

## ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-9-16

### Выбор необходимой крупности для получения высококачественного железного концентрата

**Газалева Г. И.<sup>1\*</sup>, Сопина Н. А.<sup>1</sup>**<sup>1</sup> АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия*\*e-mail: gazaleeva\_gi@umbr.ru*

#### Реферат

*Цель исследований* состояла в изучении разных аппаратов и режимов измельчения для получения высококачественного железного концентрата с содержанием железа общего не менее 70 % и оксида кремния не более 2 %.

*Методы исследований.* Проведены исследования вещественного состава рядового железного концентрата месторождения Курской магнитной аномалии с определением степени раскрытия магнетита как до, так и после измельчения, проводившегося в лабораторных шаровой и бисерной мельницах. Изучена кинетика измельчения. Измельченный продукт различной крупности поступал на мокрую магнитную сепарацию при разной напряженности магнитного поля, 800–1200 Э.

*Результаты и их обсуждение.* Исследования показали, что шаровое измельчение в течение 20 мин позволяет получить после магнитной сепарации при крупности 65 % и менее класса –0,02 мм высококачественный железный концентрат с содержанием железа общего 71 %, диоксида кварца 1,58 %. Бисерное измельчение позволяет получать заданные показатели при любом времени измельчения, начиная с 5 мин, и при испытанной напряженности магнитного поля 800 и 1000 Э.

*Выводы.* Для поставленной цели, получения высококачественного железного концентрата, рекомендуется шаровое измельчение, так как бисерное измельчение имеет высокие операционные затраты.

**Ключевые слова:** *измельчение; шаровая мельница; бисерная мельница; степень раскрытия магнетита; высококачественный железный концентрат.*

**Цель исследований** состояла в изучении разных аппаратов и режимов измельчения для получения высококачественного железного концентрата (далее – суперконцентрата) с содержанием железа общего ( $Fe_{\text{общ}}$ ) не менее 70 % и оксида кремния не более 2 % [1–5].

**Введение.** В качестве направления исследований выбрано определение возможности использования шарового и бисерного измельчения [6–8] с последующей мокрой магнитной сепарацией при разной напряженности магнитного поля.

**Объектом исследований** является рядовой железный концентрат, полученный из руды Курской магнитной аномалии. Содержание в концентрате: железа общего – 68,5 %, диоксида кремния – 4,10 %, серы – 0,12 %. Химические, фазовые и минералогические анализы выполнены в аналитической лаборатории АО «Уралмеханобр». Лаборатория аккредитована на техническую компетентность и независимость, зарегистрирована в Государственном реестре, № RA.RU.21PY01 от 05.06.2015 г. Технологические исследования выполнялись в научно-исследовательских лабораториях АО «Уралмеханобр».

**Методы исследований.** Сначала проведены количественный химический и гранулометрический анализы, минералогические и фазовые исследования пробы исходного железного концентрата. Далее изучена кинетика процессов шарового и бисерного измельчения на лабораторной шаровой мельнице объемом 7 л и лабораторной вертикальной бисерной мельнице Knelson-Deschvik. Полученный после измельчения материал подвергался мокрой магнитной сепарации (ММС) в сепараторе ЭБМ-32/20 при различной напряженности магнитного поля – 800, 1000, 1200 Э (эрстед).

**Таблица 1. Распределение минералов и их сростков по классам крупности**  
**Table 1. Distribution of minerals and their intergrowths by grain-size classes**

Минерал	Содержание, отн. %	Распределение зерен минералов, отн. %, по классам крупности, мкм			
		0–10	10–25	25–50	50–125
Магнетит	100,0	25,7	22,0	33,7	18,5
Свободные зерна	97,8	25,6	22,0	33,7	16,4
Зерна в сростании с кварцем	2,2	0,1	–	–	2,1

**Результаты и их обсуждение.** В табл. 1 приведены данные о степени раскрытия основных минералов в исходном рядовом концентрате. В этом случае важное значение имеют зерна магнетита, находящиеся в сростании с кварцем. Чтобы получить суперконцентрат, необходимо полное раскрытие зерен магнетита и кварца [7]. Из данных таблицы следует, что в пробе присутствуют сростки магнетита

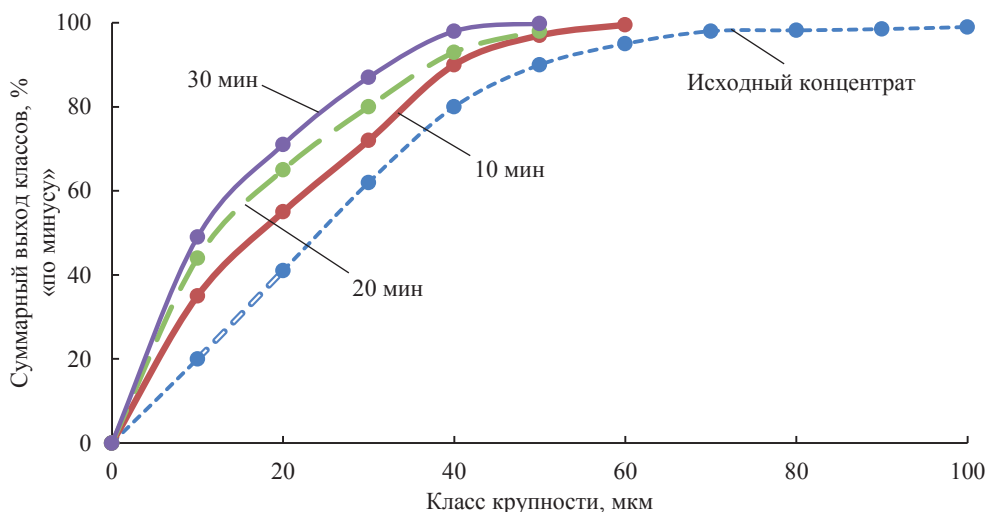


Рисунок 1. Гранулометрические характеристики исходного и измельченного в шаровой мельнице концентрата

Figure 1. Granulometric characteristics of the initial and ball milled concentrate

с кварцем в количестве 2,2 %. Основная их масса находится в классе крупностью 50–125 мкм. Таким образом, для получения суперконцентрата необходимо измельчить рядовой концентрат. Также были проведены гранулометрический и седиментационный анализы с определением железа и диоксида кремния, которые показали, что в классе –0,045 мм содержание железа общего составляет 70,1 %,

диоксида кремния – 2,01 %. Содержание железа общего в классах крупнее 0,006 мм – 68,6–70,6 %, диоксида кремния – 5,0–1,7 %, соответственно, в классе –0,006 мм содержание железа общего – 50,4 %, диоксида кремния – 15,4 %, но, поскольку выход этого класса от исходного концентрата составляет 1,05 %, его выделение нецелесообразно.

**Шаровое измельчение.** На рис. 1 представлены результаты изучения кинетики измельчения в шаровой мельнице в течение 10, 20 и 30 мин. При измельчении получен материал различной крупности – от 55 до 70 % класса –0,020 мм и 65–87 % класса –0,03 мм. Анализ данных по степени раскрытия показал, что при измельчении исходного концентрата в шаровой мельнице в течение 10 мин присутствуют еще нераскрытые сrostки в классе –0,071+0,045 мм в количестве 2 % (табл. 2). При этом содержание кварца в этом классе составляет 9 %. При продолжительности измельчения 20 и 30 мин такой класс фактически отсутствует и магнетит полностью раскрыт, что позволяет рекомендовать измельчение исходного концентрата в шаровой мельнице в течение 20 минут.

**Таблица 2. Степень раскрытия магнетита по классам крупности в продуктах при разной продолжительности измельчения в шаровой мельнице**  
**Table 2. Degree of magnetite release by grain-size classes in products under different grinding times in a ball mill**

Класс крупности, мм	Содержание зерен магнетита, %		Содержание минералов, %		
	Свободные	В сrostках	Кварц	Магнетит	Пирротин
<i>Продолжительность измельчения 10 мин</i>					
–0,071+0,045 мм	98	2	9	90	1
–0,045+0,020 мм	99	1	4	96	–
–0,020+0 мм	100	< 1	3	97	–
<i>Продолжительность измельчения 20 мин</i>					
–0,045+0,020 мм	98	2	3	97	–
–0,020+0 мм	100	< 1	2	98	–
<i>Продолжительность измельчения 30 мин</i>					
–0,045+0,020 мм	99	1	2	98	–
–0,020+0 мм	100	< 1	2	98	–

На рис. 2, *а* и *б* приведены данные по изучению результатов мокрой магнитной сепарации при различных напряженности магнитного поля и крупности после шарового измельчения [9, 10]. Из рис. 2, *а* следует, что со снижением крупности концентрата содержание  $Fe_{\text{общ}}$  возрастает. С возрастанием напряженности магнитного поля при любой крупности содержание  $Fe_{\text{общ}}$  снижается, что соответствует общепринятой теории магнитного обогащения [4]. Из рис. 2, *б* следует, что со снижением крупности концентрата содержание  $SiO_2$  падает. Содержание  $SiO_2$  с возрастанием напряженности магнитного поля [11,12] при любой крупности незначительно повышается.

Следует отметить, что во всех опытах по магнитному обогащению измельченного в шаровой мельнице рядового концентрата массовая доля  $Fe_{\text{общ}}$  находится на уровне не менее 70 %. При этом массовая доля  $SiO_2$  в опытах на крупности 55 % класса –0,02 мм – выше 2 %. Таким образом, оптимальной крупностью для получения суперконцентрата является крупность 65 % класса –0,02 мм при измельчении в течение 20 мин.

**Бисерное измельчение.** Помол исходного концентрата в бисерной мельнице проводился в течение разного времени – 5, 10, 15 мин. На рис. 3 приведены гранулометрические характеристики продуктов после бисерного измельчения [5, 13]. Результаты исследований показали, что при измельчении в течении 5 мин в бисерной мельнице происходит резкий прирост классов 0,03 и 0,02 мм, при дальнейшем увеличении времени измельчения прирост замедляется [14, 15]. При измельчении в течении 5 мин возможно получение материала крупностью 77 % класса –0,02 мм.

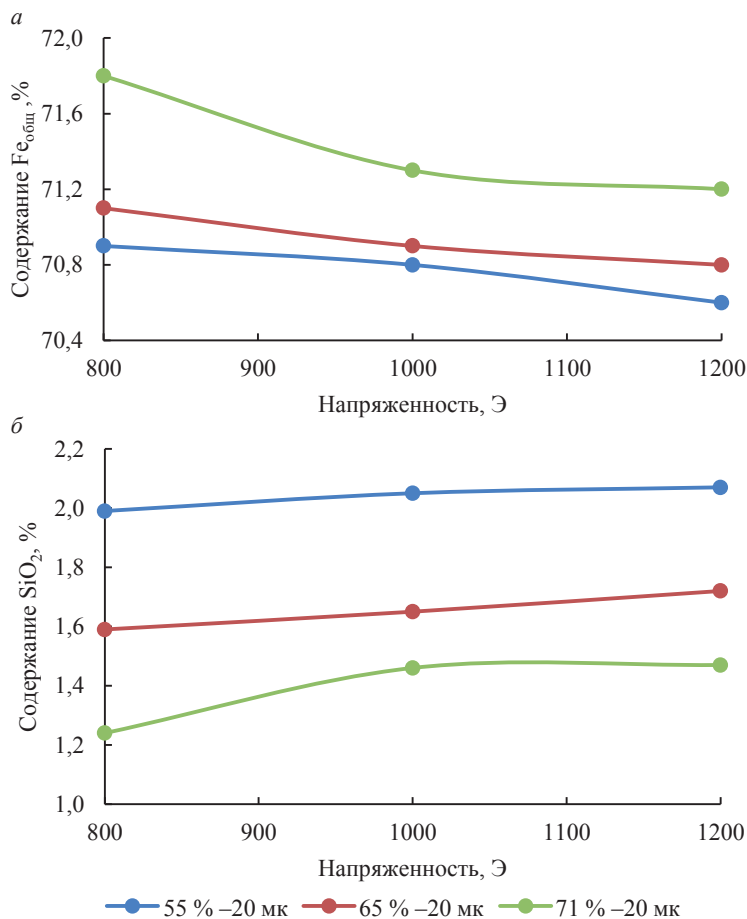


Рисунок 2. Зависимости массовой доли Fe<sub>общ</sub> – а и массовой доли SiO<sub>2</sub> – б от напряженности магнитного поля ММС при различной крупности измельчения

Figure 2. Dependences of Fe<sub>общ</sub> mass fraction – а and of SiO<sub>2</sub> mass fraction – б on the magnetic field strength of wet magnetic separation under different grain-size

Таким образом, оптимальное время измельчения в этом случае составляет 5 мин. Далее были проведены опыты по мокрой магнитной separации на продуктах, полученных после бисерного измельчения. Значения напряженности магнитного поля находились в пределах 800 и 1000 Э. Анализ результатов показал, что при измельчении в бисерной мельнице в течении 5 мин получена крупность 95 % класса –0,045 мм, 77 % класса –0,02 мм, 87 % класса –0,03 мм. При магнитной separации с перечисткой магнитного продукта такой крупности при любой напряженности магнитного поля получены концентраты с содержанием железа

общего 71,3–71,5 % и диоксида кремния 1,1–1,2 %. При измельчении в бисерной мельнице в течении 10 мин получен продукт крупностью 98 % класса  $-0,045$  мм, 85 % класса  $-0,02$  мм, 91 % класса  $-0,03$  мм. Концентраты, полученные при такой крупности, имеют содержание железа общего в пределах 71,5–71,7 %, содержание диоксида кремния 1,26–1,30 %. Таким образом, бисерная мельница во всех режимах измельчения и ММС дает возможность получать суперконцентрат заданного качества. Однако операционные расходы, в том числе затрачиваемая электроэнергия, при бисерном измельчении значительно выше, чем при шаровом, что позволяет рекомендовать для поставленных целей получения суперконцентрата шаровое измельчение с обязательным соблюдением заданной крупности измельченного продукта не менее 65 % класса  $-20$  мкм.

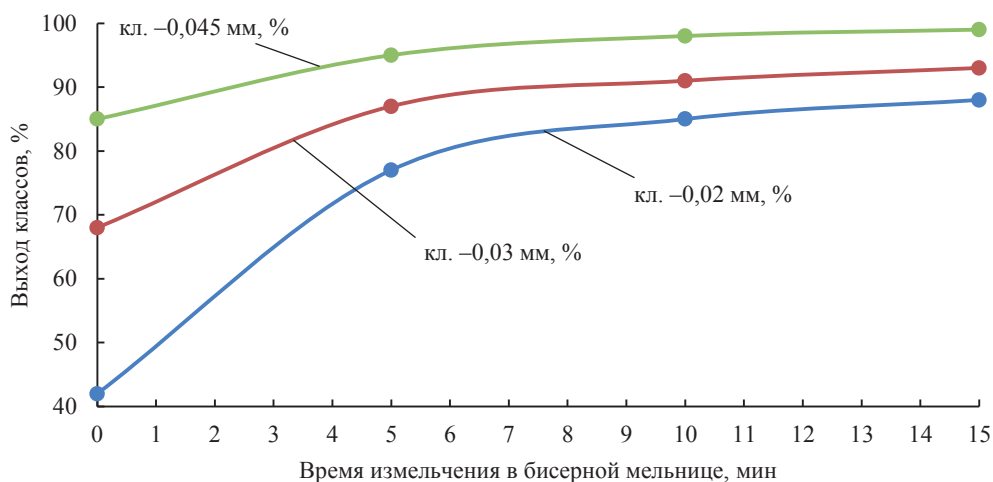


Рисунок 3. Зависимости выхода разных классов крупности от времени измельчения в бисерной мельнице

Figure 3. Dependences of the yield of different grain-size classes on the grinding time in a bead mill

**Выводы.** Изучение кинетики измельчения в шаровой мельнице рядового концентрата с содержанием железа общего 68,5 % и диоксида кремния 4,1 % позволило рекомендовать время измельчения 20 мин.

Оптимальной крупностью при шаровом измельчении является содержание не менее 65 % класса  $-20$  мкм, что позволяет получить высококачественный железный концентрат с содержанием железа общего 71 %, диоксида кремния – 1,58 %.

Бисерное измельчение при любой полученной крупности и времени измельчения 5 и 10 мин позволяет получить после магнитной сепарации заданное качество железного концентрата.

Для поставленной цели получения железного концентрата с содержанием железа общего более 70 % и диоксида кремния менее 2 % рекомендуется шаровое измельчение, так как бисерное измельчение имеет высокие операционные затраты.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Осипова Н. В. Модель оптимального управления магнитным сепаратором на основе метода динамического программирования Беллмана // Черные металлы. 2020. № 7. С. 9–13.
- Газалеева Г. И. Развитие технологии обогащения титаномагнетитов, перспективы ее широкого использования в России и СНГ. Комплексное использование сырья // Техноген-2019: труды Конгресса

с междунар. уч. и элементами школы молодых ученых. 18–21 июня 2019 г. Екатеринбург: ИМ УрО РАН, 2019. С. 66–72.

3. Жуковский Ю. Л., Королев Н. А., Малькова Я. М. Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 686–700.

4. Кармазин В. И., Кармазин В. В. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. М: Горная книга, 2012. 672 с.

5. Markauskas D., Kruggel-Emden H. Coupled DEM-SPH simulations of wet continuous screening // Advanced Powder Technology. 2019. Vol. 30. Iss. 12. P. 2997–3009.

6. Пелевин А. Е., Сьтых Н. А. Применение тонкого гидравлического грохочения для стадийного выделения титаномagnetитового концентрата // Обогащение руд. 2021. № 1. С. 8–14.

7. Samayamuththirian Palaniandy, Rinto Halomoan, Hidemasa Ishikawa. TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit – the multi-component approach // Minerals Engineering. 2019. Vol. 133. P. 10–18.

8. Сентемова В. А. Испытания флотационной технологии повышения качества железных концентратов // Обогащение руд. 2009. № 3. С. 17–21.

9. Liu Sh., Zhou Yu., Li X., Cao Ch. Research on the separating features of a permanent magnetic force and open magnetic system // XXVIII IMPC. Canada, Quebec city, 2016. P. 3834–3843.

10. Пелевин А. Е. Повышение качества магнетитовых концентратов в переменном магнитном поле // Обогащение руд. 2019. № 6. С. 19–24.

11. Горбатова Е. А., Пирогов Б. И., Раков Л. Т., Колкова М. С. Особенности оценки магнитных свойств титаномagnetитов вкрапленных руд Медведевского месторождения // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке: Плаксинские чтения–2019. С. 64–67.

12. Parian M., Lamberg P., Rosenkranz J. Developing a particle-based process model for unit operations of mineral processing – WLIMS // International Journal of Mineral Processing. 2016. Vol. 154. P. 53–65. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.07.001

13. Nowicki J., Hebda-Sobkowicz J., Zimroz R., Wylamanska A. Dependency measures for the diagnosis of local faults in applications to the heavy – tailed vibration signal // Applied Acoustics. 2021. Vol. 178. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.107974

14. Булатов К. В., Газалеева Г. И., Шихов Н. В., Назаренко Л. Н. Разработка схемы обогащения титан-циркониевых песков месторождения Шокаш, Северный Казахстан // Обогащение руд. 2023. № 6. С. 3–8.

15. Мамонов С. В., Газалеева Г. И., Дресвянкина Т. П., Волкова С. В., Васильев И. Д. Повышение технологических показателей переработки отвалных шлаков медеплавильного производства на основе их медленного охлаждения и ультратонкого измельчения // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2018. № 2. С. 83–90.

Поступила в редакцию 29 мая 2024 года

#### **Сведения об авторах:**

**Газалеева Галина Ивановна** – доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела рудоподготовки и специальных методов исследования АО «Уралмеханобр». E-mail: gazaleeva\_gi@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0009-9938-9629>

**Сопина Нина Александровна** – ведущий научный сотрудник отдела рудоподготовки и специальных методов исследования АО «Уралмеханобр». E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0003-2758-1888>

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-9-16

### **Choosing the required grain-size to obtain high-quality iron concentrate**

**Galina I. Gazaleeva<sup>1</sup>, Nina A. Sopina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> AO Uralmexhanobr, Ekaterinburg, Russia.

#### **Abstract**

**Research objective** is to study various devices and modes of grinding to get high-quality iron concentrate with the iron content of not less than 70%, and silicon dioxide of not more than 2%.

**Methods of research.** The material composition of the average iron concentrate at the Kursk magnetic anomaly deposit was studied, the degree of magnetite release rate was determined before and after grinding. The grinding was carried out in laboratory ball and bead mills. The kinetics of grinding was studied. The crushed product of various grain-sizes was fed to wet magnetic separation at various magnetic field strengths, 800–1200 Oe.

**Result and discussion.** Research have shown that 20-minute ball milling allows obtaining high-quality iron concentrate with a total iron content of 71% and quartz dioxide of 1.58% after magnetic separation under the grain-size of 65% and less than the –0,02 mm size-class. Bead milling allows obtaining specified indicators under any milling time, starting from 5 min, and under a tested magnetic field strength of 800 and 1000 Oe.

**Conclusion.** In order to reach the stated objective, i.e. obtaining high-quality iron concentrate, ball milling is recommended, since bead milling has high operating costs.

**Keywords:** grinding; ball mill; bead mill; magnetite release rate; high-quality iron concentrate.

#### REFERENCES

1. Osipova N. V. Model for optimal control of a magnetic separator based on the Bellman dynamic programming method. *Chernye metally = Ferrous Metals Journal*. 2020; 7: 9–13 (In Russ.)
2. Gazaleeva G. I. Developing the technology of titanomagnetites beneficiation and the prospects of its common use in Russia and CIS countries. Integrated utilization of raw material. In: *Fundamental research and applied developments of technogenic formations processing and utilization: Proceedings of the Congress with internat. particip. and the element of the school of young scientists*. Ekaterinburg, 18–21 June 2019. p. 66–72. (In Russ.)
3. Zhukovskii Iu. L., Korolev N. A., Malkova Ia. M. Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2022; 256: 686–700 (In Russ.)
4. Karmazin V. I., Karmazin V. V. *Magnetic, electric, and special methods of mineral processing*. Vol. 1. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2012. (In Russ.)
5. Markauskas D., Kruggel-Emden H. Coupled DEM-SPH simulations of wet continuous screening. *Advanced Powder Technology*. 2019; 30(12): 2997–3009.
6. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Fine hydraulic screening for staged separation of titanium-magnetite concentrate. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2021; 1: 8–14. (In Russ.)
7. Samayamuththirian Palaniandy, Rinto Halomoan, Hidemasa Ishikawa. TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit – The multi-component approach. *Minerals Engineering*. 2019; 133: 10–18.
8. Sentemova V. A. Testing of flotation technology aimed at iron concentrates grade improvement. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2009; 3: 17–21. (In Russ.)
9. Liu Sh., Zhou Yu., Li X., Cao Ch. Research on the separating features of a permanent magnetic force and open magnetic system. In: *XXVIII IMPC. Canada. Quebec city*. 2016. p. 3834–3843.
10. Pelevin A. E. Improving magnetite concentrate quality in an alternating magnetic field. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2019; 6: 19–24. (In Russ.)
11. Gorbatova E. A., Pirogov B. I., Rakov L. T., Kolkova M. S. Assessing magnetic properties of titanomagnetites of Medvedevskoe deposit disseminated ores. In: *Problems and prospects of efficient processing of mineral raw materials in the 21st century: the Plaksin Readings 2019*. p. 64–67. (In Russ.)
12. Parian M., Lamberg P., Rosenkranz J. Developing a particle-based process model for unit operations of mineral processing – WLIMS. *International Journal of Mineral Processing*. 2016; 154: 53–65. Available from: doi: 10.1016/j.minpro.2016.07.001
13. Nowicki J., Hebda-Sobkowicz J., Zimroz R., Wylamanska A. Dependency measures for the diagnosis of local faults in applications to the heavy – tailed vibration signal. *Applied Acoustics*. 2021; 178. Available from: doi: 10.1016/j.apacoust.2021.107974
14. Bulatov K. V., Gazaleeva G. I., Shikhov N. V., Nazarenko L. N. Development of a beneficiation scheme for titanium-zirconium sands of the Shokash deposit, North Kazakhstan. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2023; 6: 3–8. (In Russ.)
15. Mamonov S. V., Gazaleeva G. I., Dresviankina T. P., Volkova S. V., Vasiliev I. D. Improvement of technological indices of copper smelters slags processing on the basis of their slow cooling and ultra-fine grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 2: 83–90 (In Russ.)

**Information about the authors:**

**Galina I. Gazaleeva** – DSc (Engineering), senior researcher, Department of Ore Dressing and Special Methods of Investigation, OA Uralsmekhanobr. E-mail: gazaleeva\_gi@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0009-9938-9629>

**Nina A. Sopina** – leading researcher, Department of Ore Dressing and Special Methods of Investigation, OA Uralsmekhanobr. E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0003-2758-1888>

**Для цитирования:** Газалеева Г. И., Сопина Н. А. Выбор необходимой крупности для получения высококачественного железного концентрата // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 5. С. 9–16. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-9-16

**For citation:** Gazaleeva G. I., Sopina N. A. Choosing the required grain-size to obtain high-quality iron concentrate. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 5: 9–16 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-9-16