

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ В СХЕМЕ ПОДГОТОВКИ ПРОБ, СОДЕРЖАЩИХ НЕДРОБИМЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

П. С. Волков

Уральский Государственный Горный Университет, Екатеринбург, 620144, Россия,
PavelVolkov@m.ursmu.ru

Аннотация: Проведение опробования на рудах и продуктах с невысокой массовой долей ценного компонента, представленного благородными металлами, имеет определенные сложности из-за неравномерного распределения благородного металла в продукте и уменьшения размеров частиц металла при подготовке таких проб к анализу (дроблении и сокращении). Относительная случайная погрешность определения может быть большой, и это приводит к расхождению результатов параллельных анализов. Изменение схемы подготовки проб, а именно введение операции выделения металла в отдельный продукт, отдельный анализ полученных продуктов и расчет массовой доли определяемого металла по уравнению баланса позволяет проводить параллельные анализы проб, содержащие благородные металлы, с удовлетворительной сходимостью. Основными методами, применяемыми в настоящее время для выделения свободного золота при подготовке пробы к анализу в лабораториях, является гравитационное концентрирование и скрин-анализ (выделение крупных золотин на сите). В статье рассмотрен альтернативный способ выделения металла пневматической сепарацией. Выделение проведено на модельном материале, состоящем из кварца и свинца. Проведенные эксперименты показали возможность применения пневматической сепарации взамен традиционно используемых методов выделения благородного металла.

Ключевые слова: Подготовка проб к анализу, недробимые включения, благородные металлы, пневматическая сепарация, обогащение в стадиях подготовки проб к анализу, скрин-анализ, гравитационное обогащение, гранулометрическая характеристика.

Для цитирования: Волков П. С. Возможности использования пневматической сепарации в схеме подготовки проб, содержащих недробимые включения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1-1. – С. 128–139. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_128.

Possibilities of using pneumatic separation in the scheme of preparation of samples containing individual inclusions

P. S. Volkov

Ural State Mining University (USGU), Yekaterinburg, Russia

Abstract: Carrying out of sampling on ores and products with not high mass fraction of the valuable component represented by precious metals has certain difficulties. Due to the uneven

distribution of precious metal in the product and the complexity of reducing the size of metal particles in the preparation of such samples for analysis (crushing and reduction), the relative random error of determination can be large and it leads to discrepancies in the results of parallel analyses. Changing the scheme of sample preparation, namely the introduction of metal extraction into a separate product, separate analysis of the products and the calculation of the mass fraction of the determined metal by the balance equation allows you to conduct parallel analyses of samples containing precious metals with satisfactory convergence. The main methods used for the extraction of free gold, the preparation of the sample for analysis used in laboratories is the gravitational concentration and screen-analysis (separation of large gold on a sieve). This article considers an alternative method of separation of the metal by pneumatic separation. Extraction was carried out on a model material consisting of quartz and lead. The experiments showed the possibility of using pneumatic separation to replace the traditionally used methods of extraction of precious metal.

Key words: Sample preparation for analysis, indestructible inclusions, precious metals, pneumatic separation, enrichment at the stages of sample preparation for analysis, screen analysis, gravity enrichment, particle size distributio.

For citation: Volkov P. S. Possibilities of using pneumatic separation in the scheme of preparation of samples containing individual inclusions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1-1):128–139. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_128.

Введение

Стандартная схема подготовки проб выглядит следующим образом. Исходная проба измельчается и сокращается, чтобы в результате получить навеску для анализа. В результате на навеске проводится анализ и выдается результат. Но такой подход, а именно определение качества исходной руды и продуктов её обогащения, содержащих благородные металлы [1–4], не всегда может быть применен. Это связано с определенными проблемами [5–7]:

– относительная случайная погрешность при отборе проб от продуктов, имеющих малую массовую долю определяемого компонента, получает достаточно большие значения;

– маленькая массовая доля характеризуется малым количеством частиц, включающих контролируемый компонент, в данном случае основной вклад в погрешность, возникающую при опробовании такого продукта, вносит вероятная систематическая погрешность, она при неблагоприятном стечении факторов может достигать 100%

(допустим, при отборе и подготовке навески для анализа, крупные частички золота не будут обобраны, такая же ситуация будет наблюдаться при подготовке проб от шлаков, содержащих застывшие капли меди и т.п.).

При изучении данной проблемы выясняется, что неравномерное распределение контролируемого компонента при отборе и сокращении пробы не позволяет её подготовить так, чтобы она соответствовала по массовой доле поступающему на опробование продукту (возникает эффект самородка) [7].

Достигнуть уменьшения погрешности, а именно снизить значения возникающих в данном случае случайной и вероятной систематической погрешностей, можно с помощью добавления в операции подготовки пробы для анализа операции выделения анализируемого компонента в отдельный продукт. Данный способ позволяет получить продукт с высокой массовой долей контролируемого компонента и далее проводить его анализ с низкими зна-

чениями погрешностей, также способ позволяет подготавливать пробы к анализу от достаточно больших по массе проб [8–11].

Методы

В настоящее время из используемых на практике способов концентрирования определяемого компонента применяют скрин-анализ и гравитационное концентрирование [6, 7].

Метод скрин-анализа заключается в том, что при подготовке пробы к анализу крупные частицы металла отсеиваются на сите в отдельный продукт, далее отдельно проводят анализ полученных продуктов. По полученным в результате анализа данным расчетным путём определяют массовую долю в опробуемом продукте. Для расчета используют формулу:

$$\beta_p = \frac{\gamma_n \beta_n + \gamma_n \beta_n}{100}, \quad (1)$$

где γ_n – выход продукта, оставшегося на сите, %; β_n – массовая доля металла в продукте, оставшемся на сите, г/т; γ_n – выход продукта, прошедшего сквозь сито, %; β_n – массовая доля металла в прошедшем сквозь сито продукте, г/т; β_p – рассчитанная массовая доля металла в исходной, поступающей на рассев, пробе, г/т.

Подготовка пробы с использованием гравитационного концентрирования заключается в том, что продукт, поступающий на анализ, подвергают гравитационному обогащению (концентрационный стол, центробежная сепарация), в результате извлекают крупные частички металла и частично тонкие частички металла, и далее полученные продукты (концентрат и хвосты) отправляют на анализ. Массовую долю в исходной поступающей на анализ пробе определяют расчетным путем по формуле:

$$\beta_z = \frac{\gamma_k \beta_k + \gamma_x \beta_x}{100}, \quad (2)$$

где γ_k – выход выделенного тяжелого продукта (концентрат), %; β_k – массовая доля металла в тяжелом продукте (концентрате), г/т; γ_x – выход выделенного легкого продукта (хвостов), %; β_x – массовая доля металла в легком продукте (хвостах), г/т; β_z – рассчитанная массовая доля металла в исходной пробе, поступающей на гравитационное обогащение, г/т.

Снижение относительной погрешности при использовании в схемах подготовки проб операции концентрирования ценного компонента позволяет предложить к рассмотрению применение новых, более перспективных способов обогащения, которые позволят добиться высокой степени извлечения контролируемого металла [12–15].

В данной статье рассмотрена технология «сухого» обогащения, которая за последние годы продвинулась в повышении качества выделяемых продуктов [16–18]. Главными преимуществами метода по сравнению с гравитационным методом является то, что в процессе обогащения не используется вода, соответственно, в результате обогащения получают сухие продукты, которые нет необходимости сушить после проведения разделения, тем самым дальнейший анализ продуктов упрощается. Если сравнивать со скрин-анализом, то у метода тоже есть преимущество – на скрин-анализ обычно поступает проба массой 0,5–1 кг, которая для некоторых продуктов, поступающих на подготовку к анализу, является малой [19, 20].

В прошлом столетии различными учеными делались попытки сконструировать аппарат, позволяющий использовать различными способами силу воздушных потоков для разделе-

ния минералов. На начальном этапе предложенные варианты не позволяли добиваться высокой эффективности при разделении и приводили к большим потерям полезных компонентов.

Со временем технология совершенствовалась, и на данный момент позволяет рассматривать её для выделения металла при проведении анализа проб [21]. Для этого проведем опыты по обогащению на установке с восходящим потоком воздуха. Опыты будем проводить на модельном материале, состоящем из кварца и свинца.

Результаты

Для подготовки пробы необходимо рассчитать крупность равнопадающих

частиц кварца и свинца и классифицировать материал по крупности. Расчет конечных скоростей падения v_0 выполнен по формуле Риттингера для одинаковых зерен кварца и свинца [13, 19]:

$$v_0 = 4,6\sqrt{d(\delta - \Delta)}, \quad (1)$$

где d — диаметр частиц, м; Δ — плотность воздуха, кг/м³; δ — плотность минерала, кг/м³.

При подготовке проб к анализу материал измельчается до крупности 0,1 мм, крупные частицы металла из-за ковкости не могут быть нормально подготовлены к анализу. Так как крупных частиц небольшое количество, то их наличие приводит к повышению относительной погрешности. Соответ-

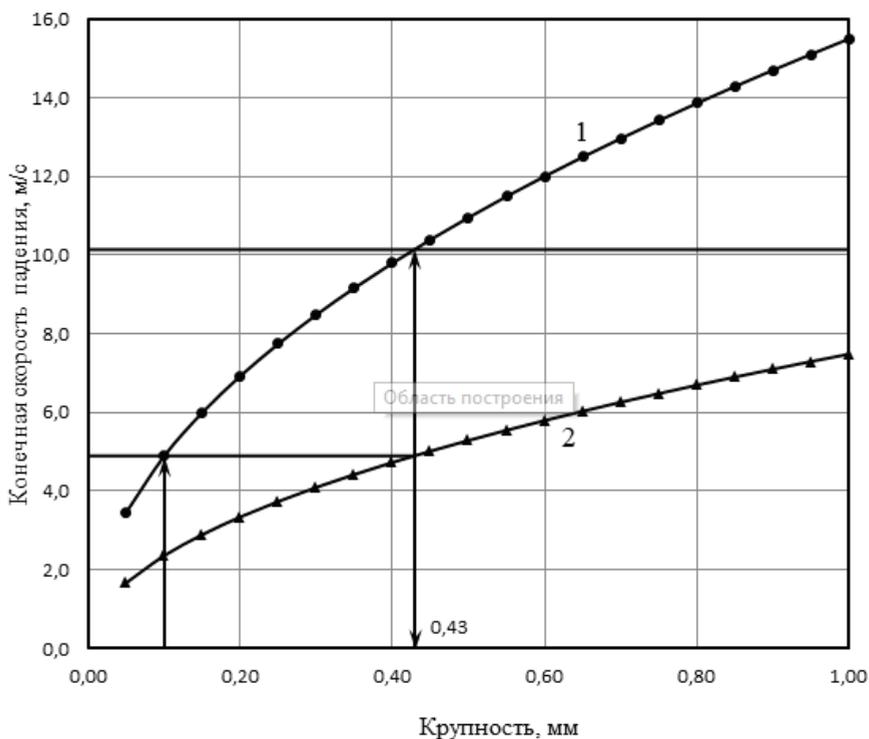


Рис. 1. Расчет конечных скоростей падения для кварца и свинца по формуле Риттингера (1 — свинец, 2 — кварц)

Fig. 1. Calculation of finite incidence rates for quartz and lead according to the Rittinger formula (1 — lead, 2 — quartz)

ственно, будем рассматривать возможность выделения крупинки крупностью более 0,1 мм. Исходя из этого, будем определять размер равнопадающей частицы «легкого», считая, что тяжелая частица будет размером 0,1 мм.

По приведенной выше формуле произведен расчет для пары минералов (кварц и свинец), полученные результаты расчетов отображены графически на рис. 1.

В соответствии с расчетом и техническими возможностями для практического обоснования процесса на кафедре ОПИ УГГУ изготовлен лабораторный пневматический сепаратор, установка состоит из трубы соединенной с циклоном для отделения легкого продукта, схема используемой лабораторной установки представлена на рис. 2. Установка позволяет регулировать скорость восходящего потока в трубе от 0 до 20 м/с.

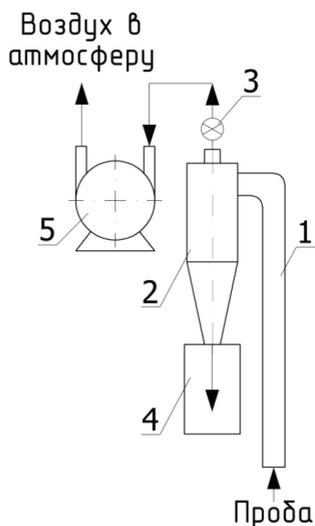


Рис. 2. Схема используемой лабораторной установки: 1 – труба; 2 – циклон; 3 – задвижка для регулировки скорости воздуха; 4 – приемник для легкого продукта; 5 – вентилятор

Fig. 2. Diagram of the laboratory setup used: 1 – pipe; 2 – cyclone; 3 – air speed gate valve; 4 – receiver for light product; 5 – fan

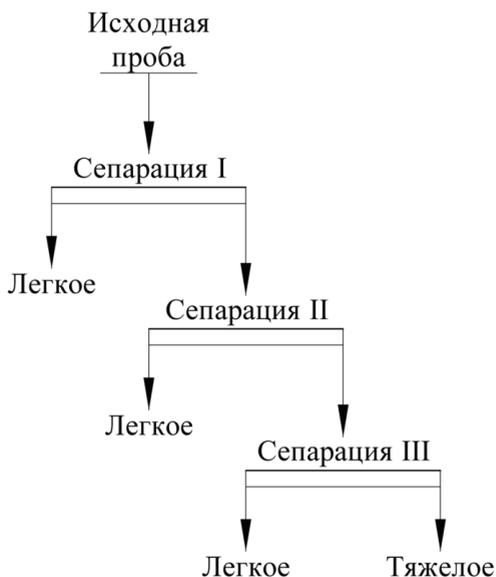


Рис. 3. Схема сепарации
Fig. 3. Separation scheme

На рис. 3 представлена схема обогащения на пневматической установке, которая включает в себя три операции выделения легкого продукта с увеличением скорости восходящего потока воздуха.

В результате обогащения получаем 2 продукта: тяжелый и легкий, выделение легкого продукта ведется в три этапа при скорости потока в трубе 2,0, 3,8 и 4,7 м/с. Оставшийся продукт, содержащий небольшое количество крупных кварцевых зерен, подвергнулся ручной рудоразборке.

Для понимания принципиальной возможности применения данного метода и предлагаемого для реализации сепаратора для извлечения металла используемую пробу подготовили в следующем виде: кварц измельчали на дисковом истирателе и просеивали на сите 0,4 мм, свинец натерли напильником и выделили на ситах класс крупностью $-0,4+0,1$ мм.

Опыт проводился дважды на одной пробе (дублировался). Результаты сепарации пробы со свинцом крупностью $-0,4+0,1$ мм представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты воздушной сепарации модельного материала со свинцом крупностью $-0,4+0,1$ мм
Results of air separation of model material with a lead coarseness of $-0.4+0.1$ mm

Продукт	Масса, г	Масса свинца, г	Массовая доля свинца, г/г	Выход, %	Извлечение свинца, %
Тяжелое 1	0,634	0,048	75709,78	0,13	96,00
Легкое 1	499,366	0,002	4,01	99,87	4,00
Исходный	500,000	0,050	100,00	100,00	100,00
Тяжелое 2	0,824	0,049	59466,02	0,16	98,00
Легкое 2	499,176	0,001	2,00	99,84	2,00
Исходный	500,000	0,050	100,00	100,00	100,00

Таблица 2

Результаты воздушной сепарации модельного материала со свинцом крупностью $-0,4+0$ мм
Results of air separation of model material with a lead coarseness of $-0.4+0$ mm

Продукт	Масса, г	Масса свинца, г	Массовая доля свинца, г/г	Выход, %	Извлечение свинца, %
Тяжелое 1	0,836	0,024	28708,13	0,17	48,00
Легкое 1	499,164	0,026	52,09	99,83	52,00
Исходный	500,000	0,050	100,00	100,00	100,00
Тяжелое 2	0,731	0,027	36935,70	0,15	54,00
Легкое 2	499,269	0,023	46,07	99,85	46,00
Исходный	500,000	0,050	100,00	100,00	100,00

Проведенный опыт показал принципиальную возможность применения данного аппарата для выделения металла. Для приближения модельного материала к реальному материалу решено подготовить пробу, аналогичную первой, отличающуюся тем, что свинец в пробе нужно подготавливать так же, как кварц, используя одну сетку крупностью $-0,4$ мм.

Схема проведения эксперимента аналогична. Опыт дублировался. Результаты сепарации пробы со свинцом крупностью $-0,4+0$ мм представлены в табл. 2.

Изменение металлической части свинца в пробе привело к неудовлетворительному результату, а именно зафиксировано резкое снижение извлечения металла. Для понимания причины происходящего снижения проведен рас

счет на классы крупности металлической составляющей пробы (натертого свинца). Полученная гранулометрическая характеристика приведена на рис. 4.

По гранулометрической характеристике видно, что свинца крупностью менее $0,1$ мм в образце около 11% , и наличие его в пробе не может привести к такому сильному снижению извлечения металла в тяжелую фракцию. Известно, что используемая для расчета формула Риттингера имеет определенную область применения, выражаемую крупностью материала, и по некоторым литературным данным её необходимо использовать для расчета скорости падения при крупности частиц материала более 1 мм. Также существует формула Аллена, диапазон ее использования указан для материала крупнее $0,12$ мм. Производим расчет

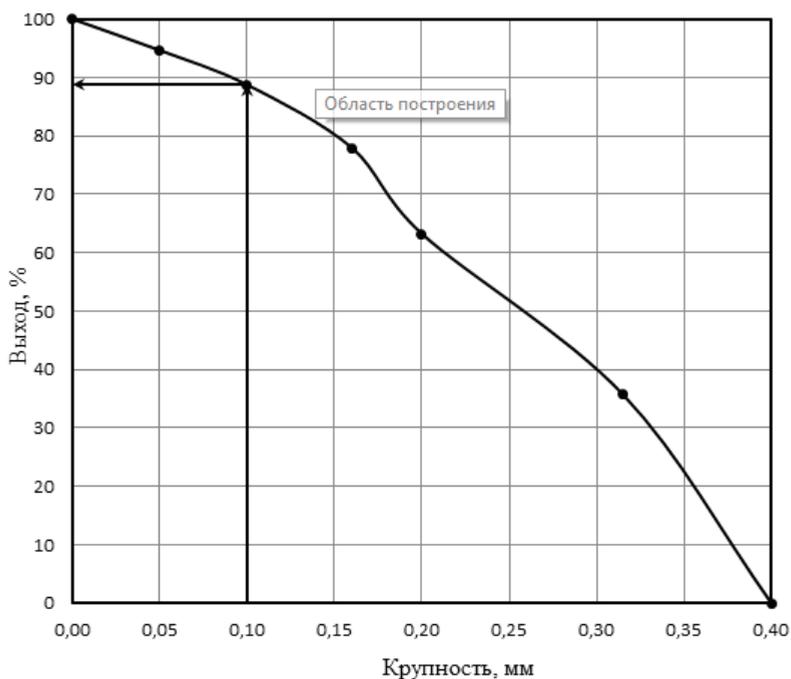


Рис. 4. Гранулометрическая характеристика натертого свинца, используемого для приготовления модельного материала

Fig. 4. Granulometric characteristic of the grinded lead used to prepare the model material

конечных скоростей падения v_0 по формуле Аллена:

$$v_0 = 39,3d\sqrt{\delta(\Delta - \delta)^2}, \quad (2)$$

где d — диаметр частиц, м; Δ — плотность воздуха, кг/м³; δ — плотность минерала, кг/м³.

Так же, как и в первом случае, определяем размер равнопадающей частицы «легкого», считая, что тяжелая частица будет размером 0,1 мм.

По приведенной выше формуле (2) произведен расчет для пары минералов кварц и свинец, полученные результаты расчетов отображены графически на рис. 5.

По проведенному расчету получена крупность, при которой должно проходить разделение частиц. Для проверки данного расчетного класса крупности

подготовлен модельный материал крупностью $-0,26+0$ мм (и кварц, и свинец). Схема проведения эксперимента аналогична предыдущим проведенным опытам, но при сниженной скорости восходящего потока в трубе 0,9, 1,6 и 2,0 м/с. Опыт дублировался. Результаты сепарации пробы со свинцом крупностью $-0,26+0$ мм представлены в табл. 3.

Проведём расчеты изменения относительной погрешности при условии включения операции пневматического обогащения поступающей на анализ пробы. Из-за высокой массовой доли свинца в концентрате вследствие ручной рудоразборки получен чистый свинец и проведено его прямое взвешивание, погрешность определения свинца в концентрате связано с погрешностью взвешивания, и она получается очень

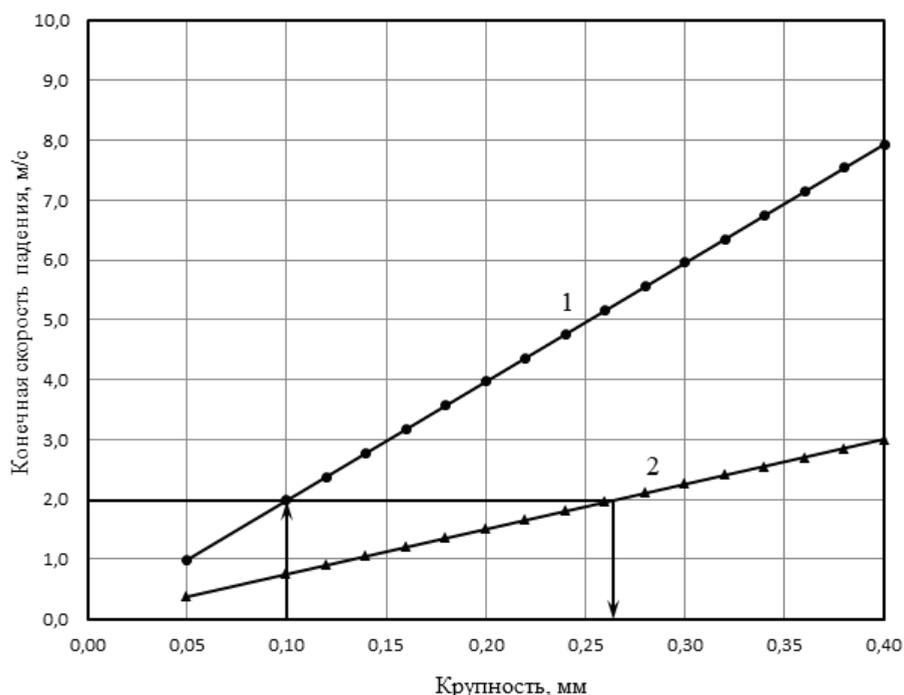


Рис. 5. Расчет конечных скоростей падения для кварца и свинца по формуле Аллена (1 – свинец, 2 – кварц)

Fig. 5. Calculation of finite incidence rates for quartz and lead according to Alain's formula (1 – lead, 2 – quartz)

Таблица 3

Результаты воздушной сепарации модельного материала со свинцом крупностью $-0,26+0$ мм
Results of air separation of model material with a lead coarseness of $-0.26+0$ mm

Продукт	Масса, г	Масса свинца, г	Массовая доля свинца, г/г	Выход, %	Извлечение свинца, %
Тяжелое 1	0,527	0,041	77798,86	0,11	82,00
Легкое 1	499,473	0,009	18,02	99,89	18,00
Исходный	500,000	0,050	100,00	100,00	100,00
Тяжелое 2	0,743	0,043	57873,49	0,15	86,00
Легкое 2	499,257	0,007	14,02	99,85	14,00
Исходный	500,000	0,050	100,00	100,00	100,00

низкой. Соответственно, погрешность определения напрямую связана с определением массовой доли в хвостах пневматической сепарации (легкий продукт), для определения массовой доли необходимо от полученного легкого продукта отобрать аналитиче-

скую навеску и провести анализ. Для того, чтобы получить аналитическую навеску необходимо провести операцию сокращения полученного легкого продукта, соответственно, погрешность отбора навески можно рассчитать по следующей формуле S_{aj}^2 [10]:

$$S_{\dot{a}_j}^2 = 2k \cdot f \cdot \dot{a}_j \cdot \hat{a}_c \cdot \hat{n}_c \frac{d_j^3}{q} \left(\frac{\Gamma}{T} \right)^2, \quad (3)$$

k — коэффициент учитывающий качество работы исполнителя; f — расчётный коэффициент формы свинца; α_j — массовая доля свинца в опробуемом материале, г/т; β_c — массовая доля свинца в свинце, г/т; ρ_c — плотность свинца, кг/м³; d_j^3 — средний размер частиц пробы, м; q — масса получаемой навески при сокращении, кг.

Рассчитаем погрешность отбора навески для исходной искусственной смеси без обогащения, которая имеет следующие значения: $k = 2$; $f = 0,3$; $\alpha = 100$ г/т, $\beta_c = 10^6$ г/т, $\rho_c = 11,35 \cdot 10^3$ кг/м³, $q = 50$ г, $d = 0,26$ мм.

$$\begin{aligned} S_{\text{нав}}^2 &= 2 \cdot 2 \cdot 0,3 \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot \\ &11350 \cdot \frac{(0,26 \cdot 10^{-3})^3}{50 \cdot 10^{-3}} = \\ &= 478,77 \left(\frac{\Gamma}{T} \right)^2; \\ S_{\text{нав}} &= 21,88 \left(\frac{\Gamma}{T} \right); \\ P_{\text{нав}} &= \frac{2S_{\text{нав}}}{\dot{a}} \cdot 100 = \frac{2 \cdot 21,88}{100} \cdot 100 = \\ &= 43,8\%. \quad (4) \end{aligned}$$

Рассчитаем изменение погрешности подготовки пробы, используя данные, полученные при проведении пневматической сепарации. Расчет показал следующие результаты:

$$\begin{aligned} S_1 &= 2,22 \text{ г/т}; P_1 = 4,4\%; \\ S_2 &= 1,95 \text{ г/т}; P_2 = 3,9\%. \end{aligned}$$

Обсуждение результатов

Описанные в статье эксперименты показали, что подготовка модельного материала играет большую роль при проведении опытов по воздушной сепарации. Использование в качестве

ценного компонента свинца, классифицированного по крупности 0,4+0,1 мм, позволило раздвинуть границу класса до 0,4 мм и получить высокие результаты извлечения (96 и 98% в двух опытах). При использовании свинца всего диапазона крупности (–0,4+0 мм) не получается добиться удовлетворительных результатов пневматического обогащения, извлечение в опытах составило 48 и 54%. Таким образом, при проведении опытов автор столкнулся с проблемой расчета крупности равнопадающих зерен пары минералов, составляющих модельный материал (кварц и свинец).

Пересчёт скоростей падения для пары минералов по формуле Аллена показал, что при расчете по предложенной им формуле крупность разделяемых частиц должна быть меньше, она составила –0,26+0,1 мм. Подготовленный модельный материал крупностью –0,26+0 мм (оба входящих в состав компонента) был успешно обогащен на пневматическом сепараторе, извлечение составило 82 и 86%. С учетом гранулометрической характеристики используемого в модельном материале свинца класса менее 0,1 мм в пробе порядка 11%, что и привело к снижению извлечения по сравнению с первым проведенным опытом.

Также произведен расчет снижения относительной погрешности подготовки пробы (сокращение материала) при использовании пневматической сепарации в схеме подготовки пробы к анализу. Расчеты показали, что использование операции пневматического обогащения позволяет снизить, в нашем случае, относительную погрешность с 43,8% при сокращении исходного материала до 4,4(3,9) % для получаемого в результате обогащения легкого продукта.

Заключение

1. Расчет конечных скоростей падения позволяет достаточно точно определить крупность разделяемых частиц минерала и подобрать скорость восходящего потока воздуха в трубе аппарата для разделения частиц.

2. Использование узкого класса тяжелого компонента приводит к расширению класса поступающего на обогащение материала, что указывает на чувствительность способа обогащения к крупности тяжелой составляющей, и в дальнейшем может быть использовано.

3. Извлечение свинца из искусственной смеси минералов с использованием пневматического сепаратора позволяет достигнуть извлечения свинца 82–86%. Полученные высокие показатели извлечения свинца указывают на работоспособность метода и позволяют рекомендовать его к использованию в схемах подготовки проб от материала, содержащего благородные металлы.

4. Применение операции обогащения (пневматической сепарации) для предварительного выделения металла при проведении операций по подготовке проб к анализу позволяет проводить анализ на пробе с большой массой, это в свою очередь открывает возможность подготавливать к анализу пробы с небольшой массовой долей контролируемого металла и при подготовке получать низкую вероятную систематическую погрешность.

5. Рассмотренный метод пневматического обогащения может стать альтернативой используемому в настоящее время гравитационному концентрированию, так как данный способ позволяет проводить обогащение без использования воды, а это в дальнейшем упрощает работу с пробой.

Автор выражает признательность за помощь Завьялову Сергею Сергеевичу и Лыжиной Марии Игоревне, чей вклад в данную работу носил чисто технический характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козин В. З., Комлев А. С., Волков П. С. Эффективность использования операций обогащения в схемах подготовки проб. Горный журнал. 2017. № 3. С. 83–87.

2. Петров С. В., Бедерова Л. Л., Бороздин А. П. К методике достоверного определения содержания благородных металлов в пробах с крупными выделениями самородных металлов. Обогащение руд. 2015. №4. С. 44–48.

3. Козин В. З., Комлев А. С. Эффекты опробования, связанные с асимметрией распределений массовых долей компонентов в точечных пробах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. —№11–1. — С. 107–118. DOI:10.25018/0236_1493_2022_111_0_107.

4. Козин В. З., Комлев А. С., Волков П. С. Подготовка проб, содержащих недробимые включения, к анализу. Обогащение руд. 2017. №1. С. 24–28.

5. Gleeson D. Getting to the core // International Mining. 2019, pp. 64–68.

6. Белавина О. А., Швецов В. А. Совершенствование операций подготовки проб золотосодержащих руд к пробирному анализу. Камчатский государственный технический университет (Петропавловск-Камчатский), 2019 г. 104 с.

7. Кавчик Б. К. Схема обработки проб с предварительным извлечением крупного золота // Золотодобыча. 2013. № 177. С. 27–30.

8. Комлев А. С. Экспериментальное определение вероятной систематической погрешности при отборе проб продуктов обогащения комбинированным способом // Горный журнал. 2016. № 6. С. 84–90.

9. Козин В. З., Комлев А. С. Комбинированный способ отбора проб продуктов обогащения и оборудование для его реализации // Обогащение руд. 2014. № 3. С. 28–32.

10. Козин В. З. Опробование минерального сырья: науч. монография. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. 316 с.

11. Ramsey M. H., Ellison S. L.R., Rostron P. et al. Measurement uncertainty arising from Sampling: a guide to methods and approaches — 2 nd edition// Eurachem. 2019. P. 109.

12. 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.

13. 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>.

14. Fu Z., Zhu J., Barghi S., Zhao Y., Luo Z., Duan Ch. Dry coal beneficiation by the semiindustrial 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>.

15. Mijał W., Tora B. Development of dry coal gravity separation techniques. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2018, 427(1):012003.

16. 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; <https://doi.org/10.3390/app11104383>.

17. 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>.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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. 

REFERENCES

1. Kozin V. Z., Komlev A. S., Volkov P. S. Concentration operations efficiency in the schemes of samples preparation. Mining Magazine. 2017. no. 3. pp. 83–87. [In Russ].

2. Petrov S. V., Bederova L. L., Borozdin A. P. Regarding the methods of reliable determination of precious metals content in the samples with large winning of native metals. Mineral Processing, 2015, no. 4, pp. 44–48. [In Russ].

3. Kozin V. Z., Komlev A. S. Sampling effects related to the asymmetry of distributions of mass fractions of components in point samples. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* , 2022;(11–1):107–118. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_107. [In Russ].

4. Kozin V. Z., Komlev A. S., Volkov P. S. Preparation for analysis of samples containing uncrushable material inclusions. Obogashchenie rud Mineral Processing, 2017, no. 1, pp. 24–28. [In Russ].

5. Gleeson D. Getting to the core. International Mining. 2019, pp. 64–68.

6. Belavina O. A., Shvetsov V. A. Improving the operations of preparing samples of gold-bearing ores for assay analysis. Kamchatka State Technical University (Petropavlovsk-Kamchatsky), 2019. pp.104. [In Russ].

7. Kavchik B. K. The scheme of samples handling with preliminary extraction of coarse gold. *Gold Mining*, 2013, no. 177, pp. 27–30. [In Russ].

8. Komlev S. A. Experimental determination of probable systematic inclination when sampling products of concentration with combined method. *Mining Journal*, 2016, no. 6, pp. 84–90. [In Russ].

9. Kozin V. Z., Komlev A. S. Combined method of concentration products sampling and the equipment for its realization. *Mineral Processing*. 2014, no. 3, pp. 28–32. [In Russ].

10. Kozin V. Z. Mineral raw materials sampling. Ekaterinburg, UrSMU Publ., 2011. 316 p. [In Russ].

11. Ramsey M. H., Ellison S. L. R., Rostron P. et al. Measurement uncertainty arising from Sampling: a guide to methods and approaches 2 nd edition// Eurachem. 2019. P. 109.

12. 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.

13. 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>.

14. Fu Z., Zhu J., Barghi S., Zhao Y., Luo Z., Duan Ch. Dry coal beneficiation by the semiindustrial 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>.

15. Mijat W., Tora B. Development of dry coal gravity separation techniques. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2018, 427(1):012003.

16. 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; <https://doi.org/10.3390/app11104383>.

17. 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>.

18. 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.

19. Bauman A. V., Stepanenko A. I., Stepanenko A. A. Practical results and prospects of dry enrichment of ores and non-metallic materials by pneumoseparation. *Mining Magazine*. 2020, № 3, 40–44. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.07.

20. Lebedev I. F. Mineral processing with the use of air separation devices. *International Research Journal*. 2019. no. 4–1(82). 65–68. [In Russ]. DOI 10.23670/IRJ.2019.82.4.012.

21. Zavyalov S. S., Mamonov R. S. Theoretical justification of the application of pneumatic separation in the enrichment of sulfide copper ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11–1):199–209. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_199.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волков Павел Сергеевич – инженер кафедры обогащения полезных ископаемых. <https://orcid.org/0009-0003-3416-3131>. УГГУ, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30. E-mail: PavelVolkov@m.ursmu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volkov P.S., Engineer of the Department of Mineral Processing, e-mail: PavelVolkov@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0009-0003-3416-3131, Ural State Mining University (USGU), Yekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 15.08.2023; принята к печати 10.12.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 15.08.2023; accepted for printing 10.12.2023.