ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(11-1):338–345
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.272 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_338

КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СУХОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ

С. С. Завьялов[1], Р. С. Мамонов[1]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Для предварительного обогащения руд эффективным методом является рентгенорадиометрическая сепарация, которая хорошо себя зарекомендовала на классах крупности + 30 мм. Не обогащаемый методом рентгенорадиометрической сепарации класс крупности – 30 мм в зависимости от массовой доли ценного компонента либо присоединяется к концентрату рентгенорадиометрической сепарации (РРС), либо складируется в отдельный отвал. Присоединение мелких классов крупности к концентрату рентгенорадиометрической сепарации приводят к его разубоживанию, а направление их в отвал приводят к потерям ценного компонента. Вовлечение в переработку необогащаемых методом РРС мелких классов крупности является актуальным и экономически оправданным направлением. Пневматическая сепарация используется для обогащения асбестовых руд, слюды и угля. В статье исследована возможность комбинированного сухого предварительного обогащения золотосодержащей руды методами рентгенорадиометрической сепарации и разделением по скоростям витания в сепараторе восходящего потока. Установлена возможность выделить до 50% пустой породы с отвальным содержанием золота при суммарных потерях золота менее 5%, таким образом, предварительное обогащение может значительно упростить технологию переработки золотосодержащих руд.

Ключевые слова: обогащение полезных ископаемых, пневматическая сепарация, рентгенорадиометрическая сепарация, золотосодержащая руда, гравитационные методы, сухое предварительное обогащение, техногенные образования.

Благодарности: Исследование подготовлено в соответствии с государственным заданием на выполнение НИР для ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» № 075–03–2021–303 от 29.12.2020.

Для цитирования: *Завьялов С. С., Мамонов Р. С.* Комбинированная технология сухого предварительного обогащения золотосодержащей руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 338–345. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_338.

Mixed-type dry pretreatment technology for gold-bearing ore

S. S. Zavyalov[1], R. S. Mamonov[1]

[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: An efficient method of ore pretreatment is X-ray radiometric separation which is particularly effective with particles +30 mm in size. Untreatable by X-ray radiometric separation, size 30 mm, depending on mass fraction of a valuable component, either goes to

© С. С. Завьялов, Р. С. Мамонов. 2021

concentrate or to waste, which leads to either dilution of the concentrate or to loss of valuable component, respectively. Inclusion of XRRS-untreatable fins into processing is a relevant and economically beneficial approach. Pneumatic separation is used in processing of asbestos, mica and coal. This article discusses feasibility of mixed-type dry pretreatment of gold-bearing ore by X-ray radiometric separation and separation by upward flow velocities in a pneumatic separator. It is found to be possible to separate up to 50% of barren rock with dump-value content of gold at total gold loss less than 5%. Thus, such pre-treatment can greatly simplify gold-bearing ore processing technology.

Key words: mineral processing, pneumatic separation, X-ray radiometric separation, gold-bearing ore, gravitational methods, dry pre-treatment, manmade waste.

Acknowledgments: The study was carried out under R&D State Contract with the Ural State Mining University, Contract No. 075-03-2021-303 as of 29 December 2020.

For citation: Zavyalov S. S., Mamonov R. S. Mixed-type dry pretreatment technology for gold-bearing ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):338–345. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_338.

Введение

На сегодняшний день все чаще в переработку вовлекаются труднообогатимые, бедные и забалансовые руды. Актуальным решением для которых является предварительное сухое обогащение.

Технология комбинированного предварительного сухого обогащения считается экологически чистой, она позволяет снизить себестоимость продуктов, упростить на стадии предварительного обогащения технологию переработки, облегчив решение вопросов с транспортировкой руды, складированием и утилизацией отходов.

Комбинированная сухая предварительная технология включает в себя РРС, которая может эффективно обогащать классы крупности + 30 мм, необогатимый методом РРС класс крупности — 30 мм присоединяется к концентрату РРС, что приводит к разубоживанию концентрата. В случае, когда необогатимый класс отправляют в отвал, это приводит к потерям ценных компонентов.

Для решения проблем разубоживания концентрата или потерь с хвостами необогатимый РРС класс крупности — 30 мм обогащали методом разделения по скоростям витания в сепараторе восходящего потока воздуха (СВП).

Теоретический анализ

Рентгенорадиометрическая сепарация основана на возбуждении и регистрации излучений. Рис. 1 дает наглядное представление о физике измерений, принципах возбуждения и регистрации излучений измерительной системой РРС, опираясь на основные понятия рентгеновского излучения [1, 2].

Аналитический параметр от каждого куска *Pi* фактически представляет функцию содержания искомого анализируемого элемента (C_i) и вычисляется способом спектрального отношения:

$$P_i = f(C_i) = \frac{N_i + K_2 N_2}{N_3 + K_4 N_4}, \qquad (1)$$

где N_1, ..., N_4 — количество импульсов, регистрируемых ДЭУ (детектор электронный управляемый) от куска в выбранных аналитических областях; например: N_i — флуоресцентное характеристическое рентгеновское излучение (ХРИ) анализируемого i-го элемента; N_2 и N_4 — флуоресцентное ХРИ сопутствующих и (или) мешающих элементов, которые необходимо учитывать для более правильного расчета P_i,

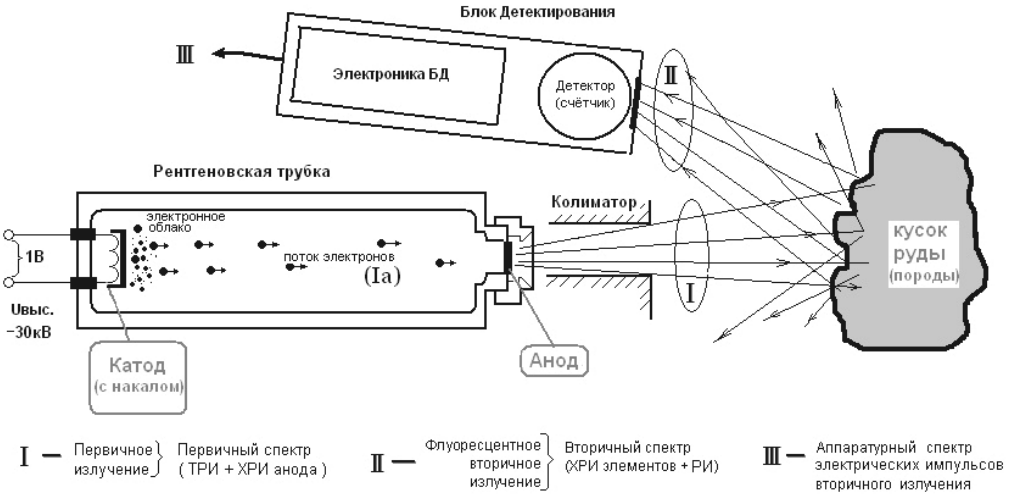

Рис. 1. Принцип возбуждения и регистрации излучения в рентгенорадиометрической сепарации
Fig. 1. Concept of radiation generation and recording in X-ray radiometric separation

повышения чувствительности и эффективности измерений (в т.ч. с учетом взаимовлияющих элементов); N_3 — как правило, представляет область рассеянного куском излучения (*NS*) — область РИ; K_2 и K_4 — знакопеременные спектральные коэффициенты, выбираемые при разработке методики РРС [3].

На стадии предварительных исследований по обогащению пробы золотосодержащей руды определены основные параметры работы сепаратора СРФ1—100 производства компании ООО «Техносорт» в режиме «анализ»:

– рентгеновская трубка с рениевым анодом;

– аналитические области ХРИ;

– напряжение на трубке U = 36 кВ и ток I = 40 мА.

Для золотосодержащей руды характерно, когда аналитический параметр учитывает значения интенсивности железа и рассеянного излучения источника излучения (в связи с тесной ассоциацией золота с железными минералами).

Предварительные исследования методом рентгенорадиометрической сепарации проводились на классе крупности –50+30 мм. Для всех образцов (кусков) пробы золотосодержащей руды сняты вторичные характеристические рентгеновские спектры, для определения содержания золота в образцах они направлялись на пробирный анализ. По результатам пробирных анализов на содержание золота в образцах и аналитических параметров каждого образца была построена диаграмма (рис. 2). На диаграмме (рис. 2) отчетливо видно, что при увеличении значения аналитического параметра повышается содержание золота, это даёт основания предполагать корреляцию золота с железом в данной золотосодержащей руде [4, 5].

Предварительным исследованием установлено, что массовая доля золота в руде коррелируется с массовой долей железа, это подтверждает целесообразность использования в исследованиях алгоритма регистрации характери-

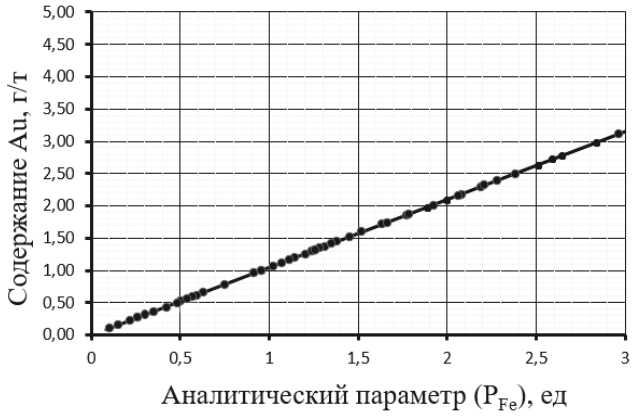

Рис. 2. Корреляция значения аналитических параметров PFe и содержания золота в образцах класса крупности – 50 + 30 мм
Fig. 2. Correlation of values of analytical parameters PFe and gold contents in size grades – 50 + 30 mm

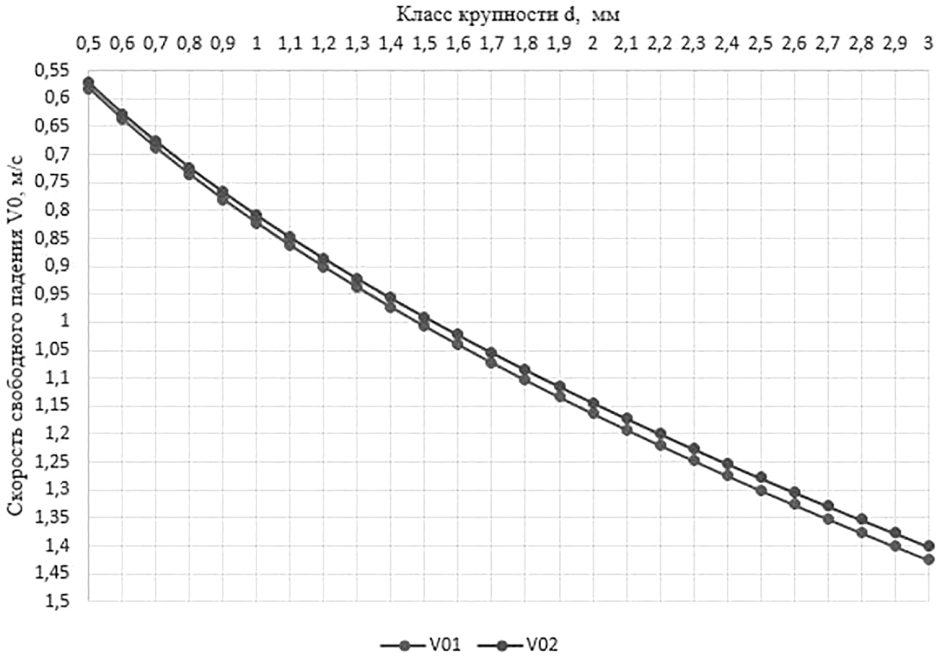

Рис. 3. Зависимости скорости свободного падения частиц от диаметра частиц d в диапазоне крупности от 3 до 0,5 мм, где V01 — плотность первого минерал 2600 кг/м^3, V02 — плотность второго минерала 2700 кг/м^3
Fig. 3. Free-fall velocity v_0 versus diameter d for particles 3 to 0.5 mm in size, where V01 and V02 are, respectively, densities 2600 and 2700 kg/m^3 of the first and second minerals

стического рентгеновского излучения по железу.

Значения выбранного алгоритма, определенные при исследовании ото-

бранных кусков класса крупности –50+30 мм представлены в диаграмме на рис. 2.

Необогатимый методом РРС класс крупности –30 мм обогащали на сепараторе восходящего потока. Выполнена оценка возможностей гравитационного обогащения путем построения диаграммы Г. О. Чечотта [6].

Для расчета скорости свободного падения использована преобразованная формула Н. Ф. Меринова [7]:

$$\vartheta_0 = \frac{24(\rho - \delta)\omega}{d \cdot \delta} \cdot \left(\sqrt{\mu^2 + \frac{d^3\omega^3\delta(\rho - \delta)g}{216}} - \mu \right), \quad (2)$$

где d — крупность частиц, м; g — ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с^2; μ — динамический коэффициент вязкости, Н·с/м^2; ω — коэффициент сферичности (при расчетах не учитывается); ρ, δ — соответственно, плотность частицы и воздуха, кг/м^3.

Расчеты проводили для классов крупности в диапазоне от 3 до 0,5 мм. Классы крупности –0,5 мм планируется отправлять на дальнейшее обогащение [8, 9].

По полученным данным были построенны зависимости свободного падения частиц для класса крупности от 3 до 0,5 мм. На рис. 3 приведены зависимости скорости свободного падения частиц V_0 от плотности при разнице в плотностях 100 кг/м^3.

По зависимостям, которые представлены на рис. 3, можно определить, на какие классы крупности необходимо разделить материал, чтобы получить эффективное разделение по плотности с использованием разделения по скоростям витания [10, 11].

Результаты расчета свидетельствуют о возможности реализации пнематического сухого разделения при использования узкой классификации материала [12].

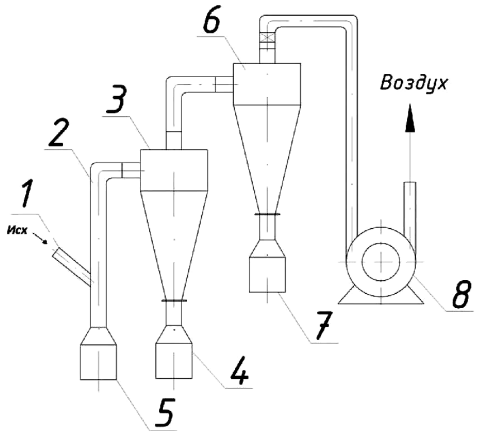

Рис. 4. Принципиальная схема установки СВП для разделения частиц различной плотности по скоростям витания частиц в восходящем потоке: 1 — загрузочный лоток; *2 —* труба восходящего потока; *3 —* циклон для улавливания легкой фракции; *4 —* бункер для легкой фракции; *5 —* бункер для тяжелой фракции; *6 —* циклон для улавливания пыли; *7 —* бункер для пыли; *8 —* воздуходувка

Figure 4. SVP plant layout for separation of particles by velocities in upward air flow:
1 — inlet pan; *2 —* upward flow tube; *3 —* light fraction capture cyclone; *4 —* light fraction bunker; *5 —* heavy fraction bunker; *6 —* dust capture cyclone; *7 —* dust bunker; *8 —* blower

Исследования пневматической сепарации выполнены на классе крупности –3+1,4 мм с помощью установки, принципиальная схема которой представлена на рис. 4.

Результаты

При рентгенорадиометрической сепарации для получения хвостов, промпродукта и концентрата в кусках (образцы) руды, имеющих различные значения аналитического параметра P_{Fe}, произвели объединение кусков класса крупности –50+30 мм в продукты с близкими значениями аналитического параметра. Полученные результаты объединённых продуктов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Объединенные продукты с близкими по значению аналитическими параметрами P_{Fe} и содержание в них золота

Joint products with close values of analytical parameters PFe and gold contents

Проба	Аналитический параметр, P_{Fe}, ед.	Выход продуктов, %	Массовая доля, Au, г/т	Извлечение Au, %
Концентрат	P_{Fe},> 1,5	34,50	1,10	61,18
Промпродукт	1,0 < P_{Fe},< 1,5	27,75	0,80	35,78
Хвосты	P_{Fe},< 1,0	37,75	0,05	3,04
Итого:		100,00	0,62	100,00

Таблица 2

Результаты разделения на сепараторе восходящего потока класса крупности –3+1,4 мм

Upward flow separation results for particles -3+1.4 mm in size

Наименование	Выход фракции, %	Массовая доля Au, г/т	Извлечение Au, %
Тяжелая фракция	38	2,01	95,35
Легкая фракция	62	0,06	4,65
Исходное питание	100	0,80	100

Лабораторные эксперименты выполнялись на сепараторе восходящего потока следующим образом. Золотосодержащая руда крупностью –3+1,4 мм подается в сепаратор восходящего потока по желобу *1* в зону восходящего потока воздуха, где с помощью воздуходувки *8* воздух засасывается в разделительную трубу *2,* в которой происходит разделение материала по плотности, основанное на различии в скоростях витания. Тяжелые частицы с большим значением скорости витания выпадают из трубы *2* и накапливаются в бункере *5*. Циклон *6* с бункером *7* служит для улавливания пыли из воздуха. Легкая фракция с меньшим значением скорости витания в трубе *2* выносится вверх и улавливается в циклоне *3*, накапливаясь в бункере *4* [13]. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Обсуждение

При предварительном обогащении рентгенорадиометрической сепарацией класса крупности –50+30 мм возможно выделение хвостов с выходом 37,75% и массовой долей золота 0,05 г/т при потерях золота 3,04%.

В результате предварительного обогащения по скоростям витания класса крупности –3+1,4 мм возможно выделение легкой фракции в хвосты при выходе 62% (с массовой долей золота 0,06 г/т при потерях золота с хвостами 4,65%) и получение концентрата с массовой долей золота 2,01 г/т.

Вывод

В целом экспериментальные исследования показали высокую эффективность предварительного обогащения золотосодержащей руды методами РРС и СВП. Исследованная комбинированная технология предварительного обогащения золотосодержащей руды позволяет выделить до 50% пустой породы в отвальные хвосты при суммарных потерях золота менее 5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория и практика рентгенорадиометрического обогащения: научная монография В. С. Шемякин, Е. Ф. Цыпин, Ю. О. Федоров, С. В. Скопов. — Екатеринбург; Изд-во «Форт Аналог-Исеть», 2013. — 255 с.

2. *Мокраусов В. А., Липеев В. А.* Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. — М: Недра, 1972. — 192 с.

3. *Цыпин Е. Ф.* Информационные методы обогащения // Научные основы и современные процессы комплексной переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения 2010): Материалы международного совещания, г. Казань, 2010 г. — М.: 2010. — С. 354 -358.

4. Рентгенорадиометрическая сепарация минерального сырья и техногенных образований Уральского региона / В. С. Шемякин, С. В. Скопов, Е. Ф. Цыпин и др. // Известия ВУЗов. Горный журнал, 2011. № 4. — С. 29 — 33.

5. *Christopher Robben* (Dr.) (Business Development Manager), Pedro Condorib, Angel Pinto, Ronald Machaca, Anssi Takala. X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine. Minerals Engineering 145 (2020) 105870.

6. *Лященко П. В.* Гравитационные методы обогащения. Москва 1935. –264 с.

7. *Меринов Н. Ф.* Гравитационные методы обогащения. Конспект лекций. Екатеринбург 2005. — 204 с.

8. *Kamil Stan´czyk, Andrzej Bajerski, Marian J. Łaczny.* Negative-pressure pneumatic separator: a new solution for hardcoal. Beneficiation Int J Coal Sci Technol (2021) 8(1):103—123. DOI : 10.1007/s40789—020—00345-w

9. *Морозов Ю. П., Завьялов С. С., Джураев Х. Р.* «Исследование разделения сульфидной руды по скорости витания в восходящем потоке воздуха». Научно-техническая конференция «Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья», в рамках VII уральского горнопромышленного форума Екатеринбург, 17—19 октября 2017 г. — С.192—194.

10. *Морозов Ю. П., Завьялов С. С., Волков П. С., Джураев Х. Р.* Исследование сухого гравитационного обогащения сульфидной руды месторождения Шатыркуль. Материалы XXII Международной научно-технической конференции. «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», 19—20 апреля 2017 г. Екатеринбург 2017 г. С. 151—153.

11. *Serhii Kharchenko, Yurii Borshch, Stepan Kovalyshyn, Mykhailo Piven, Magomed Abduev,Anna Miernik, Ernest Popardowski, Paweł Kiełbasa.* Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct *Appl. Sci.* 2021, *11*(10), 4383; DOI : 10.3390/app11104383.

12. *Цыпин Е. Ф., Морозов Ю. П., Козин В. З.* Моделирование обогатительных процессов и схем: учебник для вузов. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 1996. — 368 с.

13. *Завьялов С. С., Сафонова М. С.* Изучение сухих гравитационных методов предварительного обогащения сульфидных руд. Материалы XXIII Международной научно-технической конференции. «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» 10—13 апреля 2018 г. Екатеринбург 2018 — С. 398—401. ГИАБ

REFERENCES

1. *Teoriya i praktika rentgenoradiometricheskogo obogashcheniya: nauchnaya monografiya* [Theory and practice of X-ray radiometric enrichment: scientific monograph] by V. S. Shemyakin, E. F. Tsypin, Yu.O. Fedorov, S. V. Skopov. Yekaterinburg; Publishing house “Fort Analog-Iset”, 2013. 255 p. [In Russ]

2. Mokrausov V. A., Lipeyev V. A. *Radiometricheskoe obogashchenie neradioaktivnyh rud* [Radiometric beneficiation of non-radioactive ores]. Moscow: Nedra, 1972. 192 p. [In Russ]

3. Tsypin E. F. Information methods of enrichment. Scientific bases and modern processes of complex processing of refractory mineral raw materials (Plaksin readings 2010): *Proceedings of an international meeting, Kazan*, 2010 Moscow: 2010. pp. 354—358. [In Russ]

4. Shemyakin V. S., Skopov S. V., Tsypin E. F. et al. X-ray radiometric separation of mineral raw materials and technogenic formations of the Ural region. *Izvestiya VUZov. Mining Journal,* 2011. no. 4. pp. 29—33. [In Russ]

5. Christopher Robben (Dr.) (Business Development Manager), Pedro Condorib, Angel Pinto, Ronald Machaca, Anssi Takala. X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine. Minerals Engineering 145 (2020) 105870.

6. Lyashchenko P. V. *Gravitacionnye metody obogashcheniya* [Gravitational enrichment methods]. Moscow 1935. 264 p. [In Russ]

7. Merinov N. F. *Gravitacionnye metody obogashcheniya* [Gravitational methods of enrichment]. Lecture notes. Yekaterinburg 2005. 204 p. [In Russ]

8. Kamil Stan´czyk, Andrzej Bajerski, Marian J. Łaczny. Negative-pressure pneumatic separator: a new solution for hardcoal. Beneficiation Int J Coal Sci Technol (2021) 8(1):103—123. DOI : 10.1007/s40789—020—00345-w

9. Morozov Yu. P., Zavyalov SS, Dzhuraev Kh. R. “Study of the separation of sulfide ore by the rate of soaring in the ascending air flow”. Scientific and technical conference “Innovative technologies for enrichment of mineral and technogenic raw materials”, in the framework of the VII Ural Mining Forum Yekaterinburg, October 17—19, 2017 C192 194. [In Russ]

10. Morozov Yu.P., Zavyalov S. S., Volkov PS, Dzhuraev Kh.R. Study of dry gravity concentration of sulfide ore of the Shatyrkul deposit. Materials of the XXII International Scientific and Technical Conference. “Scientific bases and practice of processing ores and technogenic raw materials”, April 19—20, 2017. Yekaterinburg. C. 151—153. [In Russ]

11. Serhii Kharchenko, Yurii Borshch, Stepan Kovalyshyn, Mykhailo Piven, Magomed Abduev,Anna Miernik, Ernest Popardowski, Paweł Kiełbasa. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct *Appl. Sci.* 2021, *11*(10), 4383; DOI :10.3390/app11104383.

12. Tsypin E. F., Morozov Yu. P., Kozin V. Z. *Modelirovanie obogatitel’nyh processov i skhem* [Modeling of concentrating processes and schemes: textbook for universities]. Yekaterinburg. Ural University Publishing House, 1996. 368 p. [In Russ]

13. Zavyalov S. S., Safonova M. S. Study of dry gravity methods of preliminary concentration of sulfide ores. Materials of the XXIII International Scientific and Technical Conference “Scientific bases and practice of processing ores and technogenic raw materials” April 10—13, 2018. Yekaterinburg. C. 398—401. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Завьялов Сергей Сергеевич[1] — аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых, e-mail: doker_777@bk.ru;
Мамонов Роман Сергеевич[1] — инженер, e-mail: mamonoff_npa@mail.ru;
[1] Уральский государственный горный университет, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zavyalov S. S.[1], Post-Graduate Student at the Mineral Processing Department, e-mail: doker_777@bk.ru;
Mamonov R. S.[1], Engineer, e-mail: mamonoff_npa@mail.ru;
[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 25.05.2021; получена после рецензии 13.07.2021; принята к печати 10.10.2021.
Received by the editors 25.05.2021; received after the review 13.07.2021; accepted for printing 10.10.2021.