УДК 669.292.3:669.054.82

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗВЛЕЧЕНИЮ ВАНАДИЯ ИЗ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД КУСИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Е. С. МАХОТКИНА, канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии и химической технологии;
М. В. ШУБИНА, канд. техн. наук, доцент кафедры
металлургии и химической технологии, shubina_mar@mail.ru
(Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск)*

Аннотация. Актуальность проблемы утилизации отходов отработанных месторождений титаномagnetитовых руд обусловлена не только необходимостью устранения их негативного влияния на окружающую среду, но и возможностью применения этих отходов в качестве ванадийсодержащего сырья. Выполнен анализ существующих технологических процессов извлечения ванадия. Исследована возможность извлечения ванадия из хвостов титаномagnetитовых руд Кусинского месторождения. Представлены результаты экспериментов по извлечению ванадия в виде растворимых ванадатов выщелачиванием из образцов после обжига с кальцинированной содой, сульфатом натрия, оксидом кальция, а также с хлоридом натрия в различных массовых соотношениях. Установлено, что наиболее эффективными реагентами для обжига данного вида ванадиевого сырья являются добавки хлорида натрия и карбоната натрия. Выявлено значительное влияние химического состава хвостов титаномagnetитовой руды на степень извлечения ванадия: при увеличении содержания ванадия в них с 0,15 до 0,53 % степень извлечения возрастает с 42,6 до 74,8 %. При использовании реакционной добавки хлорида натрия можно осуществлять выщелачивание с применением серной кислоты в одну стадию. Увеличение количества хлорида натрия в шихте при обжиге приводит к значительному росту степени извлечения ванадия в растворе при выщелачивании.

Ключевые слова: отходы обогащения титаномagnetитовой руды, ванадаты, обжиг, выщелачивание, степень извлечения ванадия.

Ссылка для цитирования. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Результаты экспериментов по извлечению ванадия из отходов обогащения титаномagnetитовых руд Кусинского месторождения // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 5. С. 617–622.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-5-617-622

RESULTS OF EXPERIMENTS ON VANADIUM EXTRACTION OUT OF KUSINSKY DEPOSIT TITANIUM-MAGNETITE ORES ENRICHMENT WASTES

*E. S. MAKHOTKINA, PhD (Tech), Prof. Ass., Dpt of metallurgy and chemical technology;
M. V. SHUBINA, PhD (Tech), Prof. Ass., Dpt of metallurgy and chemical technology, shubina_mar@mail.ru
(Magnitogorsk State technical University after G.I. Nosov, Russia, Chelyabinsk rgn., Magnitogorsk)*

Abstract. The actuality of exhausted of titanium-magnetite ore deposits wastes is stipulated not only by necessity of their negative impact on environmental elimination, but also by a possibility of application of these wastes as vanadium-containing raw materials. Analysis of existing technological processes for vanadium extraction accomplished. A possibility of vanadium extraction out of Kusinsky deposit titanium-magnetite ore tails studied. Results of experiments on vanadium extraction as soluble vanadates by leaching from the samples after roasting with soda ash, sodium sulfate, calcium oxide, and sodium chloride in various mass ratios presented. It was determined, that additives of sodium chloride and sodium carbonate are the most effective reagents for roasting of this type of vanadium raw materials. A significant effect of titanium-magnetite ore tails chemical composition on the vanadium extraction degree revealed: with an increase content from 0.15% to 0.53% in the ore tails vanadium, the extraction degree increases to 74.8%. When using the sodium chloride reaction additive, it is possible to leach in only one stage using sulfuric acid. Increasing the sodium chloride amount in the roasting mixture leads to a significant increase in the vanadium extraction degree in the leaching solution.

Keywords: titanium-magnetite ore enrichment wastes, vanadates, roasting, leaching, vanadium extraction degree.

For citation. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Results of experiments on vanadium extraction out of Kusinsky deposit titanium-magnetite ores enrichment wastes. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 4, pp. 617–622. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-5- 617-622

Современное состояние естественных минеральных ресурсов таково, что запасы богатых руд практически исчерпаны. С другой стороны, накоплены значительные отходы различных производств [1]. Отходы (хвосты) отработанных месторождений, представляющие собой основную часть добытой руды (до 80 %), являются одним из крупнейших загрязнителей биосферы, занимая при этом значительные площади полезных земельных территорий. Примером могут служить отвалы Кусинского месторождения титаномагнетитов, площадь которых составляет около 3000 м² [2–5]. Очевидно, что системное решение проблемы снижения экологической нагрузки на окружающую среду и поиск новых источников ценных для промышленности ресурсов представляют собой важнейшие задачи современности.

Значительную роль в металлургии сегодняшнего дня играет ванадий, являясь легирующей и модифицирующей добавкой. Мониторинг рынка ванадия свидетельствует об увеличении спроса на этот металл из-за наращивания производства нержавеющей стали, применения этого элемента в катализе, нефтехимии и т. д. В настоящее время около половины ванадия, производимого в мире, получают из титаномагнетитов и другого железорудного сырья с содержанием ванадия менее 0,5 % [6]. Хвосты Кусинского месторождения содержат от 0,15 до 0,53 % оксида ванадия V₂O₅ во фракциях после магнитной сепарации и в необработанных образцах соответственно. Очевидно, что возможность извлечения ванадия из данного сырья представляет определенный интерес — это и получение ценного компонента при переработке отходов, и снижение вредного влияния соединений ванадия на биоту. Ванадий активно накапливается гумусом почв (доля соединений ванадия составляет примерно 0,01 %), особенно в ультраосновных и основных породах. В регионах с такими почвами содержание ванадия при накоплении отходов будет значительным. Этот элемент миграционно малоподвижен, поэтому очень трудно решить проблему с очисткой почвы при техногенном загрязнении [7].

Существует три основных современных варианта извлечения ванадия — это пирометаллургический способ (извлечение ванадия из конвертерного шлака), гидрометаллургический (выщелачивание из обожженных рудных концентратов) и переработка различного техногенного сырья [8–11]. Таким образом, переработка хвостов отработанных месторождений — это один из вари-

антов металлургического производства ванадия, с помощью которого в настоящее время получают около 10 % этого элемента.

Экономическая эффективность схемы переработки ванадийсодержащего сырья складывается из показателей отдельных стадий: обжига (с солевыми добавками или без них, с добавками оксидов, карбонатов или их смеси) и выщелачивания (водное, кислотное) [12–15]. Природное ванадиевое сырье обычно обжигают с хлористым натрием с целью получения солей ванадиевой кислоты. Хлор, образующийся при термической диссоциации, способствует, по мнению части исследователей, окислению трехвалентного ванадия до пентавалентного. В содово-кислотной технологии реакционной добавкой служит кальцинированная сода или сульфат натрия. Преимуществом такого обжига является отсутствие хлорсодержащих газов, которые необходимо нейтрализовывать. Оксид кальция связывает кремнезем в шихте, предотвращая образование соединений, которые затрудняют извлечение ванадия. Образующийся при этом пированадат кальция – марганца (Ca_xMn_{1-x})₂V₂O₇ хорошо растворим при pH = 2,5–3,0.

Схемы технологических процессов предусматривают различные виды выщелачивания [11, 15, 16]. Руды с содержанием V₂O₅ более 1 % и кремнезема до 3 % после окислительного обжига обрабатывают водой и кислотой, переводя ванадий в осадок. В АО «Ванадий-Тула» ванадиевый шлак выщелачивают растворами серной кислоты. На Чусовском металлургическом заводе выщелачивание проводят горячей водой (60–70 °C) и растворами серной кислоты. Способ ИКАТ предусматривает выщелачивание обожженного материала карбонатным раствором аммиака. Может изменяться и количество стадий выщелачивания, время и температура процесса.

Руды Кусинского месторождения относятся к труднообогатимым и характеризуются большим количеством вростков ильменита в титаномагнетит [17]. Содержание ванадия в исследуемых образцах невелико, химический и минералогический состав породы непостоянен, значительно содержание кремния (от 22,4 до 35,6 %). Все указанные факторы осложняют поиск технологических путей извлечения ванадия.

Целью исследования являлась оценка возможности извлечения ванадия из хвостов титаномагнетитовых руд Кусинского месторождения учитывая сложность сырья и варианты его обработки на всех стадиях процесса.

Материалы и методы исследования

Для исследования использовали образцы хвостов титаномagnetитовой руды Кусинского месторождения различного химического состава (см. таблицу). В целом схема исследования включала следующие операции: подготовка исходного сырья к обжигу (размол руды, смешивание с реакционной добавкой), окислительный

обжиг подготовленной шихты, выщелачивание обожженного материала водой и серной кислотой, фильтрование полученных растворов, определение содержания компонентов раствора методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на энергодисперсионном спектрометре с помощью градуировочного графика [18–22].

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОБРАЗЦОВ ХВОСТОВ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ

CHEMICAL COMPOSITION OF TITANIUM-MAGNETITE TAILS SAMPLES

Номер образца	Массовая доля, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{общ}	K ₂ O	CaO	TiO ₂	P	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃
1	35,6	15,3	13,8	0,11	5,07	6,36	0,1	0,15	0,1
2	31,7	10,6	17,81	0,12	3,81	12,02	—	0,29	0,12
3	28,6	10,0	22,89	0,11	3,12	9,44	—	0,36	0,3
4	22,4	8,7	30,60	0,08	1,93	7,52	—	0,53	0,52

Применяли следующие реакционные добавки: хлорид натрия, оксид кальция, карбонат натрия, сульфат натрия и их смеси в разных соотношениях. Окислительный обжиг проводили при температуре 850 °С, так как диссоциация хлорида натрия происходит при температурах порядка 800 °С.

Окислительный обжиг с хлоридом натрия осуществляли с различным количеством реагента: массовое соотношение руды и реагента составляло 1:1 и 1:0,6 соответственно. После

термической обработки и охлаждения образцов в муфельной печи проводили извлечение и дробление полученного спека. Замечено, что наибольшие трудности по извлечению и дроблению вызывают образцы с меньшим содержанием ванадия.

Обожженная шихта выщелачивалась водой в течение 2 ч и серной кислотой (pH = 1) в течение 1 ч при температуре 60–78 °С. Основная задача выщелачивания — выведение ценных компонентов в раствор [23].

Результаты и их обсуждение

Проведенные эксперименты позволили сравнить возможность извлечения ванадия из хвостов руды разного химического состава с применением различных реагентов. Влияние содержания ванадия в исходных образцах (с реакционной добавкой хлорида натрия) на степень его извлечения из хвостов руды представлено на рис. 1.

Полученные результаты показывают, что при увеличении содержания ванадия в хвостах руды с 0,15 до 0,53 % степень извлечения возрастает с 42,6 до 74,8 %. При использовании хлорида натрия в качестве реакционной добавки водным выщелачиванием можно пренебречь, так как степень извлечения ванадия на этой ступени весьма незначительна — до 8 %. В качестве выщелачивающего агента гораздо предпочтительнее использование серной кислоты, которая обеспечила степень извлечения ванадия до 74,8 %. В растворе обнаружены также ионы железа, меди и марганца.

Рис. 1. Зависимость степени извлечения ванадия из хвостов руды от содержания ванадия в исходных образцах: 1 — после выщелачивания в H₂O; 2 — после выщелачивания в H₂SO₄; 3 — общая степень извлечения

Fig. 1. Dependence of vanadium extraction degree out of ore tails on vanadium content in initial samples: 1 — after leaching in H₂O; 2 — after leaching in H₂SO₄; 3 — general extraction degree

Рис. 2. Степень извлечения ванадия из хвостов руды при разных количествах NaCl для обжига:
1 — при соотношении руды и реагента 1:0,6;
2 — при соотношении руды и реагента 1:1

Fig. 2. Vanadium extraction degree out of ore tails at different NaCl quantity for roasting:
1 — relation between ore and reagent 1:0.6;
2 — relation between ore and reagent 1:1

Зависимость степени извлечения ванадия из хвостов руды от содержания ванадия в исходных

образцах при разных количествах реакционной добавки NaCl для обжига представлена на рис. 2. Сравнительный анализ полученных результатов показал положительное влияние увеличения количества реагента в шихте на количество извлекаемого ванадия в раствор.

Известно, что степень помола влияет на образование жидкой легкоплавкой фазы (силиката натрия), вызывающей спекание шихты. Условия окисления материалов ухудшаются, что приводит к снижению степени извлечения ванадия [16, 24]. Исследуемые образцы имели размеры частиц менее 100 мкм (<0,1 мм) и значительные количества оксида кремния (до 35,6 %) [18]. Данные факторы могли быть одной из причин невысокого выхода ванадия из сырья.

В серии экспериментов с применением для обжига образцов руды таких реакционных добавок, как оксид кальция, сульфат натрия и их смесей (в том числе с хлоридом натрия) в разных соотношениях, достигнутые степени извлечения ванадия не превышали 28,5–31,2 %. Применение реакционной добавки карбоната натрия позволило извлечь до 70,75 % ванадия из определенных образцов руды, что согласуется с полученными ранее результатами [5].

Заключение

Проведенное исследование показало возможность гидрометаллургического извлечения ванадия из хвостов руды Кусинского месторождения титаномагнетитов разного химического состава с применением различных реагентов — хлорида натрия, оксида кальция, карбоната натрия, сульфата натрия и их смесей в разных соотношениях. Наиболее эффективными реагентами для обжига данного вида ванадиевого сырья являются добавки хлорида и карбоната натрия. Выявлено значительное влияние химического

состава хвостов титаномагнетитовой руды на степень извлечения ванадия: при увеличении содержания ванадия в хвостах руды с 0,15 до 0,53 % степень извлечения возрастает до 74,8 %. При использовании реакционной добавки хлорида натрия можно проводить выщелачивание только в одну стадию с применением серной кислоты. При увеличении количества реагента NaCl в шихте количество извлекаемого ванадия в раствор тоже возрастает.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Industrial, Ecological and Resource-Efficient Aspects of Vanadium Production and Use of Technogenic Vanadium Sources // Solid State Phenomena. 2017. № 265. P. 994–998.
2. Борисенко Л.Ф., Делицын Л.М., Полубабкин В.А., Усков Е.Д. Комплексное использование титаномагнетитовых руд. — М., 1997. — 65 с.
3. Чижевский В.Б., Шавакулева О.П., Гмызина Н.В. Обогащение титаномагнетитовых руд Южного Урала // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. № 2. С. 5–7.
4. Никифоров Б.А., Тахаутдинов Р.С., Бигеев В.А., Бигеев А.М. Перспективы вовлечения в переработку новых видов железосодержащего сырья // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2004. № 1. С. 9–11.
5. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Извлечение ванадия из рудного и техногенного сырья Кусинского месторождения титаномагнетитов // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 3 (22). С. 22–25.
6. Козлов В.А., Терликбаева А.Ж., Батракова Л.Х., Нуржанова С.Б. Углистые уран-ванадиевые сланцы Каратау и их переработка // Промышленность Казахстана. 2005. № 2. С. 73–75.
7. Якуцени С.П. Распространенность углеводородного сырья, обогащенного тяжелыми элементами-примесями. Оценка экологических рисков. — СПб.: Недра, 2005. — 372 с.
8. Ванадий в черной металлургии / Под ред. Н.П. Лякишева, Н.П. Слотвинского-Сидака, Ю.Л. Плинер и др. — М.: Металлургия, 1983. — 192 с.
9. Sachkov V.I., Nefedov R.A., Orlov V.V. etc. Hydrometallurgical Processing Technology of Titanomagnetite Ores // Minerals. 2018. V. 8. № 1. P. 1–12.

10. Mehdilo A., Ghaffariand S., Irannajad M. Recovery of Vanadium from Qarah-aghaj Titanomagnetite ore by Roasting and Leaching // *Iranian Journal of Mining Engineering*. 2009. V. 6. № 3. P. 9–17, 20.
11. Han K.N. New Trends and Challenges in Leaching Process // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 1992. V. 8. № 1–4. P. 57–72.
12. Zhao Y., Chen L., Yi H. etc. Vanadium Transitions during Roasting-Leaching Process of Vanadium Extraction from Stone Coal // *Minerals*. 2018. V. 8. № 2. P. 1–9.
13. Li R., Liu T., Zhang Y. etc. Efficient Extraction of Vanadium from Vanadium–Titanium Magnetite Concentrate by Potassium Salt Roasting Additives // *Minerals*. 2018. V. 8. № 25. P. 2–14.
14. Liu D., Xue X., Yang H. The Effect of Chromium on the Roasting Process of Vanadium Extraction // *Metals*. 2016. V. 6. № 157. P. 1–9.
15. Шубина М.В., Махоткина Е.С. Рециклинг ванадийсодержащих отходов // *Теория и технология металлургического производства*. 2016. № 2 (19). С. 71–74.
16. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. *Металлургия редких металлов*. — М.: Металлургия, 1991. — 432 с.
17. Попова В.И., Попов В.А., Муфтахов В.А., Котляров В.А. Минеральный состав отходов обогащения титаномagnetитовых руд Кусинского месторождения (Южный Урал) // *Институт минералогии УрО РАН. Минералогия*. 2016. № 2. С. 70–81.
18. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Химическая переработка отходов обогащения титаномagnetитовых руд Кусинского месторождения // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2018. Т. 9. № 2. С. 71–73.
19. Mahdavian A., Shafyei A., Keshavarz Alamdari E., Haghshenas D.F. Recovery of vanadium from Esfahan Steel Company steel slag; optimizing of roasting and leaching parameters // *International Journal of ISSI*. 2006. V. 3. № 2. P. 17–21.
20. Zhang Y.M., Bao S.X., Lio T. etc. The technology of extracting vanadium from ston coal in China, History, current status and future prospects // *Hydrometallurgy*. 2011. V. 109. P. 116–124.
21. Mizin V.G., Rabinovich E.M. *Complex processing of vanadium raw materials: chemistry and technology*. — Ekaterinburg: Ural Branch of the RAS, 2005.
22. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Исследование режимов обработки шлака процесса ITmk3 для извлечения ванадия. — В кн.: *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. — Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2014. Т. 1. С. 279–282.
23. Махоткина Е.С., Шубина М.В., Сучкова А.Я. и др. Исследование режимов гидрометаллургического извлечения ванадия из хвостов титаномagnetитовой руды // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й Междунар. научно-технич. конф.* 2018. С. 19–20.
24. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Сравнительный анализ возможности извлечения ценных компонентов из шлаков металлургического производства. — В кн.: *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. — Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2016. Т. 1. С. 265–268.

Поступила 18 марта 2019 г.

REFERENCES

1. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Industrial, Ecological and Resource-Efficient Aspects of Vanadium Production and Use of Technogenic Vanadium Sources. *Solid State Phenomena*, 2017, no. 265, pp. 994–998.
2. Borisenko L.F., Delitsyn L.M., Polubabkin V.A., Uskov E.D. *Kompleksnoe ispol'zovanie titanomagnetitovykh rud* [Complex use of titanium-magnetite ores]. Moscow, 1997, 65 p. (In Russ.).
3. Chizhevskii V.B., Shavakuleva O.P., Gmyzina N.V. Enrichment of titanium-magnetite ores of the South Urals. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2012, no. 2, pp. 5–7. (In Russ.).
4. Nikiforov B.A., Takhautdinov R.S., Bigeev V.A., Bigeev A.M. Prospects for involvement in the processing of new types of iron-containing raw materials. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2004, no. 1, pp. 9–11. (In Russ.).
5. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Extraction of vanadium from ore and technogenic raw materials of the Kusinsky titanium-magnetite deposit. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2017, no. 3 (22), pp. 22–25. (In Russ.).
6. Kozlov V.A., Terlikbaeva A.Zh., Batrakova L.Kh., Nurzhanova S.B. Carboniferous uranium-vanadium shale Karatau and their processing. *Promyshlennost' Kazakhstana*, 2005, no. 2, pp. 73–75. (In Russ.).
7. Yakutseni S.P. *Rasprostranennost' uglevodorodnogo syr'ya, obogashchennogo tyazhelymi elementami-primesyami. Otsenka ekologicheskikh riskov* [The prevalence of hydrocarbons, enriched with heavy elements-impurities. Environmental risk assessment]. St. Petersburg: Nedra, 2005, 372 p. (In Russ.).
8. *Vanadii v chernoi metallurgii* [Vanadium in the steel industry]. Lyakishev N.P., Slotvinskii-Sidak N.P., Pliner Yu.L. etc. ed. Moscow: Metallurgiya, 1983, 192 p. (In Russ.).
9. Sachkov V.I., Nefedov R.A., Orlov V.V., Medvedev R.O., Sachkova A.S. Hydrometallurgical Processing Technology of Titanomagnetite Ores. *Minerals*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1–12.
10. Mehdilo A., Ghaffariand S., Irannajad M. Recovery of Vanadium from Qarah-aghaj Titanomagnetite ore by Roasting and Leaching. *Iranian Journal of Mining Engineering*, 2009, vol. 6, no. 3, pp. 9–17, 20.
11. Han K.N. New Trends and Challenges in Leaching Process. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1992, vol. 8, no. 1–4, pp. 57–72.
12. Zhao Y., Chen L., Yi H., Zhang Y., Song Sh., Bao Sh. Vanadium Transitions during Roasting-Leaching Process of Vanadium Extraction from Stone Coal. *Minerals*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 1–9.
13. 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, vol. 8, no. 25, pp. 2–14.
14. Liu D., Xue X., Yang H. The Effect of Chromium on the Roasting Process of Vanadium Extraction. *Metals*, 2016, vol. 6, no. 157, pp. 1–9.

15. Shubina M.V., Makhotkina E.S. Recycling vanadium-containing waste. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2016, no. 2 (19), pp. 71–74. (In Russ.).
16. Zelikman A.N., Korshunov B.G. *Metallurgiya redkikh metallov* [Metallurgy of rare metals]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 432 p. (In Russ.).
17. Popova V.I., Popov V.A., Muftakhov V.A., Kotlyarov V.A. Mineral composition of enrichment wastes of titanium-magnetite ores of the Kusinskoe deposit (Southern Urals). *Institut mineralogii UrO RAN. Mineralogiya*, 2016, no. 2, pp. 70–81. (In Russ.).
18. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Chemical processing of enrichment waste from titanium-magnetite ores from the Kusinsky deposit. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 71–73. (In Russ.).
19. Mahdavian A., Shafyei A., Keshavarz Alamdari E., Haghshenas D.F. Recovery of vanadium from Esfahan Steel Company steel slag; optimizing of roasting and leaching parameters. *International Journal of ISSI*, 2006, vol. 3, no. 2, pp. 17–21.
20. Zhang Y.M., Bao S.X., Lio T., Chen T.J., Huang. J. The technology of extracting vanadium from ston coal in China, History, current status and future prospects. *Hydrometallurgy*, 2011, vol. 109, pp. 116–124.
21. Mizin V.G., Rabinovich E.M. *Kompleksnaya pererabotka vanadievogo syr'ya: khimiya i tekhnologiya* [Complex processing of vanadium raw materials: chemistry and technology]. Ekaterinburg: Ural Branch of the RAS, 2005. (In Russ.).
22. Makhotkina E.S., Shubina M.V. *Issledovanie rezhimov obrabotki shlaka protsessa ITmk3 dlya izvlecheniya vanadiya* [Investigation of the processing modes of the ITmk3 slag process for vanadium extraction]. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Actual problems of modern science, technology and education]. Magnitogorsk: izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2014, vol. 1, pp. 279–282. (In Russ.).
23. Makhotkina E.S., Shubina M.V., Suchkova A.Ya., Gorbunova A.V., Churilov A.E., Mukaev E.G. *Issledovanie rezhimov gidrometallurgicheskogo izvlecheniya vanadiya iz khvostov titanomagnetitovoi rudy* [Study of the modes of hydrometallurgical extraction of vanadium from the tailings of titanium-magnetite ore]. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy. doklady 76-i Mezhdunar. nauchno-tekhnich. konf.* [Actual problems of modern science, technology and education: abstracts of the 76th Intern. scientific and technical conf.]. Magnitogorsk, 2018, pp. 19–20. (In Russ.).
24. Makhotkina E.S., Shubina M.V. *Sravnitel'nyi analiz vozmozhnosti izvlecheniya tsennykh komponentov iz shlakov metallurgicheskogo proizvodstva* [Comparative analysis of the possibility of extracting valuable components from the slags of metallurgical production]. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Actual problems of modern science, technology and education]. Magnitogorsk: izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2016, vol. 1, pp. 265–268. (In Russ.).

Received March 18, 2019