899

Смирнова Анастасия Владиславовна – старший преподаватель кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: a-kremneva@mail.ru. ORCID 0000-0003-3916-6051

Коляда Людмила Григорьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kl174@mail.ru. ORCID 0000-0002-9021-009X

Бессонова Юлия Александровна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: bessonova74@mail.ru. ORCID 0000-0001-8027-3567

Nadezhda L. Medyanik – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: medyanikmagnitka@mail.ru. ORCID 0000-0003-0973-8899

Anastasiya V. Smirnova – Senior Lecturer of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a-kremneva@mail.ru. ORCID 0000-0003-3916-6051

Lyudmila G. Kolyada – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: kl174@mail.ru. ORCID 0000-0002-9021-009X

Yuliya A. Bessonova – PhD (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: bessonova74@mail.ru. ORCID 0000-0001-8027-3567