

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ В ВОСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА ХВОСТОВ ЧУРБАШСКИХ ШЛАМОХРАНИЛИЩ

Ю. П. Морозов¹, С. С. Завьялов¹, Р. С. Мамонов¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: В настоящее время большинство горнодобывающих предприятий черной металлургии работают в условиях истощения запасов железных руд. В то же время в результате обогащения железорудного сырья обогатительными фабриками образуется большое количество отходов, накопление которых приводит к формированию огромных по площади хвостохранилищ. В результате почти трехвековой деятельности Высокогорского железного рудника, а впоследствии и одноименного горно-обогатительного комбината объемы карьерных выемок составили 182,3 млн м³ на площади 384,2 га. Кроме этого, из землепользования выводятся обширные территории, отводимые под хвостохранилища. Однако содержание железа в хвостах достаточно высокое и пригодное для дообогащения, что объясняется рядом факторов: несовершенство существующей технологии обогащения, аварийные остановки оборудования, несовершенство или отсутствие схем утилизации и улавливания просыпей и продуктов промывов. Исследована возможность обогащения классов крупности от 0,1 мм до 0,05 мм искусственной смеси магнетита (20%) с кварцем (80%). Получен магнитный концентрат с массовой долей железа от 51,85 до 78,31%, при извлечении от 31,11 до 97,99%. Проведены исследования на Чурбашских шламохранилищах. Получены оптимальные результаты при предварительном восстановительном обжиге продолжительностью 60 минут, температура составляла 1150 °С, и в сепараторе восходящего потока воздуха с сухой магнитной сепарацией хвостов шламохранилищ. Получен магнитный продукт с массовой долей железа в нем 76,14, при извлечении в него железа 50,2%.

Ключевые слова: сухое обогащение, магнитная сепарация, пневматическая сепарация, железосодержащие хвосты, обогащение мелких классов крупности, новые процессы и аппараты, технология переработки, технологические показатели.

Для цитирования: Морозов Ю. П., Завьялов С. С., Мамонов Р. С. Исследование магнитной сепарации в восходящем потоке воздуха хвостов Чурбашских шламохранилищ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-1. – С. 82–92. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_82.

Study of magnetic separation in ascending air flow of Churbash slurry tailings

Y. P. Morozov¹, S. S. Zavyalov¹, R. S. Mamonov¹

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: At present, most mining enterprises of ferrous metallurgy operate in conditions of depletion of reserves of iron ores. At the same time, as a result of enrichment of iron ore raw

materials by enrichment plants a large amount of waste, the accumulation of which leads to the formation of huge tailings ponds. As a result of almost three centuries of activity of Vysokogorsky iron mine, and later the mining and processing plant with the same name, the volume of open pit excavations amounted to 182.3 million m³ in the area of 384.2 ha. In addition, vast territories, allocated for tailings, are withdrawn from land use. However, the iron content in the tailings is high enough and suitable for post-enrichment, which is explained by a number of factors: imperfections in the existing enrichment technology, emergency equipment shutdowns, imperfect or lack of schemes for utilization and capturing of slimes and promiscuous products. The possibility of enrichment of the 0.1–0.05 mm size classes of the artificial mixture of magnetite (20%) with quartz (80%) has been studied. Magnetic concentrate with the mass fraction of iron from 51.85 to 78.31% and recovery from 31.11 to 97.99% was obtained. Optimal results were obtained at 60-minute pretreatment roasting with the temperature of 1150 °C and in the ascending air flow separator with dry magnetic separation of tailings from the slurry. A magnetic product with a mass fraction of iron in it of 76.14, with an iron extraction of 50.2% was obtained.

Key words: dry enrichment, magnetic separation, pneumatic separation, iron-containing tailings, enrichment of small size classes, new processes and apparatuses, enrichment technology, technological indicators. mineral dressing.

For citation: Morozov Y. P., Zavyalov S. S., Mamonov R. S. Study of magnetic separation in ascending air flow of Churbash slurry tailings. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):82–92. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_82.

Введение

По данным Геологической службы США, в мире существует примерно 170 миллиардов тонн железной руды, что составляет 83 миллиарда тонн металлического железа, которое может быть извлечено. Большая часть этой железной руды распределяется между Австралией (29,4%), Россией (14,7%), Бразилией (13,5%) и Китаем (12,4%) [1]. Среди этих четырех стран по запасам Россия и Бразилия имеют более качественные сорта железа, в то время как Китай имеет более низкий сорт железа [1].

На фабриках для обогащения богатых железосодержащих руд применяют схемы с магнитной сепарацией, часто дополненные операциями тонкого грохочения или дешламации, а также — схемы с гравитационным и гравитационно-магнитным обогащением. Для обогащения бедных руд с тонкой вкрапленностью рудных минералов применяют только флотацию.

С экономической и экологической точек зрения магнитная сепарация

является наиболее эффективным методом извлечения оксидов железа, но она требует изменения магнитных свойств слабомагнитных железных минералов. Повышение магнитной восприимчивости гематитовых, сидеритовых или лимонитовых руд может быть достигнуто путем фазового превращения, вызванного обжигом, включая обжиг в шахтной печи, обжиг во вращающейся печи, обжиг в псевдоожиженном слое и обжиг с использованием микроволновой печи.

Хвосты Верхне- и Нижне-Чурбашского шламоохранилищ накопились в результате переработки железных руд на Камыш-Бурунском железорудном комбинате. В шламоохранилищах накоплено более 52 млн тонн хвостов с содержанием железа 32%. В результате изучения минерального состава пробы было установлено, что основная масса пробы сложена гидроксидами железа и агрегатами глинистых минералов и гидроксидов железа (лимонит) [1, 2].

В результате минераграфических исследований было установлено, что рудные минералы представлены преимущественно гидроксидами железа, реже — магнетитом и гематитом, в подчинённом количестве — пиритом.

Анализ мировых достижений в области переработки железосодержащего сырья показал, что для обогащения окисленных железных руд и хвостов обогащения основным методом переработки является флотационное обогащение, находят применение прямая и обратная флотация железа [3, 4]. Предпочтение отдается обратной катионной или анионной флотации с обесшламливанием, селективным диспергированием с обесшламливанием и флокуляцией. Железосодержащие хвосты Верхне- и Нижне-Чурбашского шламоохранилищ, сформированные более 100 лет назад, относятся к весьма труднообогащаемому сырью, вовлечение которого в переработку требует глубоких исследований по разработке экономически эффективной и экологически безопасной технологии [5].

Экспериментальные исследования

Исследования проводились на искусственной смеси с содержанием магнетита 20% и кварца 80%, представленной тремя классами крупности: $-0,1+0,071$; $-0,071+0,063$; $-0,063+0,05$ мм [6, 7].

Опыты осуществляли на установке, принципиальная схема которой приведена на рисунке.

С помощью воздуходувки 7 воздух засасывается в разделительную трубу 1, на которой расположены магнитные системы 3 и 4, исходное питание подается в зону восходящего потока [8, 9]. В трубе 1 происходит разделение материала за счет магнитного поля и различия в скоростях витания ($\vartheta_{\text{вит}}$) [10,

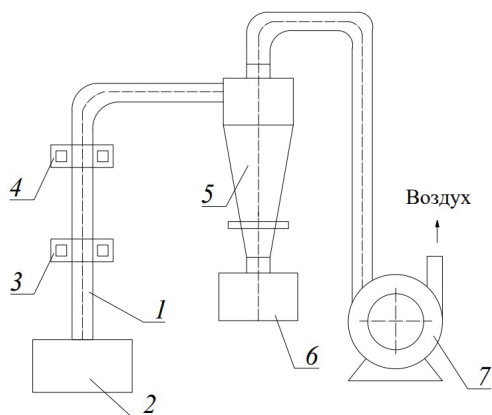


Рис. Принципиальная схема магнитного сепаратора с восходящим потоком воздуха: 1 — труба восходящего потока; 2 — контейнер; 3, 4 — магнитные системы; 5 — циклон для улавливания легкой фракции; 6 — бункер для легкой фракции; 7 — воздуходувка
Fig. Scheme of magnetic separator with upward air flow: 1 — upward flow pipe; 2 — container; 3, 4 — magnetic systems; 5 — cyclone to catch light fractions; 6 — hopper for light fractions; 7 — blower

11]. Неметаллические частицы с меньшим значением $\vartheta_{\text{вит}}$ в трубе 1 выносятся вверх, улавливаются в циклоне 5 и накапливаются в бункере 6. Неметаллические частицы с большим значением скорости витания выпадают из трубы 1, накапливаются в контейнере 2 и разгружаются [11, 12]. Металлические частицы за счет магнитного поля, создаваемого магнитными системами 3 и 4, накапливаются на стенках трубы 1 и в дальнейшем разгружаются в контейнер 2. В качестве переменного фактора в экспериментах принята скорость восходящего потока воздуха на входе в разделительную трубу 1 в диапазоне от 3,55 до 0,77 м/с [13, 14].

Магнитное поле в трубе восходящего потока составляло 0,36 Тесла.

На каждом классе крупности было проведено три параллельных опыта по разделению частиц с многократной

разгрузкой магнитной системы с разделением на магнитную, тяжелую и легкую фракции [15–17]. Оптимальные результаты представлены в табл. 1–3.

На данном режиме возможно получение железного концентрата с выходом 25,33%, массовой долей железа

в нем 78,31%, при извлечении железа в него 97,99%, и хвостов (легкая фракция) с выходом 76,67% с массовой долей железа в них 0,54%, при потерях железа 2,01%.

На данном режиме возможно получение железного концентрата с выходом 29,62%,

Таблица 1

Результаты гравитационно-магнитной сепарации класса крупности $-0,1+0,071$ мм, при скорости восходящего потока воздуха $0,97$ м/с

Results of gravity-magnetic separation of particle size class $-0.1+0.071$ mm, at ascending air flow rate of 0.97 m/s

Наименование продукта	Выход кварца, %	Выход магнетита, %	Суммарный выход, %	Массовая доля магнетита, %	Извлечение магнетита, %
Магнитная фракция	6,89	97,99	25,33	78,31	97,99
Немагнитная фракция	93,11	2,01	74,67	0,54	2,01
Итого	100,00	100,00	100,00	20,24	100,00

Таблица 2

Результаты гравитационно-магнитной сепарации класса крупности $-0,071+0,063$ мм, при скорости восходящего потока воздуха $0,97$ м/с

Results of gravity-magnetic separation of particle size class $-0.071+0.063$ mm, at ascending air flow rate of 0.97 m/s

Наименование продукта	Выход кварца, %	Выход магнетита, %	Суммарный выход, %	Массовая доля магнетита, %	Извлечение магнетита, %
Магнитная фракция	9,09	91,89	29,62	76,92	91,89
Немагнитная фракция	90,91	8,11	70,38	2,86	8,11
Итого	100,00	100,00	100,00	24,80	100,00

Таблица 3

Результаты гравитационно-магнитной сепарации класса крупности $-0,063+0,05$ мм, при скорости восходящего потока воздуха $2,27$ м/с

Results of gravity-magnetic separation of particle size class $-0.063+0.05$ mm, at ascending air flow rate of 2.27 m/s

Наименование продукта	Выход кварца, %	Выход магнетита, %	Суммарный выход, %	Массовая доля магнетита, %	Извлечение магнетита, %
Магнитная фракция	7,33	31,11	12,15	51,85	31,11
Немагнитная фракция	92,67	68,89	87,85	15,88	68,89
Итого	100,00	100,00	100,00	20,25	100,00

массовой долей железа в нем 76,92%, при извлечении железа в него 91,89%, и хвостов (легкая фракция) с выходом 70,38% с массовой долей железа в них 2,86%, при потерях железа 8,11%.

На данном режиме возможно получение железного концентрата с выходом 12,15%, массовой долей железа в нем 51,58%, при извлечении железа в него 31,11%, и хвостов (легкая фракция) с выходом 87,85% с массовой долей железа в них 15,88%, при потерях железа 68,89%.

В целом, экспериментальные исследования на искусственной смеси показали высокую эффективность работы предложенного магнитного сепаратора.

Результаты

Обжиг хвостов осуществляли в муфельной печи (Nabertherm more than heat 30–3000 °С) при температурах от 1000 °С до 1200 °С. Время выдержки продукта в муфельной печи составляло от 60 до 100 минут.

Проведены опыты по разделению частиц обожжённого продукта класса крупности --0,05 мм на фракции: магнитные продукты 1, 2, 3, тяжелая и легкая фракции [18–20]. Полученные фракции анализировали на рентгенофлуоресцентном анализаторе. Полученные результаты представлены в табл. 4–8.

Таблица 4

Результаты гравитационно-магнитной сепарации на обожжённом продукте при температуре 1150 °С с выдержкой 60 минут

Results of gravity-magnetic separation on the annealed product at 1150 °С with an exposure time of 60 minutes

Наименование продукта	Скорость потока воздуха, м/с	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение, %
Магнитный продукт 1	3,55	18,51	74,30	48,78
Магнитный продукт 2	2,42	3,77	75,00	10,02
Магнитный продукт 3	0,77	2,28	51,48	4,16
Итого	–	24,56	72,29	62,96
Тяжелая фракция	0,77	28,39	26,30	26,48
Легкая фракция	0,77	47,05	6,33	10,56
Итого	–	100,00	28,20	100,00

Таблица 5

Результаты гравитационно-магнитной сепарации на обожжённом продукте при температуре 1100 °С с выдержкой 60 минут

Results of gravity-magnetic separation on the annealed product at 1100 °С with an exposure time of 60 minutes

Наименование продукта	Скорость потока воздуха, м/с	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение, %
Магнитный продукт 1	3,55	2,88	80,30	8,20
Магнитный продукт 2	2,33	7,23	79,80	20,45
Магнитный продукт 3	0,92	5,46	60,50	11,72
Итого	–	15,57	73,12	40,37
Тяжелая фракция	0,92	42,69	28,92	43,78
Легкая фракция	0,92	41,74	10,71	15,85
Итого	–	100,00	28,20	100,0

Таблица 6

Результаты гравитационно-магнитной сепарации на обожжённом продукте при температуре 1100 °С с выдержкой 90 минут

Results of gravity-magnetic separation on the fired product at 1100 °C with a holding time of 90 minutes

Наименование продукта	Скорость потока воздуха, м/с	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение, %
Магнитный продукт 1	3,41	2,76	78,10	7,63
Магнитный продукт 2	2,27	5,59	79,00	15,65
Магнитный продукт 3	1,03	6,96	59,70	14,73
Итого	–	15,30	70,06	38,01
Тяжелая фракция	1,03	34,71	30,63	37,70
Легкая фракция	1,03	49,99	13,70	24,29
Итого	–	100,00	28,20	100,00

Таблица 7

Результаты гравитационно-магнитной сепарации на обожжённом продукте при температуре 1100 °С с выдержкой 100 минут

Results of gravity-magnetic separation on the annealed product at 1100 °C with an exposure time of 100 minutes

Наименование продукта	Скорость потока воздуха, м/с	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение, %
Магнитный продукт 1	3,33	2,54	78,02	7,03
Магнитный продукт 2	2,36	6,25	78,40	17,37
Магнитный продукт 3	0,94	6,05	58,30	12,50
Итого	–	14,84	70,14	36,90
Тяжелая фракция	0,94	38,33	29,20	39,69
Легкая фракция	0,94	46,83	14,10	23,41
Итого	–	100,00	28,20	100,00

Таблица 8

Результаты магнитной сепарации с двумя магнитными системами обожженного продукта при температуре 1150 °С с выдержкой 60 минут

Results of magnetic separation with two magnetic systems of the annealed product at 1150 °C with a holding time of 60 minutes

Наименование продукта	Скорость потока воздуха, м/с	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение, %
Магнитный продукт 1	3,41	10,58	78,23	29,35
Магнитный продукт 2	2,36	7,01	76,47	19,01
Магнитный продукт 3	0,83	1,00	51,89	1,84
Итого	–	18,59	76,15	50,20
Тяжелая фракция	0,83	27,53	23,85	23,28
Легкая фракция	0,83	53,88	13,88	26,52
Итого	–	100,00	28,20	100,00

При данном режиме возможно получение железного концентрата с выходом 24,56%, массовой долей железа в нем 72,29%, при извлечении железа в него 62,69%, и промежуточного продукта (тяжелая фракция) с выходом 28,39% с массовой долей железа в нем 26,3%, при извлечении железа в него 26,48%.

Хвосты (легкая фракция) при выходе 47,05% содержат 6,33% железа при потерях железа 10,56%.

При данном режиме возможно получение железного концентрата с выходом 15,57%, массовой долей железа в нем 73,12%, при извлечении железа в него 40,37%, и промежуточного продукта (тяжелая фракция) с выходом 42,69% с массовой долей железа в нем 28,92%, при извлечении железа в него 43,78%.

Хвосты (легкая фракция) при выходе 41,74% содержат 10,71% железа при потерях железа 15,85%.

При данном режиме возможно получение железного концентрата с выходом 15,30%, массовой долей железа в нем 70,06%, при извлечении железа в него 38,01%, и промежуточного продукта (тяжелая фракция) с выходом 34,71% с массовой долей железа в нем 30,63%, при извлечении железа в него 37,7%.

Хвосты (легкая фракция) при выходе 49,99% содержат 13,70% железа при потерях железа 24,29%.

При данном режиме возможно получение железного концентрата с выходом 14,84%, массовой долей железа в нем 70,14%, при извлечении железа в него 36,9%, и промежуточного продукта (тяжелая фракция) с выходом 38,33% с массовой долей железа в нем 29,2%, при извлечении железа в него 39,69%.

Хвосты (легкая фракция) при выходе 46,83% содержат 14,1% железа при потерях железа 23,41%.

При данном режиме возможно получение железного концентрата с выходом 18,59%, массовой долей железа в нем 76,15%, при извлечении железа в него 50,2%, и промежуточного продукта (тяжелая фракция) с выходом 27,53% с массовой долей железа в нем 23,85%, при извлечении железа в него 23,28%.

Хвосты (легкая фракция) при выходе 53,88% содержат 13,88% железа при потерях железа 26,52%.

Обсуждение результатов

При обжиге 1150 °С продолжительностью 60 минут и в сепараторе восходящего потока воздуха с сухой магнитной сепарацией хвостов шламохранилищ возможно получение магнитной фракции с выходом 24,56% при извлечении железа 62,69%, промежуточного продукта с выходом 28,39% при извлечении железа 26,48% и легкой фракции с выходом 47,05% при потерях железа 10,56%.

При обжиге 1100 °С продолжительностью 60 минут и в сепараторе восходящего потока воздуха с сухой магнитной сепарацией хвостов шламохранилищ возможно получение магнитной фракции с выходом 15,57% при извлечении железа 40,37%, промежуточного продукта с выходом 42,69% при извлечении железа 43,78% и легкой фракции с выходом 41,74% при потерях железа 15,85%.

При обжиге 1100 °С продолжительностью 90 минут и в сепараторе восходящего потока воздуха с сухой магнитной сепарацией исходного продукта возможно получение магнитной фракции с выходом 15,30% при извлечении железа 38,01%, промежуточного продукта с выходом 34,71% при извлечении железа 37,7% и легкой фракции с выходом 49,99% при потерях железа 24,29%.

При обжиге 1100 °С продолжительностью 100 минут и в сепараторе восходящего потока воздуха с сухой магнитной сепарацией хвостов шламохранилищ возможно получение магнитной фракции с выходом 14,84% при извлечении железа 36,90%, промежуточного продукта с выходом 38,33% при извлечении железа 39,69% и легкой фракции с выходом 46,83% при потерях железа 23,41%.

При обжиге 1150 °С продолжительностью 60 минут и в сепараторе восходящего потока воздуха с сухой магнитной сепарацией с двумя магнитными системами хвостов шламохранилищ возможно получение магнитной фракции с выходом 18,59% при извлечении железа 50,2%, промежуточного продукта с выходом 27,53% при извлечении железа 23,28% и легкой фракции с выходом 53,88% при потерях железа 26,52%.

Установлено, что оптимальными условиями металлизирующего обжига являются температура 1150 °С, продолжительность 60 минут.

Заключение

Железосодержащие хвосты Верхне- и Нижне-Чурбашского шламохранилищ, сформированные более 100 лет назад, относятся к весьма труднообогатимому сырью, вовлечение которого

в переработку требует глубоких исследований и разработки экономически эффективной и экологически безопасной технологии.

В настоящей работе выполнено совершенствование технологии магнитной сепарации Чурбашских шламохранилищ. Предложен гравитационно-магнитный сепаратор с восходящим потоком воздуха.

Установлено, что более высокие показатели достигаются при металлизирующем обжиге: температура 1150 °С, продолжительность 60 минут.

Экспериментальные исследования гравитационно-магнитной сепарации обожженных железосодержащих хвостов с массовой долей 28,2% показали возможность получения железного концентрата с массовой долей железа в нем 72,29% при извлечении в него 62,96%.

Вклад авторов

Морозов Ю. П. — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Завьялов С. С. — проведение экспериментов, получение данных для анализа, написание текста статьи.

Мамонов Р. С. — проведение экспериментов, получение данных для анализа, написание текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tang Z., Gao P., Sun Y., Han Y., Li E., Chen J., Zhang Y. Studies on the fluidization performance of a novel fluidized bed reactor for iron ore suspension roasting // *Powder Technology*. 2020, pp. 649–657. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.092.

2. Xudong Li, Yubua Wang, Dongfang Lu, Xiayu Zheng. Influence of Separation Angle on the Dry Pneumatic Magnetic Separation // *Minerals*. 2022, vol. 12(10), p. 1192. DOI: 10.3390/min12101192.

3. Fedorov S. A., Yakimov T. S., Kalgin V. Yu. Noble metals in metasomatites of the Kirchenovskoye deposit (East Transbaikalia) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, no. 666 (4), pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042016.

4. Амдур А. М., Павлов В. В., Федоров С. А. Флотация дисперсных капель золота и штейна в расплавах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3–1. — С. 411–421. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-411-421.

5. Kamil Stan ́czyk, Andrzej Bajerski, Marian J. Łaczny. Negative-pressure pneumatic separator: a new solution for hardcoal // International Journal of Coal Science & Technology. 2021, vol. 8(1), pp. 103–123. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00345-w>.

6. Serhii Kharchenko, Yurii Borshch, Stepan Kovalyshyn, Mykhailo Piven, Magomed Abduev, Anna Miernik, Ernest Popardowski, Paweł Kielbasa. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct // Special Issue “Applied Electromagnetism in Modern Engineering and Medical Technologies» Appl. Sci. 2021, vol. 11(10), 4383; <https://doi.org/10.3390/app11104383>.

7. Завьялов С. С., Мамонов Р. С. Комбинированная технология сухого предварительного обогащения золотосодержащей руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) — 2021. — №11–1. — С. 338–345. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_338.

8. Chalavadi G., Das A. Study of the mechanism of fine coal beneficiation in air table // Fuel. 2015, vol. 154, no. 15, pp. 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.063>.

9. 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, vol. 243, no. 1, pp. 509–518. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.140>.

10. Mijat W., Tora B. Development of dry coal gravity separation techniques // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Fuel. 2018, vol. 52, no. 17, 427 012003. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/427/1/012003>.

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

12. Yang Y., Ge L., He Y., Xie W., Ge Z. Mechanism and fine coal beneficiation of a pulsating airflow classifier // International Journal of Coal Preparation and Utilization Published. 2017, pp. 20–32. <https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1288622>.

13. 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. — 2022. — С. 228–233.

14. Меринов Н. Ф. Особенности пневматических методов обогащения // Известия вузов. Горный журнал. — 2011. — № 4. — С. 99–109.

15. 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 (научно-технический журнал). — 2021. — № 11–1. — С. 328–337. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_328.

16. Соболев А. А., Мельников Н. А., Тютюнник Л. О. Движение частиц в воздушном потоке // Вектор науки ТГУ (Тольяттинский государственный университет). — 2011. — № 3 (17). — С. 82–86.

17. Kotov Boris, Stepanenko Sergey, Grushetsky Sergey, Grishchenko Vladimir. Modeling the process of grain separation by density in a combined vibro-pneumatic and air-gravity unit // Engineering and Technology. 2022. — № 3. — С. 106–116. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3

18. 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.

19. Xudong Li, Yuhua Wang, Dongfang Lu, Xuesong Gao, Optimization of Airflow Field for Pneumatic Drum Magnetic Separator to Improve the Separation Efficiency // *Minerals*. 2021, vol. 11(11), 1228. DOI: 10.3390/min11111228.

20. Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Овчинникова Т. Ю., Елизаров Д. Б. Влияние фракционирования по крупности на эффективность рентгенорадиометрической сепарации полиметаллической руды // *Обогащение руд.* – 2018. – № 3. – С. 14–19. **ИДБ**

REFERENCES

1. Tang Z., Gao P., Sun Y., Han Y., Li E., Chen J., Zhang Y. Studies on the fluidization performance of a novel fluidized bed reactor for iron ore suspension roasting. *Powder Technology*. 2020, pp. 649–657. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.092.

2. Xudong Li, Yuhua Wang, Dongfang Lu, Xiayu Zheng. Influence of Separation Angle on the Dry Pneumatic Magnetic Separation. *Minerals*. 2022, vol. 12(10), p. 1192. DOI: 10.3390/min12101192.

3. Fedorov S. A., Yakimov T. S., Kalgin V. Yu. Noble metals in metasomatites of the Kirchenovskoye deposit (East Transbaikalia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, no. 666 (4), pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042016.

4. Amdur A. M., Pavlov V. V., Fedorov S. A. Flotation of dispersed gold droplets and high-grade matte in melts. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2020, no. 3–1, pp. 411–421. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-411-421.

5. Kamil Stan'czyk, Andrzej Bajerski, Marian J. Łaczny. Negative-pressure pneumatic separator: a new solution for hardcoal. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2021, vol. 8(1), pp. 103–123. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00345-w>.

6. 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. *Special Issue "Applied Electromagnetism in Modern Engineering and Medical Technologies" Appl. Sci.* 2021, vol. 11(10), 4383; <https://doi.org/10.3390/app11104383>.

7. Zavyalov S. S., Mamonov R. S. Combined technology of dry pre-enrichment of gold-bearing ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11–1. pp. 338–345. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_338.

8. Chalavadi G., Das A. Study of the mechanism of fine coal beneficiation in air table. *Fuel*. 2015, vol. 154, no. 15, pp. 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.063>.

9. 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, vol. 243, no. 1, pp. 509–518. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.140>.

10. Mijał W., Tora B. Development of dry coal gravity separation techniques. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Fuel*. 2018, vol. 52, no. 17, 427 012003. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/427/1/012003>.

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

12. Yang Y., Ge L., He Y., Xie W., Ge Z. Mechanism and fine coal beneficiation of a pulsating airflow classifier // *International Journal of Coal Preparation and Utilization* Published. 2017, pp. 20–32. <https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1288622>.

13. Lebedev I. F. Technological studies of lead ores by pneumoseparation. *Proceedings of XXVII International Scientific and Technical Conference. "Scientific bases and practice of processing of ores and technogenic raw materials" 07–08 April 2022 Ekaterinburg*. 2022, pp. 228–233. [In Russ].

14. Merinov N. F. Features of pneumatic methods of enrichment. *Izvestiya vuzov. Mining Journal*. 2011, no. 4, pp. 99–109. [In Russ].

15. Ovchinnikova T. Y., Efremova T. A., Tsy-pin E. F. On the lower limits of the size classes at the preliminary concentration of ore using X-ray fluorescent separation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11–1, pp. 328–337. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_328.

16. Sobolev A. A., Melnikov H. A., Tyutyunnik L. O. Movement of particles in an air stream. *Vector of Science TSU (Togliatti State University)*. 2011, no. 3 (17), pp. 82–86. [In Russ].

17. Kotov Boris, Stepanenko Sergey, Grushetsky Sergey, Grishchenko Vladimir. Modeling the process of grain separation by density in a combined vibro-pneumatic and air-gravity unit. *Engineering and Technology*. 2022, no. 3. pp. 106–116. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3.

18. Bauman A. V., Stepanenko A. I., Stepanenko A. A. Practical results and prospects of dry enrichment of ores and nonmetallic materials by pneumatic separation. *Mining Journal*. 2020, no. 3, pp. 40–44. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.07.

19. Xudong Li, Yuhua Wang, Dongfang Lu, Xuesong Gao. Optimization of Airflow Field for Pneumatic Drum Magnetic Separator to Improve the Separation Efficiency. *Minerals*. 2021, vol. 11(11), 1228. DOI:10.3390/min11111228.

20. Tsy-pin E. F., Efremova T. A., Ovchinnikova T. Yu., Elizarov D. B. Effect of fractionation by size on the efficiency of X-ray radiometric separation of polymetallic ore. *Ore Enrichment*. 2018, no. 3, pp. 14–19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Морозов Юрий Петрович — докт. тех. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, e-mail: tails2002@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-0554-5176;

Завьялов Сергей Сергеевич — инженер-исследователь, м.н.с НИЛРНЗиТО, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30; e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0002-2947-0458;

Мамонов Роман Сергеевич — инженер кафедры ОПИ, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30; e-mail: Mamonoff_npa@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9371-1762;

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Morozov Yu. P., Dr. Sci. (Eng.), professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, Russia, 620144, Yekaterinburg, st. Kuibysheva, 30, e-mail: tails2002@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-0554-5176;

Zavyalov S. S., Engineer-researcher, Junior Research Associate at NILRNZiTO, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Ural State Mining University», 30 Kuibyshev St., Ekaterinburg, Russia, 620144, e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0002-2947-0458;

Mamonov R. S., engineer, Department mineral dressing, «Ural State Mining University», 30 Kuibyshev St., Ekaterinburg, Russia, 620144, e-mail: Mamonoff_npa@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9371-1762

For contacts: *Zavyalov S. S.*, e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 02.10.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 02.10.2023; accepted for printing 10.11.2023.