

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ИЛЬМЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА МЕТОДОМ ОКАТЫВАНИЯ

С.В. Лановецкий, О.А. Федотова, В.З. Пойлов, В.А. Шейн, О.Г. Мелкомукова

Сергей Викторович Лановецкий *, Ольга Александровна Федотова, Владимир Зотович Пойлов, Валерий Андреевич Шейн, Ольга Геннадьевна Мелкомукова

Кафедра химической технологии и экологии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский просп., 29, Пермь, Российская Федерация, 614990

E-mail: lsv98@mail.ru*, chydinova.olga@rambler.ru, vladimirpoilov@mail.ru, valerij.shein@mail.ru, xtlab@bf.pstu.ru

Использование высокодисперсной ильменитовой руды в технологии получения обогащенного титанового концентрата сопровождается высокой пылимостью на стадии приготовления титановой шихты, что неизбежно приводит к технологическим потерям и отрицательным образом сказывается на условиях труда обслуживающего персонала. В этой связи целью представленной работы явились исследования процесса гранулирования ильменитового концентрата Малышевского месторождения методом окатывания. Размер и морфологию частиц ильменитового концентрата определяли при помощи электронного сканирующего микроскопа высокого разрешения и лазерного дифракционного анализатора размеров частиц. Процесс гранулирования осуществляли в барабанном термостатируемом грануляторе, оценивая влияние температуры, скорости вращения гранулятора, продолжительности процесса и расхода связующего материала на гранулометрический состав и статическую прочность формирующихся гранул целевого продукта. В ходе проведения исследований установлено, что максимальный выход гранул фракции 1,0 – 5,0 мм получен при использовании водного раствора мелассы с объемным соотношением меласса : вода = 5:1. Использование в качестве связующего неразбавленной мелассы приводит к сильному росту пластичности формируемой массы и негативным образом отражается на возможности получения гранулированного продукта. Показано, что с увеличением концентрации связующего в составе исходной смеси выход и средняя статическая прочность гранул фракции 1,0 – 5,0 мм увеличивается, благодаря равномерному распределению раствора между частицами ильменитового концентрата. В то же время при достижении количества связующего в составе исходного сырья более 9,5% происходит образование довольно крупных комков, размер которых составляет более 5,0 мм. Экспериментально доказано, что с увеличением продолжительности окатывания выход гранул ильменитового концентрата фракции 1,0 – 5,0 мм увеличивается, проходя через максимум при 300 с.

Ключевые слова: ильменитовый концентрат, гранулирование, барабанный гранулятор, водный раствор мелассы

STUDY OF GRANULATION PROCESS OF ILMENITE CONCENTRATE BY PELLETING METHOD

S.V. Lanovetskiy, O.A. Fedotova, V.Z. Poiylov, V.A. Shein, O.G. Melkomukova

Sergey V. Lanovetskiy *, Olga A. Fedotova, Vladimir Z. Poiylov, Valeriy A. Shein, Olga G. Melkomukova
Department of Chemical Technology and Ecology, Perm National Research Polytechnic University, Komsomol'skiy ave., 29, Perm, 614990, Russia

E-mail: lsv98@mail.ru*, chydinova.olga@rambler.ru, vladimirpoilov@mail.ru, valerij.shein@mail.ru, xtlab@bf.pstu.ru

The use of highly dispersed ilmenite ore in the titanium concentrate enrichment technology is accompanied by high dustiness at the stage of titanium charge preparation, which inevitably leads to technological losses and adversely affects the working conditions of the staff. In connection with this, the aim of the present work was to study the process of granulating ilmenite concentrate from the Malyshevsky deposit by pelletization. The size and morphology of ilmenite concentrate particles were determined using a high-resolution electron scanning microscope and a laser diffraction particle size analyzer. The granulation process was carried out in a drum granulator thermostated by assessing the effect of temperature, rotation speed granulator, process duration and a binder flow rate on particle size distribution and static strength formed granules of the title product. During the investigations it was established that the maximum yield of granules fraction of 1.0 - 5.0 mm was obtained using an aqueous solution of molasses molasses volume ratio: water = 5:1. The use as undiluted molasses binder leads to a strong increase in ductility formed mass and negatively affects the possibility of producing a granular product. It was shown that with increasing concentration of binder in the composition of the starting mixture the average yield and static strength of granules fraction of 1.0 - 5.0 mm increases, due to the uniform distribution of the solution between the ilmenite concentrate particles. At the same time when the amount of binder in the composition of the starting raw materials over 9.5% the formation of relatively large lumps is observed, which size is more than 5.0 mm. It has been experimentally proved that with increasing duration pelletization yield pellets of ilmenite concentrate fraction of 1.0 - 5.0 mm increases, passing through a maximum at 300 s.

Key words: ilmenite concentrate, granulation, drum granulator, molasses water solution

Для цитирования:

Лановецкий С.В., Федотова О.А., Пойлов В.З., Шеин В.А., Мелкомукова О.Г. Исследование процесса гранулирования ильменитового концентрата методом окатывания. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 10. С. 124–130

For citation:

Lanovetskiy S.V., Fedotova O.A., Poiylov V.Z., Shein V.A., Melkomukova O.G. Study of granulation process of ilmenite concentrate by pelleting method. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 10. P. 124–130

ВВЕДЕНИЕ

Одной из широко используемых на сегодняшний день технологий получения металлического титана является магнетермическое восстановление $TiCl_4$ [1-4]. Первая стадия данной технологии основана на процессе высокотемпературного восстановления тонкодисперсного ильменитового концентрата с целью обогащения продукта оксидом титана. Использование такого концентрата сопровождается высокой пылимостью на стадии приготовления титановой шихты, что неизбежно приводит к технологическим потерям и отрицательным образом сказывается на условиях труда обслуживающего персонала [5, 6].

Одним из направлений решения указанной проблемы является введение дополнительной стадии – предварительного гранулирования ильменитового концентрата. Известно, что технологию гранулирования широко применяют в различных отраслях современной промышленности, так как она позволяет обеспечить получение большого класса продуктов с улучшенными физико-механическими характеристиками [7-11]. Гранулы обладают достаточно высокой прочностью, хорошей сыпучестью, имеют однородный granulometricкий со-

став, не пылят при транспортировке и применении. Использование стадии гранулирования и восстановления ильменитового концентрата позволит существенно снизить технологические потери продукта при его хранении и переработке, а также улучшить условия безопасной эксплуатации действующего производства [12-19].

Целью представленной работы явилось проведение исследований процесса гранулирования высокодисперсного ильменитового концентрата, а также определение оптимальных значений температуры, продолжительности процесса, скорости вращения гранулятора и расхода связующего материала, оказывающих влияние на granulometricкий состав и статическую прочность формирующихся гранул целевого продукта.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования использовали ильменитовый концентрат Малышевского месторождения (Украина). Размер и морфологию частиц ильменитового концентрата определяли при помощи электронного сканирующего микроскопа высокого разрешения «S-3400N» фирмы «Hitachi» и лазерного дифракционного анализатора размеров частиц «Mastersizer 2000» фирмы «Malvern».

В качестве связующего реагента использовали водный раствор мелассы свекловичной с содержанием сахара 47,3%. Выбор данного реагента обусловлен отсутствием примесей кремния, мешающих дальнейшему обогащению ильменитового концентрата и присутствующих в таких традиционных связующих как бентонит, силикат натрия и силикат калия. Объемное соотношение меласса : вода регулировалось в интервале от 3:1 до 5:1.

Гранулирование ильменитового концентрата проводили методом окатывания [20] на лабораторной установке, представленной на рис. 1.

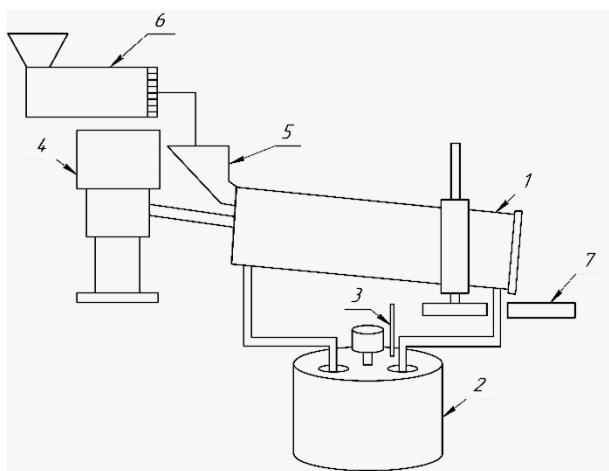


Рис. 1. Схема лабораторной установки для гранулирования: 1 – барабанный гранулятор, 2 – термостат, 3 – термометр, 4 – электрический привод, 5 – питатель, 6 – экструдер, 7 – поддон
 Fig. 1. Scheme of laboratory pelleting set up: 1 – drum granulator, 2 – thermostat, 3 – thermometer, 4 – electric motor drive, 5 – feeder, 6 – extruder, 7 – tray

Исходный ильменитовый концентрат смешивали с расчетным количеством водного раствора мелассы и подвергали формованию при помощи экструдера (6). После формования компактированные частицы продолговатой формы диаметром 2 мм и длиной 3-5 мм при помощи питателя (5) загружали в барабанный гранулятор (1) с электрическим приводом (4). В процессе вращения гранулятора частицы исходной смеси подвергались окатыванию, уплотнению, стабилизации и структурированию за счет капиллярных сил.

Исследование влияния скорости вращения барабана на характеристики формирующихся гранул проводили в интервале от 20 до 60 мин⁻¹. Для поддержания заданной температуры процесса гранулирования в рубашку аппарата подавали нагретый в термостате (2) теплоноситель. Исследования проводились при температурах 25, 40, 60 и 90 °С. Продолжительность стадии окатывания изменяли от 90 до 600 с.

Полученные гранулы выгружали на поддон, сушили в сушильном шкафу при температуре 120 °С в течение 20 мин, после чего при помощи ситового анализа оценивали гранулометрический состав полученного продукта и измеряли среднюю статическую прочность гранул.

Методика определения статической прочности окатышей заключалась в измерении среднего усилия разрушения гранул на приборе-измерителе ИПГ-1М ФГУП «УНИХИМ». С целью оценки средней статической прочности гранул выполняли не менее 30 параллельных измерений.

Эффективность процесса гранулирования оценивали по выходу гранул фракции 1,0-5,0 мм, средней статической прочности, среднему размеру и форме полученных гранул.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты фотомикроскопического анализа ильменитового концентрата, представленные на рис. 2, показали, что частицы исходного продукта имеют сглаженные (огрубленные) формы. Средний диаметр частиц концентрата составил 170 мкм, а удельная поверхность – 0,0387 м²/г.

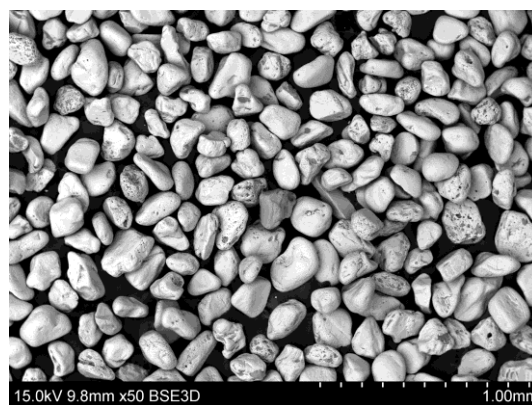


Рис. 2. Микрофотография частиц ильменитового концентрата
 Fig. 2. Microphotograph of ilmenite concentrate particles

В первой серии экспериментальных исследований проведена оценка влияния скорости вращения гранулятора на характеристики получаемых гранул. Исходную смесь, содержащую 91,01 масс. % концентрата и 8,99 масс. % водного раствора мелассы (соотношение меласса : вода = 3:1) формовали в экструдере и загружали в гранулятор при разной частоте вращения барабана. Время грануляции составило 180 с, а температура проведения процесса 25 °С.

В ходе выполнения экспериментов установлено, что при частоте вращения 20 мин⁻¹ формируются рыхлые гранулы неправильной формы.

Средняя прочность таких гранул составила 5-7 Н/гранулу. С увеличением скорости вращения барабана до 40 мин⁻¹ образуются хорошо окатанные, плотные гранулы правильной сферической формы со средней прочностью 11-12 Н/гранулу. Дальнейшее повышение частоты вращения гранулятора до 60 мин⁻¹ не вызвало значительного изменения прочности, однако происходит увеличение доли мелкой фракции (менее 1 мм) из-за частичного разрушения гранул в процессе интенсивного окатывания. Исходя из полученных результатов, дальнейшие исследования проводились при постоянной частоте вращения барабана – 40 мин⁻¹.

Результаты исследований второй серии экспериментов по оценке влияния температуры, количества связующего и соотношения мелассы к воде на характеристики полученных гранул представлены в табл. 1. Длительность процесса для данной серии оставалась постоянной и составила 180 с.

Таблица 1

Влияние температуры гранулирования и соотношения мелассы к воде на характеристики гранулята
Table 1. The influence of the temperature and the ratio of molasses to water on the granulate characteristics

Температура, °С	Состав исходного сырья, %		Выход гранул фракции 1,0-5,0 мм, %	Средняя статическая прочность, Н/гранула	Средний размер гранул, мм
	Концентрат	Раствор мелассы			
Соотношение меласса : вода = 3:1					
25	92,67	7,33	73,18	9	1,84
	91,83	8,17	74,27	10	1,69
	91,01	8,99	78,24	12	2,00
40	92,67	7,33	54,91	9	1,28
	91,83	8,17	75,59	12	2,29
	91,01	8,99	86,81	13	2,18
60	92,67	7,33	40,94	0	1,33
	91,83	8,17	58,60	13	1,99
	91,01	8,99	55,33	11	1,64
Соотношение меласса : вода = 5:1					
25	92,53	7,47	84,48	13	1,75
	91,68	8,32	94,74	14	2,05
40	92,53	7,47	71,51	15	1,54
	91,68	8,32	87,91	19	1,85
60	92,53	7,47	54,32	7	1,42
	91,68	8,32	61,86	12	1,69

Из анализа данных таблицы видно, что максимальный выход (94,74%) гранул фракции 1,0-5,0 мм был получен при использовании водного раствора мелассы с концентрацией 83,3 об. % (соотношение меласса : вода = 5:1), доля которого в исходной шихте, подаваемой на гранулирование, составила

8,32 масс. %. При увеличении температуры с 25 до 60 °С с использованием этого же количества раствора мелассы происходит уменьшение выхода гранул товарной фракции на 34,7%. В то же время, максимальная средняя статическая прочность (19 Н/гранулу) достигается при температуре 40 °С.

При использовании в качестве связующего более разбавленного водного раствора мелассы с концентрацией 75 об. % (соотношение меласса : вода = 3:1), доля которого в гранулируемой шихте составила 8,99 масс. %, максимальный выход (86,81%) гранул анализируемой фракции достигается при температуре 40 °С. Увеличение количества связующего в составе исходного сырья до 10% приводит к образованию комков, размер которых составляет более 5,0 мм. При температуре гранулирования 90 °С из-за снижения вязкости связующего раствора образования гранул не происходит.

В третьей серии экспериментов выполнен анализ длительности пребывания исходной смеси в барабанном грануляторе при постоянной температуре процесса 25 °С. Результаты исследований по влиянию времени окатывания частиц концентрата (τ) на процент выхода товарной фракции 1,0-5,0 мм (η) представлены на рис. 3.

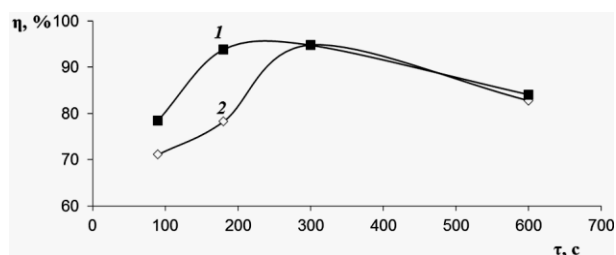


Рис. 3. Зависимость выхода гранул фракции 1,0 – 5,0 мм от продолжительности гранулирования: 1 – соотношение меласса : вода = 5 : 1, 2 – соотношение меласса : вода = 3 : 1
 Fig. 3. The dependence of the yield of granules fraction of 1.0 – 5.0 mm on the duration of granulation: 1 – the ratio of molasses : water = 5 : 1, 2 – the ratio of molasses : water = 3 : 1

Из рис. 3 видно, что с увеличением продолжительности окатывания выход гранул фракции 1,0-5,0 мм увеличивается, проходя через максимум (94%) при 300 с. При изучении внешнего вида полученных гранул (рис. 4) видно, что они имеют правильную сферическую форму. При использовании менее концентрированного раствора мелассы (соотношение 3:1) и продолжительности окатывания 90 с выход гранул фракции 1,0-5,0 мм составляет 71,14%.

В результате анализа внешнего вида гранул установлено, что гранулы напоминают продолговатые агломераты (рис. 4), которые в большей сте-

пени образовались после предварительного продавливания исходной шихты. С увеличением продолжительности гранулирования до 600 с происходит образование большего количества гранул крупной фракции (> 5,0 мм), размеры которых не отвечают требуемым характеристикам получаемого продукта. Таким образом, оптимальная продолжительность окатывания составляет 300 с.



а



б

Рис. 4. Гранулы фракции 1,0 – 5,0 мм: а – полученные при длительности окатывания 300 с, б – полученные при длительности окатывания 600 с

Fig. 4. Granules of fraction 1.0 – 5.0 mm: а – obtained for the duration of pelletizing 300 s, б – obtained for the duration of pelletizing 600 s

В четвертой серии экспериментов оценивали влияние различных соотношений мелассы к воде и концентрации связующего в составе исходного сырья на характеристики готового продукта. Исследования проводили при температуре 25 °С и длительности окатывания 300 с. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Установлено, что с увеличением концентрации связующего в составе исходной смеси выход и средняя статическая прочность гранул фракции 1,0-5,0 мм увеличивается, благодаря равномерному распределению раствора между частицами ильменитового концентрата. Однако дальнейший рост концентрации связующей среды (> 9,5%) приводит к образованию агломератов с размерами более 5,0 мм.

Таблица 2

Влияние различных соотношений мелассы к воде и концентрации связующего на характеристики гранулята

Table 2. The influence of different ratios of molasses to water and binder concentration on the granulate characteristics

Состав исходного сырья, %		Выход гранул фракции 1,0-5,0 мм, %	Средняя статическая прочность, Н/гранула	Средний размер гранул, мм
Концентрат	Раствор мелассы			
Соотношение меласса : вода = 3:1				
92,67	7,33	73,18	9	1,84
91,83	8,17	74,27	10	1,69
91,01	8,99	78,24	12	2,00
Соотношение меласса : вода = 4:1				
93,46	6,54	70,19	9	1,57
92,59	7,41	82,20	10	1,65
91,74	8,26	89,84	11	1,75
Соотношение меласса : вода = 5:1				
93,40	6,60	50,58	9	1,30
92,53	7,47	84,48	13	1,75
91,68	8,32	94,74	14	2,05

Использование в качестве связующего неразбавленной мелассы приводит к настолько сильному увеличению пластичности формируемой массы, что это негативным образом сказывается на возможности получения гранулированного продукта.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований установлено влияние основных технологических параметров процесса гранулирования ильменитового концентрата Малышевского месторождения.

Показано влияние температуры, длительности окатывания, концентрации и содержания связующего в исходной шихте на выход гранул товарной фракции 1,0-5,0 мм, среднюю статическую прочность, грансостав и средний размер гранул.

Установлено, что для достижения оптимальных условий гранулирования ильменитового концентрата процесс следует проводить при температуре 25-40 °С в течение 5 мин при скорости вращения гранулятора 40 мин⁻¹. Доля связующего реагента в исходном составе шихты должна составлять 8,3-9 масс. %, а соотношение мелассы к воде – 5:1.

Технический результат, достигаемый в процессе гранулирования, позволит практически на 90-95% уменьшить пылеунос мелкой фракции ильменитового концентрата, что, в свою очередь, приведет к, примерно, 10% снижению общего расхода обогащаемого сырья и повышению степени его использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лупинос С.М., Грищенко С.Г., Прутцков Д.В., Коцарь М.Л., Александров А.В.** Станет ли титан дешевле завтра? о перспективах разработки непрерывной технологии магнетермического производства титана. *Titan*. 2015. № 3 (49). С. 14-21.
2. **Nakamura K., Iida T., Nakamura N., Araiike T.** Titanium sponge production method by Kroll process at OTC. *Mater. Trans.* 2017. V. 58. N 3. P. 319-321. DOI: 10.2320/mater-trans.MK201634.
3. **Евдокимов В.И., Крнев В.А.** Непрерывный магнетермический способ получения титана. *Цветные металлы*. 2002. № 9. С. 69-72.
4. **Pan, R.-J., Yang, S.-L.** Comparison of one-step method and two-step method of ilmenite concentrate smelting titanium slag. *Adv. Mater. Res.* 2013. V. 704. P. 77-86. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.704.77.
5. **Шейко М.Е., Хазипова В.В.** Проектная оценка производства ферротитана. *Вест. Акад. гражданской защиты*. 2017. № 4(12). С. 12-18.
6. **Лисаченко Э.П., Стамат И.П.** Природные радионуклиды в производственных отходах предприятий неураниевых отраслей промышленности. *Радиацион. гигиена*. 2009. Т. 2. № 2. С. 70-77.
7. **Фарберова Е.А., Тиньгаева Е.А., Чучалина А.Д., Кобелева А.Р., Максимов А.С.** Получение гранулированного активного угля из отходов растительного сырья. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 3. С. 51-57. DOI: 10.6060/tcct.20186103.5612.
8. **Овчинников Л.Н.** Исследование процесса получения комплексных гранулированных органоминеральных удобрений пролонгированного действия на основе торфа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 9. С. 100-104. DOI: 10.6060/tcct.2017609.5600.
9. **Таран Ю.А., Иванов Р.Н., Таран А.Л., Таран А.В.** Основные азотсодержащие минеральные удобрения и технические решения для улучшения их качества. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 3. С. 49-54.
10. **Шорин С.В., Ксандров Н.В., Пастухова Г.В., Солдатов А.В.** Получение гранулированных сложных удобрений на основе карбамида и аммофоса в скоростном барабанном грануляторе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2012. Т. 55. Вып. 11. С. 82-85.
11. **Черепанова М.В., Пойлов В.З.** Взаимодействие связующего силиката калия с примесными компонентами при формировании гранул KCl методом окатывания. *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 10. С. 41-49.
12. **Онаев М.И., Уласюк С.М., Найманбаев М.А., Касымжанов К.К.** Технологические свойства ильменитового концентрата обуховского месторождения. *Пробл. современ. науки и образования*. 2017. № 35(117). С. 67-71.
13. **Isin D.K., Baisanov S.O., Tolymbeko, M.Zh., Azbanbaev E.M., Baisanov A.S., Isin B.D., Isagulova D.A.** Ilmenite concentrate properties and processing methods. *Metallurgist*. 2013. V. 57. N 5-6. P. 449-454. DOI: 10.1007/s11015-013-9753-6.
14. **Гуро В.П., Юсупов Ф.М., Сафаров Е.Т., Рахматкариева Ф.Г.** Выбор оптимального связующего для гранулирования молибденитового концентрата. *Цветные металлы*. 2016. № 2(878). С. 68-73. DOI: 10.17580/tsm.2016.02.11.
15. **Мамедов А.Н., Самедзаде Г.М., Гасимова А.М., Гасымов В.А.** Моделирование гранулирования порошков

REFERENCES

1. **Lupinos S.M., Grishchenko S.G., Prutskov D.V., Kotsar M.L., Alexandrov A.V.** Would titanium be cheaper tomorrow? On prospects of implementing continuous process of magnesiothermal titanium production. *Titan*. 2015. N 3(49). P. 14-21 (in Russian).
2. **Nakamura K., Iida T., Nakamura N., Araiike T.** Titanium sponge production method by Kroll process at OTC. *Mater. Trans.* 2017. V. 58. N 3. P. 319-321. DOI: 10.2320/mater-trans.MK201634.
3. **Evdokimov V.I., Krenev V.A.** Continuous magnesium-thermal method for the titanium production. *Tsvetnyye Metally*. 2002. N 9. P. 69-72 (in Russian).
4. **Pan, R.-J., Yang, S.-L.** Comparison of one-step method and two-step method of ilmenite concentrate smelting titanium slag. *Adv. Mater. Res.* 2013. V. 704. P. 77-86. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.704.77.
5. **Sheiyo M.E., Khazipova V.V.** Project assessment of production of ferrotitanium. *Vestn. Akad. Grazhd. Zashch.* 2017. N 4(12). P. 12-18 (in Russian).
6. **Lisachenko E.P., Stamat I.P.** Natural radionuclides in residues from non-nuclear industries. *Radiatsion. Gigena*. 2009. V. 2. N 2. P. 70-77 (in Russian).
7. **Farberova E.A., Tingaeva E.A., Chuchalina A.D., Kobleva A.R., Maximov A.S.** Obtaining granulated active carbon from wastes of vegetable raw materials. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 3. P. 51-57 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20186103.5612.
8. **Ovchinnikov L.N.** Investigation of process of obtaining complex granulated organo-mineral fertilizers of prolonged action based on peat. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 9. P. 100-104 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.2017609.5600.
9. **Taran Yu.A., Ivanov R.N., Taran A.L., Taran A.V.** Main nitrogen containing fertilizers and technical solutions for improving their quality. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 3. P. 49-54 (in Russian).
10. **Shorin S.V., Ksandrov N.V., Pastukhova G.V., Soldatov A.V.** Obtaining granulated complex fertilizers based on carbamide and ammophos in a speed drum granulator. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 11. P. 82-85 (in Russian).
11. **Cherepanova M.V., Poylov V.Z.** Interaction of a potassium silicate binder with impurity components during formation of KCl granules by the pelletizing method. *Izv. Tomsk. Politekhn. Un-ta. Inzhiniring Georesursov*. 2017. V. 328. N 10. P. 41-49 (in Russian).
12. **Onaev M.I., Ulasjuk S.M., Naiymanbaev M.A., Kasymzhanov K.K.** Technological properties of ilmenite concentrate obukhov deposit. *Probl. Sovremen. Nauki Obrazov.* 2017. N 35(117). P. 67-71 (in Russian).
13. **Isin D.K., Baisanov S.O., Tolymbeko, M.Zh., Azbanbaev E.M., Baisanov A.S., Isin B.D., Isagulova D.A.** Ilmenite concentrate properties and processing methods. *Metallurgist*. 2013. V. 57. N 5-6. P. 449-454. DOI: 10.1007/s11015-013-9753-6.
14. **Guro V.P., Yusupov F.M., Safarov E.T., Rakhmatkariyeva F.G.** The choice of optimal binder for molybdenite concentrate granulation. *Tsvetnyye Metally*. 2016. N 2(878). P. 68-73 (in Russian). DOI: 10.17580/tsm.2016.02.11.
15. **Mamedov A.N., Samedzade G.M., Gasimova A.M., Gasimov V.A.** Modelling of the granulation of powder titanium magnetite concentrate and its reduction with natural gas. *Kondensir. Sredy Mezhfazn. Granitsy*. 2017. V. 19. N 2. P. 248-255 (in Russian).

- титаномагнетитового концентрата и их восстановление природным газом. *Конденсир. среды и межфазн. границы*. 2017. Т. 19. № 2. С. 248-255.
16. **Гасымова А.М., Самедзаде Г.М., Келбалиев Г.И., Мамедов А.Н., Шадлинская Г.Б.** Восстановление титаномагнетитовых концентратов метаном для получения железного порошка и анатаза. *Фундаментал. исслед.* 2017. № 9-1. С. 36-41.
 17. **Майоров Л.А., Фрейдин Б.М., Колесникова И.Г., Кузьмич Ю.В.** Влияние гранулирования на степень разделения металлической и шлаковой фаз в процессе карботермического восстановления титаномагнетита. *Цветные металлы*. 2010. № 11. С. 58-61.
 18. **Shengli Wu, Zhigang Que, Xiaobo Zhai, Kailang Li.** Effect of characteristics of fine iron ores on the granulation behavior of concentrate in sintering granulation process. *Metall. Res. Technol.* 2018. V. 115. N 2. P. 202. DOI: 10.1051/metal/2017079.
 19. **Naimanbayev M., Dzurkanov Z., Likhova N., Maldybayev G.** Complex processing of a titanium magnetite concentrate with receiving the products containing iron, the titan and vanadium. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2016. V. 44. N 5. P. 052001. DOI: 10.1088/1755-1315/44/5/052001.
 20. **Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П.** Гранулирование. М.: Химия. 1991. 240 с.
 16. **Gasymova A.M., Samedzade G.M., Kelbaliev G.I., Mamedov A.N., Shadlinskaya G.B.** Recovery of titanomagnetite concentrates by methane for the production of iron powder and anatasis. *Fundamental. Issled.* 2017. N 9-1. P. 36-41 (in Russian).
 17. **Mayorov L.A., Freydin B.M., Kolesnikova I.G., Kuzmich Yu.V.** The effect of charge granulation on of metal and slag phases separation during the process of titanomagnetite concentrate reduction. *Tsvetnye Metally*. 2010. N 11. P. 58-61 (in Russian).
 18. **Shengli Wu, Zhigang Que, Xiaobo Zhai, Kailang Li.** Effect of characteristics of fine iron ores on the granulation behavior of concentrate in sintering granulation process. *Metall. Res. Technol.* 2018. V. 115. N 2. P. 202. DOI: 10.1051/metal/2017079.
 19. **Naimanbayev M., Dzurkanov Z., Likhova N., Maldybayev G.** Complex processing of a titanium magnetite concentrate with receiving the products containing iron, the titan and vanadium. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2016. V. 44. N 5. P. 052001. DOI: 10.1088/1755-1315/44/5/052001.
 20. **Klassen P.V., Grishaev I.G., Shomin I.P.** Granulation. M.: Khimiya. 1991. 240 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 10.12.2018
Принята к опубликованию 02.09.2019

Received 10.12.2018
Accepted 02.09.2019