

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ СУЛЬФИДНЫХ МЕДНЫХ РУД

С. С. Завьялов¹, Р. С. Мамонов¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: Гравитационные методы обогащения являются самыми распространёнными методами переработки минерального сырья. До двадцатого столетия нашей эры гравитационные методы были основными методами обогащения полезных ископаемых. На практике сухие гравитационные методы используются как предварительные, основные, а иногда и единственные для обогащения некоторых видов минерального сырья. В этих случаях результатом обогащения является готовая товарная продукция, как, например, при обогащении руд хризотил-асбеста, энергетических углей, строительных материалов, неметаллических полезных ископаемых. В настоящее время существуют следующие машины: пневматические отсадочные машины предназначены для обогащения угля в воздушной среде, в отдельных случаях могут применяться для обогащения руд, а также воздушные отсадочные машины, предназначенные для обогащения асбестовой руды с отсасыванием асбестового волокна, выделившегося на поверхности рудного слоя. Полочная воздушная сепарация относится к воздушному обогащению полезных ископаемых и предназначена для сепарации мелкозернистых сыпучих смесей в зависимости от плотности, а также формы и размера разделяемых зерен. На эффективность пневматической сепарации сыпучих материалов влияют их различия, зависящие от плотности, размера и формы частиц, а также различия в скоростях витания. Кроме того, влияние оказывают образование в зоне разделения вихреобразных воздушных потоков; столкновения частиц между собой и со стенками аппарата; неравномерности распределения скоростей воздушных потоков в камере аппарата.

Ключевые слова: сухое предварительное обогащение, гравитационные методы, пневматическая сепарация, медная руда, обогащение полезных ископаемых, сухие методы обогащения, обогащение мелких классов крупности, новые процессы и аппараты, технология переработки, технологические показатели.

Благодарности: Исследование подготовлено в соответствии с государственным заданием на выполнение НИР для ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» № 075–03–2022–401 от 12.01.2022.

Для цитирования: Завьялов С. С., Мамонов Р. С. Теоретическое обоснование возможностей применения пневматической сепарации при обогащении сульфидных медных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11-1. – С. 199–209. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_199.

Theoretical justification of pneumatic separation for copper sulfide ore enrichment

S. S. Zavyalov¹, R. S. Mamonov¹

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: Gravity methods of enrichment are the most common methods of mineral processing. Until the twentieth century A.D., gravity methods were the main methods of mineral processing. In practice, dry gravity methods are used as preliminary, basic, and sometimes the only methods for enrichment of some kinds of minerals. In these cases, the result of enrichment is a finished commercial product. For example, enrichment of ores of chrysotile-asbestos, power coals, construction materials, nonmetallic minerals. At the present time there are the following machines: pneumatic stripping machines are intended for coal enrichment in the air environment and in some cases can be used for ore enrichment, as well as the air stripping machine intended for asbestos ore enrichment refers to the known methods with suction of asbestos fiber released on the ore layer surface. Shelf air separation refers to the air enrichment of minerals and is intended for the separation of fine-grained bulk mixtures depending on the density, as well as the shape and size of the separated grains. The efficiency of pneumatic separation of bulk solids is affected by differences depending on the density, size and shape of the particles and in the velocity of whirling; formation of eddy. air flows in the separation zone; collisions of particles with each other and with the walls of the device; in the chamber of the device uneven distribution of velocities of air flows.

Key words: dry pretreatment, gravity methods, pneumatic separation, copper ore, dry enrichment methods, enrichment of small size classes, new processes and apparatuses, enrichment technology, technological indicators. mineral dressing.

Acknowledgements: The study was prepared in accordance with the state assignment for research for the Ural State Mining University No. 075-03-2022-401 dated 12.01.2022.

For citation: Zavyalov S. S., Mamonov R. S. Theoretical justification of pneumatic separation for copper sulfide ore enrichment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-1):199–209. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_199.

Введение

В условиях труднодоступности водных ресурсов и необходимости снижения себестоимости переработки руд и нерудных материалов все больше уделяют внимание методам обогащения без использования рабочей или вспомогательной технической воды. Мокрые процессы обогащения являются традиционными и высокоэффективными методами обогащения. Тем не менее мокрые процессы обогащения дорогостоящие, со сложным водошламовым хозяйством [1–3].

Все чаще в переработку вовлекаются бедные и труднообогатимые руды, для

которых вопросы предварительного обогащения становятся актуальными.

Предварительное обогащение может значительно упростить технологию переработки, снизить себестоимость продуктов и решить ряд вопросов складирования и утилизации отходов [4–6].

Исследования выполнены на руде месторождения «Шатыркуль», находящемся на расстоянии 1200 км от Балхашской обогатительной фабрики. В связи с высокими затратами на транспортировку руды является рациональным использование предварительного обогащения руды на руднике. Материал крупностью плюс 30 мм можно эффек-

тивно обогащать с применением рентгено-радиометрической сепарации (PPC), материал крупностью менее 30 мм в зависимости от массовой доли ценного компонента и его количества либо присоединять к концентрату PPC, что приведёт к разубоживанию концентрата, либо отправлять в отвал, что приведёт к потерям ценного компонента [7, 8].

Необогатимые методом PPC мелкие классы крупности обогащают в пневматическом сепараторе.

Теоретический анализ

Характеристика сульфидной медной руды.

Основными наиболее распространенными минералами руды являются кварц, кальцит, магнетит, гематит и халькопирит (Стандарт организации «Руда медная Шатыркульская» СТ ТОО 40438373–2006, 244 с). Химический состав руды представлен в табл. 1.

Проба руды месторождения «Шатыркуль» представлена для исследования с массовой долей меди 3,64%, классом крупности минус 30 мм.

Оценка возможностей гравитационного обогащения выполнена путем построения диаграммы Г. О. Чечотта для разделяемых компонентов. Для

расчета скорости свободного падения частиц в воздухе использовалась формула Н. Ф. Меринова [9–11].

$$v_0 = \frac{4(\rho - \Delta)S_{y\partial}}{\Delta} \left(\sqrt{\mu^2 + \frac{\Delta g}{(\rho - \Delta)^2 S_{y\partial}^3} - \mu} \right),$$

где d – крупность частиц, м; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; μ – динамический коэффициент вязкости, Н·с/м²; w – коэффициент сферичности (при расчетах не учитывается); ρ, Δ – соответственно, плотность частицы и воздуха, кг/м³.

$$S_{y\partial} = \frac{6}{d(\rho - \Delta)w}.$$

Расчеты проводили для класса крупности в диапазоне от 21 до 2 мм [12, 13].

Полученные результаты представлены в табл. 2.

По полученным данным построены зависимости скорости свободного падения частиц в воздушной среде от диаметра частиц в диапазоне крупности от 21 до 2 мм.

По зависимостям, которые представлены на рис. 1 можно определить, на какие классы крупности необходимо разделить материал, чтобы получить эффективное разделение по плотности

Таблица 1
Химический состав руды месторождения Шатыркуль
Chemical composition of the Shatyrykul deposit ore

Элементы	Массовая доля, %
Cu _{общ}	от 2,10 до 3,6
Mo	0,015
S	2,11
Pb	0,07
As	0,020
Fe	11,75
SiO ₂	52,54
Au	0,4 г/т
Ag	2,7 г/т
Zn	0,18
Al ₂ O ₃	5,10

Таблица 2

Рассчитанные скорости свободного падения частиц в воздушной среде для класса крупности от 21 до 2 мм

Calculated free-fall velocities of particles in the air for the particle size class of 21 to 2 mm

d, мм	Суд ₁	V ₀₁ , м/с	Суд ₂	V ₀₂ , м/с
21,00	0,08	39,51	0,10	35,34
20,00	0,09	38,56	0,11	34,48
19,00	0,09	37,58	0,11	33,61
18,00	0,10	36,58	0,12	32,71
17,00	0,10	35,54	0,13	31,79
16,00	0,11	34,48	0,13	30,84
15,00	0,11	33,38	0,14	29,86
14,00	0,12	32,25	0,15	28,84
13,00	0,13	31,07	0,16	27,79
12,00	0,14	29,85	0,18	26,69
11,00	0,16	28,57	0,19	25,55
10,00	0,17	27,24	0,21	24,36
9,00	0,19	25,84	0,24	23,10
8,00	0,21	24,35	0,27	21,77
7,00	0,24	22,77	0,31	20,36
6,00	0,29	21,07	0,36	18,83
5,00	0,34	19,21	0,43	17,17
4,00	0,43	17,16	0,54	15,33
3,00	0,57	14,81	0,71	13,23
2,00	0,86	12,01	1,07	10,72

с использованием сухих гравитационных методов обогащения. Для примера показано, что тяжелые частицы концентрата крупностью 10 мм будут делиться по плотности с частицами породы с отвальным содержанием меди крупностью 12,5 мм.

Результаты

По полученным результатам для эффективной реализации сухого гравитационного разделения необходимо использование узкой классификации материала [14–16].

Для исследования было отобрано сто кусков различной формы с разной плотностью и массой. Изучение параметров кусков выполнено на классах

крупности от минус 20 до плюс 18 мм [17–19].

Для всех кусков определяли плотность, массу, объем и коэффициент формы.

Для определения коэффициента формы выполнены замеры длины ширины и высоты каждого куска.

Коэффициент формы (K_{ϕ}) по геометрическим параметрам определен по формуле 3.

$$K_{\phi} = \frac{l}{b} + \frac{l}{h},$$

где l — длина куска, мм; b — ширина куска, мм; h — высота куска, мм.

Полученные результаты представлены в табл. 3.

Для изучения отклонения кусков с помощью горизонтального потока

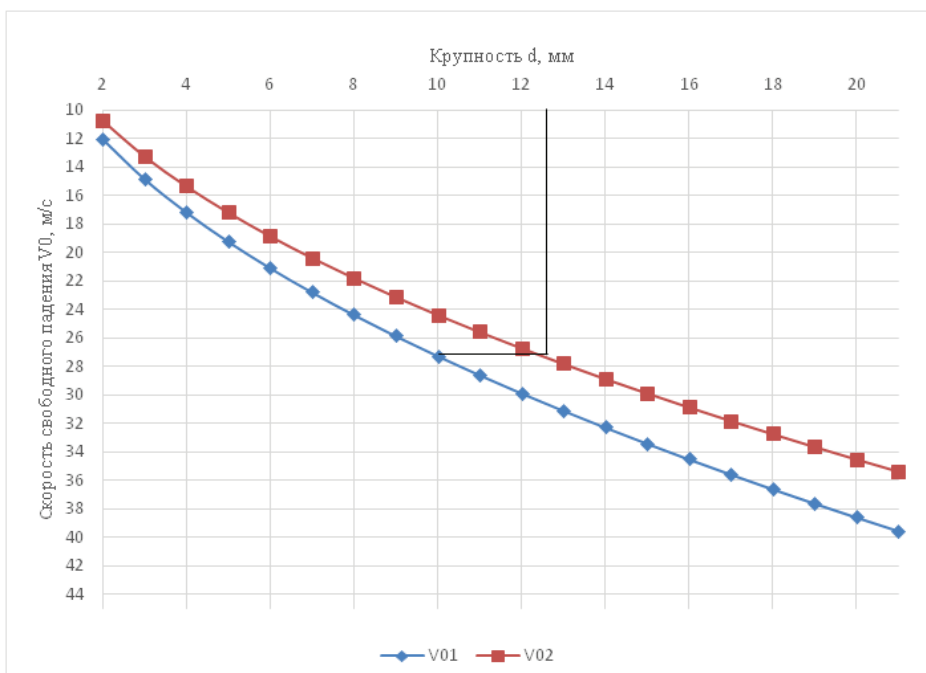


Рис. 1. Зависимости скорости свободного падения частиц v_0 в воздушной среде от крупности частиц d в диапазоне от 21 до 2 мм, где v_{01} — скорость свободного падения частицы с плотностью 2800 кг/м^3 , а v_{02} — скорость свободного падения частицы с плотностью 3500 кг/м^3

Fig. 1. Dependences of particle free fall velocity v_0 in the air medium on the particle size d in the range from 21 to 2 mm, where v_{01} is the free-fall speed of a particle with a density of 2800 kg/m^3 , and v_{02} is the free-fall speed of a particle with a density of 3500 kg/m^3

Таблица 3

Экспериментальные данные по определению параметров кусков
Experimental data for determining the parameters of lumps

№ кус-ка	Масса, г	Объем, см ³	Плот-ность, кг/м ³	Кэф-фициент формы	№ кус-ка	Масса, г	Объем, см ³	Плот-ность, кг/м ³	Кэф-фициент формы
1	10,94	4,1	2668,29	7,68	51	10,07	3,64	2766,48	4,23
2	12,49	3,76	3321,81	8,17	52	8,38	1,79	4681,56	4,19
3	6,98	2,61	2674,33	6,21	53	13,72	4,57	3002,19	3,31
4	13,56	4,9	2767,35	5,06	54	8,6	3,24	2654,32	2,51
5	14,96	5,57	2685,82	8,5	55	8,09	2,93	2761,09	4,41
6	14,03	5,02	2794,82	3,76	56	11,36	4,22	2691,94	3,74
7	19,23	4,53	4245,03	3,88	57	5,99	2,24	2674,11	2,86
8	18,9	6,68	2829,34	5,96	58	12,35	4,56	2708,33	2,64
9	16,32	6,03	2706,47	5,04	59	7,06	1,9	3715,79	3,97
10	12,97	4,58	2831,88	2,59	60	9,53	2,38	4004,2	4,78
11	10,7	2,97	3602,69	3,75	61	10,72	3,67	2920,98	6,21
12	8,42	3,11	2707,4	9,21	62	10,3	3,85	2675,32	4,66

Окончание табл. 3

№ кус-ка	Масса, г	Объем, см ³	Плот-ность, кг/м ³	Кэф-фициент формы	№ кус-ка	Масса, г	Объем, см ³	Плот-ность, кг/м ³	Кэф-фициент формы
13	10,07	3,71	2714,29	4,32	63	9,72	3,71	2619,95	5,17
14	18,12	4,42	4099,55	4,87	64	5,73	1,4	4092,86	5,78
15	9,7	3,28	2957,32	2,98	65	8,7	3,25	2676,92	4,13
16	14,02	5,3	2645,28	7,21	66	8,29	2,34	3542,74	3,46
17	9,98	3,66	2726,78	4,7	67	8,09	3,02	2678,81	1,61
18	9,3	3,51	2649,57	4,28	68	8,61	1,89	4555,56	3,4
19	8,72	2,95	2955,93	3,27	69	10,74	3,99	2691,73	3,97
20	11,36	4,24	2679,25	4,48	70	9,42	3,52	2676,14	5,08
21	11,65	4,35	2678,16	3,68	72	14,65	5,27	2779,89	3,79
22	8,14	3,02	2695,36	4,54	73	6,32	2,34	2700,85	4,61
23	10,51	3,98	2640,7	3,09	74	12,05	3,96	3042,93	3,74
24	15,96	4,34	3677,42	4,28	75	8,77	2,93	2993,17	3,81
25	18,63	5,01	3718,56	4,59	76	12,54	4,78	2623,43	5,26
26	9,92	2,06	4815,53	12,75	77	5,62	1,92	2927,08	3,89
27	6,8	2,5	2720	3,34	78	8,28	2,92	2835,62	3,04
28	18,84	4,95	3806,06	4,88	79	10,22	2,4	4258,33	3,27
29	8,86	3,31	2676,74	4,14	80	8,46	1,92	4406,25	2,67
30	9,2	3,44	2674,42	5,38	81	13,31	4,54	2931,72	2,97
31	12,05	2,83	4257,95	4,13	82	6,09	2,28	2671,05	4,25
32	12,69	3,48	3646,55	10,04	83	4,36	1,5	2906,67	2,84
33	8,81	3,21	2744,55	2,33	84	7,72	2,61	2957,85	6,5
34	6,53	1,56	4185,9	5,11	85	8,64	3,17	2725,55	2,67
35	8,42	3,14	2681,53	6,43	86	6,73	2,52	2670,63	5,06
36	10,38	3,24	3203,7	8,17	87	5,01	1,88	2664,89	4,17
37	10,32	3,88	2659,79	2,67	88	11,57	3,65	3169,86	6,21
38	9,66	2,61	3701,15	4,74	89	8,12	3,05	2662,3	6,97
39	7,72	1,6	4825	9,9	90	11,03	4,11	2683,7	4
40	6,74	2,5	2696	5,2	91	15,49	4,19	3696,9	4,86
41	6,3	2,37	2658,23	8,41	92	9,39	2,44	3848,36	2,91
42	4,84	1,79	2703,91	5,14	94	7,96	2,75	2894,55	4,55
43	13,71	5,15	2662,14	4,73	95	7,12	2,41	2954,36	5,57
44	16,57	3,58	4628,49	5,83	96	4,82	1,84	2619,57	3,96
46	9,04	3,36	2690,48	4,25	97	3,25	1,2	2708,33	15,12
47	8,48	3,14	2700,64	2,5	98	5	1,17	4273,5	8,23
48	8,98	2,66	3375,94	5,05	99	5,63	1,25	4504	5,64
49	13,21	4,4	3002,27	4	100	8,15	3,07	2654,72	3,86
50	17,17	5,39	3185,53	5,82					

воздуха была собрана лабораторная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.

Куски руды подавали в загрузочный лоток 4, самотеком они скатывались в поток струи воздуха из воздуходувки 1.

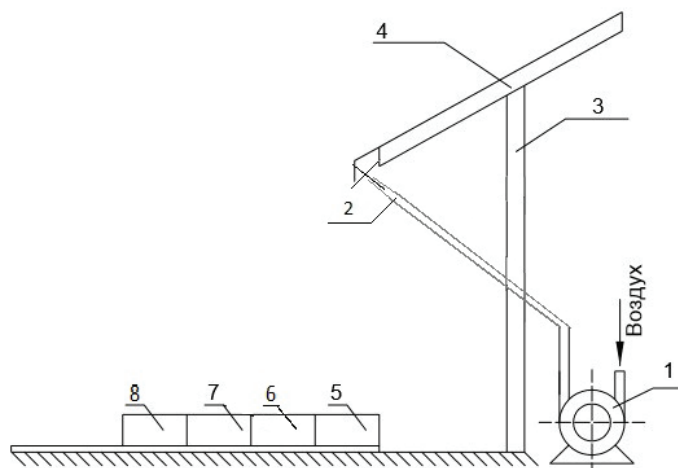


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки: 1 – воздуходувка; 2 – сопло; 3 – станина; 4 – загрузочный лоток; 5–8 – ячейки для приема продуктов разделения

Fig. 2. Schematic diagram of the laboratory setup: 1 – blower; 2 – nozzle; 3 – frame; 4 – loading tray; 5–8 – cells for receiving separation products

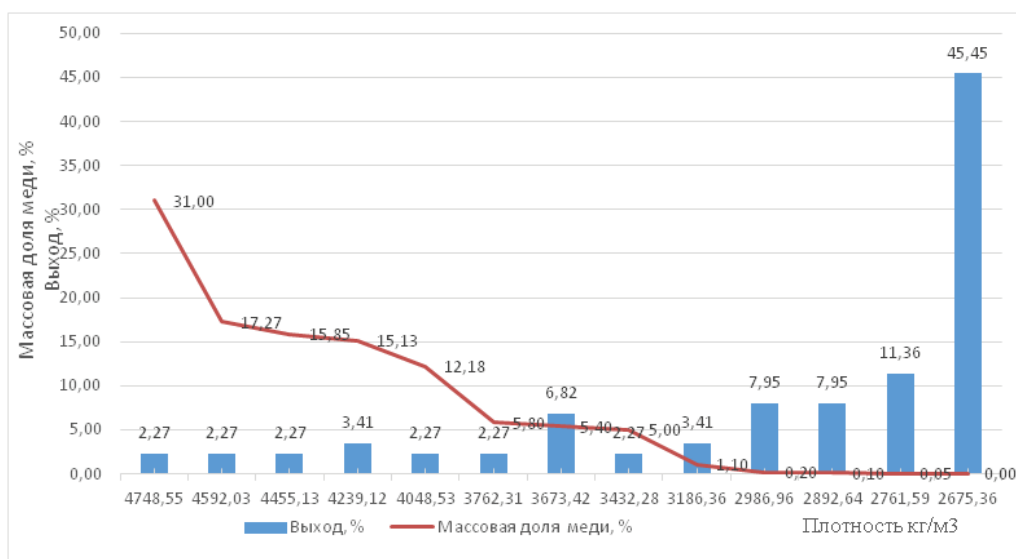


Рис. 3. Зависимости массовой доли меди и выхода от плотности

Fig. 3. Dependence of copper mass fraction and copper yield on density

Поток воздуха из сопла 2 был направлен под углом 90 градусов к вертикали, давление воздуха составляло 0,04 МПа. Высота падения кусков до ячейки приемного бункера составляла 400 мм [20].

При таком режиме работы пневматического сепаратора каждый из ста

кусков пропускался через поток воздуха 10 раз. При помощи линейки после прохождения куска через поток воздуха замерялось расстояние от начала координат до точки падения куска.

По полученным результатам построена зависимость массовой доли меди

Таблица 4

Результаты по конечным продуктам
Results for end products

Наименование продуктов	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
Концентрат	12,50	17,01	71,39
Промежуточный продукт	14,77	4,89	24,26
Хвосты	72,73	0,18	4,35
Итого:	100,00	2,98	100

и выхода к платности. Полученные результаты представлены в виде графика на рис. 3. Результаты по конечным продуктам представлена в табл. 4.

Обсуждение результатов

По зависимостям, которые представлены на рис. 1 можно определить, на какие узкие классы крупности необходимо разделить материал, чтобы получить эффективное разделение по плотности с использованием сухих гравитационных методов обогащения. Наглядно показано, что тяжелые частицы концентрата крупностью 10 мм будут делиться по плотности с частицами породы с отвальным содержанием меди крупностью 12,5 мм.

По зависимостям, которые представлены на рис. 3, можно определить зависимость массовой доли меди и выхода продукта от плотности. Например, материал плотностью от 2675 до 3200 кг/

м³ с выходом примерно 72,73% содержит пустую породу с массовой долей меди в нем 0,18%, а материал плотностью от 4048 до 4748 кг/м³ с выходом 12,5% — с массовой долей меди в нем 17,01%.

Заключение

Развитие и создание новых методов гравитационного пневматического обогащения дает возможности для обогащения различных видов минерального сырья и техногенных образований.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости использования узкой классификации материала для реализации сухого гравитационного разделения.

Установлена возможность получения кондиционного концентрата с выходом 12,5%, с массовой долей меди в нем 18% и отвальные хвосты с выходом 76%, с потерями меди 0,09%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Serhii Kharchenko, Yurii Borshch, Stepan Kovalyshyn, Mykhailo Piven, Magomed Abduev, Anna Miernik, Ernest Popardowski, Pawel Kielbasa. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct Appl. Sci. 2021, 11(10), 4383; <https://doi.org/10.3390/app11104383>.
2. Chalavadi G., Das A. Study of the mechanism of fine coal beneficiation in air table. Fuel. 2015, 154:207–216. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.063>.
3. Fu Z., Zhu J., Barghi S., Zhao Y., Luo Z., Duan Ch. Dry coal beneficiation by the semi-industrial air dense medium fluidized bed with binary mixtures of magnetite and fine coal particles. Fuel. 2019, 243:509–518. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.140>.
4. Mijat W., Tora B. Development of dry coal gravity separation techniques. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2018, 427(1):012003.

5. Sarkar B., Das A., Mehrotra S. P. Study of separation features in floatex density separator for cleaning fine coal. *Int J Miner Process.* 2008, 86(1-4):40-49. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.10.002>.

6. Yang Y., Ge L., He Y., Xie W., Ge Z. Mechanism and fine coal beneficiation of a pulsating airflow classifier. *Int J Coal Prep Util.* 2019, 39(1):20-32. <https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1288622>. 7. Морозов Ю. П., Завьялов С. С., Джурсаев 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.

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

9. 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.

10. Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Цыпин Е. Ф. О нижних границах классов крупности при предварительном обогащении руды с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — №11-1. — с. 328-337. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_328.

11. Адов В. А., Морозов В. В., Самдан Ганбат. Исследование и моделирование аэродинамического режима процесса пневматической сепарации угля // Горнодобывающая промышленность в 21 веке: вызовы и реальность «Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА». Мирный, 2021. — С. 140-141.

12. Меринов Н. Ф. Особенности пневматических методов обогащения // Известия вузов. Горный журнал / 2011, №4, С. 99-109.

13. Бауман А. В., Степаненко А. И., Степаненко А. А. Практические результаты и перспективы сухого обогащения руд и нерудных материалов методом пневмосепарации // Горный журнал. — 2020, № 3, С. 40-44. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.07.

14. Патент РФ № 2309804 С1 МПК В07В 4/00. Способ сухого обогащения бедной россыпной золотоносной руды : № 2006106577/03: заявл. 02.03.2006: опубл. 10.11.2007 / Б. А. Адамович, В. И. Дудов, А. Г. Б. Дербичев.

15. Лебедев И. Ф. Обогащение полезных ископаемых с использованием аппаратов пневмосепарации // Международный научно-исследовательский журнал. — 2019. — № 4-1(82). — С. 65-68. — DOI 10.23670/IRJ.2019.82.4.012.

16. Лебедев И. Ф. Технологические исследования свинцовых руд методом пневмосепарации. Материалы XXVII Международной научно-технической конференции. «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» 07-08 апреля 2022 г. Екатеринбург. 2018 — С. 228-233.

17. Kamil Stan'czyk, Andrzej Bajerski, Marian J. Łączny. Negative-pressure pneumatic separator: a new solution for hardcoal. *Beneficiation Int J Coal Sci Technol.* 2021. 8(1):103-123. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00345-w>.

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

19. Xuehu Zhong, Wei Liu, Junwei Han, Fen Jiao, Hailing Zhu, Wenqing Qin. Pneumatic separation for crushed spent lithium-ion batteries *Waste Management.* 2020. 118(37):331-340 DOI: 10.1016/j.wasman.2020.08.053.

20. Морозов Ю. П., Завьялов С. С., Волков П. С., Джуряев 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. **МИАЭ**

REFERENCES

1. 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 Ducts Appl. Sci. 2021, 11(10), 4383; <https://doi.org/10.3390/app11104383>.
2. Chalavadi G., Das A. Study of the mechanism of fine coal beneficiation in air table. Fuel. 2015, 154:207–216. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.063>.
3. Fu Z., Zhu J., Barghi S., Zhao Y., Luo Z., Duan Ch. Dry coal beneficiation by the semi-industrial air dense medium fluidized bed with binary mixtures of magnetite and fine coal particles. Fuel. 2019, 243:509–518. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.140>.
4. Mijał W., Tora B. Development of dry coal gravity separation techniques. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2018, 427(1):012003.
5. Sarkar B., Das A., Mehrotra S. P. Study of separation features in floatex density separator for cleaning fine coal. Int J Miner Process. 2008, 86(1–4):40–49. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.10.002>.
6. Yang Y., Ge L., He Y., Xie W., Ge Z. Mechanism and fine coal beneficiation of a pulsating airflow classifier. Int J Coal Prep Util. 2019, 39(1):20–32. <https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1288622>.
7. Morozov Y. P., Zavyalov S. S., Dzhuraev H. R. Study of separation of sulfide ore by the rate of whirling in an upward flow of air. Scientific and Technical Conference “Innovative technologies of mineral and technogenic raw materials enrichment”, in the framework of the VII Urals mining and industrial forum Ekaterinburg, 17–19 October 2017. С. 192–194.
8. Merinov N. F. Gravitational methods of enrichment. Lecture notes. Yekaterinburg 2005. 204 с. [In Russ].
9. Zavyalov S. S., Mamonov R. S. Mixed-type dry pretreatment technology for goldbearing ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11–1):338–345. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_338.
10. Ovchinnikova T. Yu., Efremova T. A., Tsylin E. F. Lower size grade limits in ore pretreatment using X-ray fluorescent separation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11–1):328–337. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_328.
11. Adov V. A., Morozov V. V., Samdan Ganbat. Research and modeling of the aerodynamic regime of the process of pneumatic separation of coal. Mining industry in the 21st century: challenges and reality “Collection of abstracts of the reports of the international scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of the Yakutniproalmaz Institute of AK ALROSA”. Mirny, 2021 p. 140–141. [In Russ].
12. Merinov N. F. Features of pneumatic methods of enrichment, *Izvestia of universities. Mining Journal.* 2011. no. 4. 2011. С. 99–109. [In Russ].
13. Bauman A. V., Stepanenko A. I., Stepanenko A. A. Practical results and prospects of dry beneficiation of ores and non-metallic materials by pneumatic separation. *Mining Journal*, 2020, no. 3. pp. 40–44. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.07. [In Russ].
14. Patent of the Russian Federation № 2309804 C1 IPC B07B4/00. Method of dry enrichment of poor placer gold-bearing ore : № 2006106577/03 : application. 02.03.2006 : publ. 10.11.2007 / B. A. Adamovich, V. I. Dudov, A. G. Derbichev [In Russ].
15. Lebedev I. F. Beneficiation of minerals using pneumoseparation apparatuses. *International Scientific Research Journal.* 2019. no. 4–1 (82). pp. 65–68. DOI 10.23670/IRJ.2019.82.4.012. [In Russ].

16. Lebedev I. F. Technological studies of lead ores by pneumoseparation. Proceedings of the XXVII International Scientific and Technical Conference. "Scientific bases and practice of processing of ores and technogenic raw materials". 07–08 April 2022 Ekaterinburg 2018 pp. 228–233.

17. Kamil Stan'czyk, Andrzej Bajerski, Marian J. Łączny. Negative-pressure pneumatic separator: a new solution for hardcoal. Beneficiation Int J Coal Sci Technol. 2021. 8(1):103–123. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00345-w>.

18. Zavyalov S. S., Safonova M. S. Study of dry gravity methods of preliminary enrichment of sulfide ores. Proceedings of XXIII International Scientific and Technical Conference. "Scientific bases and practice of processing of ores and technogenic raw materials" April 10–13, 2018. Ekaterinburg. 2018 pp. 398–401. [In Russ].

19. Xuehu Zhong, Wei Liu, Junwei Han, Fen Jiao, Hailing Zhu, Wenqing Qin. Pneumatic separation for crushed spent lithium-ion batteries Waste Management. 2020. 118(37):331–340 DOI: 10.1016/j.wasman.2020.08.053.

20. Morozov, Zavyalov S. S., Volkov P. S., Dzhuraev H. R. Study of dry gravity concentration of sulphide ore of Shatyrkul deposit. Materials of XXII International Scientific and Technical Conference. "Scientific bases and practice of processing of ores and technogenic raw materials", April 19–20, 2017. Yekaterinburg. 2017. pp. 151–153. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Завьялов Сергей Сергеевич*¹ – инженер-исследователь,

e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2947-0458;

*Мамонов Роман Сергеевич*¹ – инженер кафедры ОПИ,

e-mail: Mamonoff_npa@mail.ru

ORCID ID: 0000-0002-9371-1762,

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

Для контактов: *Завьялов Сергей Сергеевич*, e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Zavyalov S. S.*¹, Engineer-researcher,

e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2947-0458;

*Mamonov R. S.*¹, Engineer, Department mineral dressing,

e-mail: Mamonoff_npa@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9371-1762;

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Ural State Mining University», 30 Kuibyshev St., Ekaterinburg, Russia, 620144.

Получена редакцией 16.06.2022; получена после рецензии 14.09.2022; принята к печати 10.10.2022.

Received by the editors 16.06.2022; received after the review 14.09.2022; accepted for printing 10.10.2022.

