

РАСЧЕТ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОТБОРА ПРОБ

В. З. Козин¹, А. С. Комлев¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: В теории опробования особое место отводится формуле фундаментальной погрешности отбора (FSE), которая связывает погрешность пробы определенной массы со свойствами кусков опробуемого массива. Но свойства самого опробуемого массива, описываемые коэффициентами вариации, учитываются другими формулами, связь которых с FSE не установлена. Одновременный учет свойств кусков и свойств опробуемого массива позволяет получить полную формулу, объединяющую как покусковую дисперсию и число кусков в объединенной пробе, так и дисперсию точечных проб и число точечных проб. Полная формула показывает, что фундаментальную погрешность отбора формируют покусковая дисперсия S_k^2 и дисперсия точечных проб S_f^2 . При этом формула, учитывающая только свойства кусков, позволяет найти минимальную возможную погрешность. Реальная погрешность за счет влияния дисперсии точечных проб оказывается намного большей. На основе полной формулы (8) получена формула минимальной массы пробы с учетом влияния на фундаментальную погрешность дисперсии точечных проб. Минимальная масса, которую можно найти по формулам (12) или (13), будет наименьшей из возможных и является опорной. Минимальная масса существенно увеличивается по сравнению с опорной и первой операцией подготовки проб к анализу. Минимальная масса может быть уменьшена снижением крупности материала пробы. Уменьшение минимальной массы обычно используется при подготовке проб путем их дробления. При этом практически не уменьшают крупность пробы при отборе проб от опробуемого неподвижного массива. В процессе отбора пробы не подвергаются дроблению.

Ключевые слова: полная формула фундаментальной погрешности отбора, минимальная масса пробы, покусковая дисперсия, коэффициент вариации, точечные пробы.

Для цитирования: Козин В. З., Комлев А. С. Расчет фундаментальной погрешности отбора проб // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 265–275. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_265.

Calculation of fundamental sampling error

V. Z. Kozin, A. S. Komlev

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: In the theory of sampling, special emphasis is laid on the formula for the fundamental sampling error, which connects the error of a certain sample with the properties of sampled rock mass. In the meanwhile, the rock mass properties are described with the coefficients of variation and using other formulas which are connected with FSE in a yet unknown way. Incorporation of properties of samples and properties of sampled rock mass produces a formula which integrates particle dispersion and number of particles in a bulk sample, as well as

dispersion and number of point samples. The complete formula shows that FSE is generated by particle dispersion and point sample dispersion. The formula that only takes into account properties of particles finds the minimum possible error. An actual error is much higher because of the influence of the point sample dispersion. From complete formula (8), the formula is obtained for the minimum mass of a sample with regard to the influence of the point sample dispersion on FSE. The minimum mass found from formulas (12) or (13) is the least of possible masses, and is the reference. The minimum mass essentially grows as against the reference after the first operation of sample preparation for the analysis. The mass can be reduced via size degradation of a sample material. The minimum mass is decreased in preliminary grinding of samples. The sizes of the samples during sampling in intact rock mass are unchanged. The samples during sampling are not subjected to grinding.

Key words: complete formula for fundamental sampling error, minimum mass of sample, particle dispersion, coefficient of variation, point samples.

For citation: Kozin V. Z., Komlev A. S. Calculation of fundamental sampling error. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):265–275. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_265.

Введение

Опробование является необходимой процедурой для определения качества руд и продуктов обогащения. Так как опробование связано с отбором проб для определения количественных характеристик продуктов, необходима теоретическая база, позволяющая отбирать пробы исходя из требуемого качества определения этих характеристик. Попытка создания такой теории в мировой практике сделана Пьером Жи (Pierre Gy) в изданном в 1979 г. научном труде [1] с последующими уточнениями теоретических положений в многочисленных публикациях [2]. На основе теории П. Жи разрабатываются стандарты на опробование [3, 4], сама теория зачастую возводится в ранг универсальной. Указанная попытка создания универсальной теории опробования подвергается жесткой критике. Особенно резкой критике теорию опробования П. Жи подвергли в своих работах D. S. Dihalu и B. Geelhoed [5]. Авторы считают, что теория недостаточно практична и недостаточно убедительна. В частности, в своих работах критики теории П. Жи обосновывают следующий тезис:

«... нет доказательства, что две ее [теории опробования] основные тео-

ретические части, а именно — модель дискретного выбора и модель непрерывного выбора — совместимы и не противоречат друг другу».

Несмотря на неоднократные «улучшения» и дополнения теории опробования, связь между названными вариантами отбора не показана и не имеет теоретического подтверждения [6–9]. Авторами указано, что после выхода наиболее полного изложения теории П. Жи «... число людей, которые прочитали и поняли полную теорию выборки Жи, включая базовую оценку дисперсии, невелико. ...с академической точки зрения, наука должна быть, по крайней мере, понятной для большинства заинтересованных людей в этой области исследований» [5].

Опробование минерального сырья в горной промышленности играет ключевую роль в обеспечении качества продукции. Теория и практика опробования руд и продуктов обогащения развивались как в связи с требованиями стандартов, так и в связи с развитием самой техники отбора, подготовки и анализа проб [10–13]. В настоящее время основная техника опробования представлена пробоотбирателями, сократителями и оборудованием

для анализа. В оборудовании реализованы различные способы и варианты отбора, сокращения и анализа проб. Использование любого из способов опробования требует понимания условий его практического применения, а также возможностей применяемого оборудования. Это, в свою очередь, требует наличия практической и обоснованной теории опробования.

Среди разнообразных проблем в области опробования основное внимание традиционно уделяется изучению погрешностей опробования и минимальных масс проб как величин, определяющих условия отбора, подготовки и анализа проб.

Центральное место данные вопросы занимают в теории П. Жи [1]. При этом теоретическая база получения формулы фундаментальной погрешности отбора проб в теории П. Жи не сформулирована, что не позволило связать формулу с условиями отбора точечных проб и формированием объединенной пробы.

В настоящей работе предложено решение обозначенной проблемы.

Целью работы является получение полной формулы фундаментальной погрешности отбора проб и демонстрация ее свойств на примерах расчетов минимальных масс объединенных проб.

Исследования выполнены в соответствии с Государственным заданием на выполнение НИР для ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» № 075 – 03 – 2021 – 303 от 29.12.2020 г.

Теория вопроса

Любой опробуемый массив руд или продуктов обогащения неоднороден по двум причинам:

- отдельные куски отличаются друг от друга;
- отдельные локальные совокупности кусков отличаются друг от друга.

Эти отличия существуют всегда, и получение формулы фундаментальной погрешности опробования должно основываться на описании как отличий отдельных кусков, так и отличий их локальных совокупностей, составляющих массы точечных проб. Количественными оценками таких отличий являются дисперсии массовых долей как в отдельных кусках, так и в отдельных точечных пробах. Отличие отдельных кусков друг от друга описывается покусковой дисперсией S_k^2 . Отличие точечных проб друг от друга описывается дисперсией точечных проб S_T^2 .

Покусковая дисперсия:

Неоднородность отдельных кусков опробуемого массива является фундаментальным свойством руд и продуктов обогащения, которое может быть описано аналитически и определено количественно.

Покусковая дисперсия для продуктов, представленных раскрытыми зернами минерала и породы, S_k^2 , получена аналитически [14] и может быть найдена по четырем характеристикам руды:

- ρ_m и ρ_n – плотности минерала и породы;
- β_m и α – массовые доли определяемого компонента в минерале и в руде:

$$S_k^2 = \frac{\rho_m}{\rho_n} \alpha (\beta_m - \alpha) \left(1 - \frac{\alpha}{\beta_m} + \frac{\alpha \rho_n}{\beta_m \cdot \rho_m} \right)^2. \quad (1)$$

Для руд и хвостов (бедных продуктов, для которых $\alpha < 0,15\beta_m$) применима простая форма определения величины S_k^2 :

$$S_k^2 = \frac{\rho_m}{\rho_n} \alpha \beta_m. \quad (2)$$

Покусковая дисперсия для продуктов, содержащих сростки (как правило, руда до измельчения), определяется по формуле

$$S_{\text{к ср}}^2 = S_{\text{к}}^2 \cdot \left(\frac{d_3}{d} \right)^{3-b} \quad (3)$$

где d_3 — размер зерен минерала; d — размер кусков опробуемого массива, при этом $d > d_3$; b — коэффициент, характеризующий строение сростков (для руд цветных металлов $b = 1,5$).

Покусковая дисперсия является максимальной из возможных дисперсий точечных проб, и ее величина не зависит от перемешанности или усреднения опробуемого массива.

При формировании объединенной пробы при покусковом отборе точечных проб, равномерно распределенных по опробуемому массиву, погрешность объединенной пробы составит

$$S_{\alpha}^2 = \frac{S_{\text{к}}^2}{N_{\text{т}}} \quad (4)$$

При «идеальном» перемешивании можно отобрать точечную пробу, содержащую $n_{\text{т}} = N_{\text{т}}$ кусков, с такой же погрешностью:

$$S_{\text{нт}}^2 = \frac{S_{\text{к}}^2}{n_{\text{т}}} \quad (5)$$

Это означает, что даже при «идеальном» перемешивании отобранные пробы, содержащие одинаковое число кусков $n_{\text{т}}$, будут отличаться друг от друга, так как $S_{\alpha}^2 > 0$.

При наличии формулы покусковой дисперсии предлагается ввести понятие покускового коэффициента вариации $V_{\text{к}}$ и оценить его величину. Ниже это показано на примере формулы (2):

$$V_{\text{к}} = \frac{S_{\text{к}}}{\alpha} \cdot 100 = \sqrt{\frac{\rho_{\text{м}} \cdot \beta_{\text{м}}}{\rho_{\text{п}} \cdot \alpha}} \cdot 100 \% \quad (6)$$

Для коренной золотосодержащей руды, подготовленной к обогащению (раскрытой), с массовой долей золота $\alpha = 3,5$ г/т, плотностью золота $\rho_{\text{м}} = 18\,000$ кг/м³, плотностью породы $\rho_{\text{п}} = 3\,000$ кг/м³ и массовой долей золота

в золотилах $\beta_{\text{м}} = 90$ % (проба 900) покусковая дисперсия составит

$$V_{\text{к}} = \sqrt{\frac{18000 \cdot 0,9 \cdot 10^6}{3000 \cdot 3,5}} \cdot 100 = 1,242 \cdot 10^5 \%$$

Для медной руды, подготовленной к обогащению ($\alpha = 0,55$ %; $\beta_{\text{м}} = 34,6$ %; $\rho_{\text{м}} = 4\,100$ кг/м²; $\rho_{\text{п}} = 3\,000$ кг/м³):

$$V_{\text{к}} = \sqrt{\frac{4100 \cdot 34,6}{3000 \cdot 0,55}} \cdot 100 = 927,2\%$$

Полученные покусковые коэффициенты вариации велики и существенно превышают обычно получаемые коэффициенты вариации точечных проб.

В соответствии с ГОСТ 14180—80 для медной руды предлагается принимать максимальный коэффициент вариации точечных проб $V_{\text{т}} = 35$ %, для золотых руд $V_{\text{т}}$ может достигать до 100 % и более.

Первичность массы точечной пробы:

Первичной величиной при отборе точечных проб, зависящей от параметров используемого инструмента, является масса точечной пробы $q_{\text{м}}$.

Масса точечной пробы при использовании механических пробоотбирателей определяется производительностью потока руды, шириной щели пробоотбирателя и скоростью ее перемещения. Масса точечной пробы при использовании анализаторов массовой доли непосредственно в потоке пульпы или на конвейере определяется скоростью потока, сечением части анализируемого потока, предопределяющей аналитический сигнал, и продолжительностью экспозиции [11—13].

Масса точечной пробы при опробовании неподвижных масс определяется либо геометрическими параметрами инструмента, отбирающего пробу, либо массой активной части

материала, формирующей аналитический сигнал при использовании анализаторов материала в опробуемом массиве [14].

Так как инструментов и способов отбора точечных проб по одному куску практически не существует (исключение — лазерные гранулометры), то покусковой отбор проб и покусковая дисперсия являются необходимыми, но в чистом виде теоретическими понятиями, а минимальная масса при покусковом отборе — предельно достижимой минимальной массой точечной пробы при опробовании [15–17].

Дисперсия точечных проб:

Дисперсия точечных проб S_T^2 является вторым после покусковой дисперсии S_K^2 фундаментальным понятием в теории опробования.

Отличие точечных проб друг от друга предопределяется двумя причинами:

- ограниченностью массы точечной пробы и, следовательно, конечностью величины n_T в формуле (5);
- неидеальностью перемешанности опробуемого массива, что приводит к записи формулы (5) как

$$S_\alpha^2 = \frac{S_K^2 - S_T^2}{n_T} + S_T^2. \quad (7)$$

Формула (7) показывает, что увеличением числа кусков n_T в точечной пробе можно снизить дисперсию только до определенного предела, а именно до S_T^2 .

Дисперсия точечных проб является характеристикой опробуемого массива в целом и определяется только экспериментально. Для контрольного периода T или массы M следует отобрать 50 точечных проб по ГОСТ 14180–80 и по результатам их анализа определить коэффициент вариации и дисперсию точечных проб [14, 18].

Полная формула фундаментальной погрешности отбора:

Снизить S_6^2 до требуемой (допустимой) величины можно только путем формирования объединенной пробы из N_T точечных проб, расширив понятие фундаментальности погрешности отбора на объединенную пробу:

$$S_\alpha^2 = \frac{1}{N_T} \left(\frac{S_K^2 - S_T^2}{n_T} + S_T^2 \right). \quad (8)$$

Формула (8) является полной формулой фундаментальной погрешности отбора и формирования объединенной пробы, передаваемой далее на подготовку и анализ. Важно, что она объединяет покусковую (discrete) и массовый (continual) отбор проб.

Полная формула фундаментальной погрешности отбора не только отражает связь покускового и массового отбора точечных проб, но и показывает ограниченность возможностей покускового отбора при существенной группировке зерен полезного компонента в опробуемом массиве. Так, если $S_T^2 = S_K^2$, достижение необходимой величины результата опробования S_6^2 возможно только с помощью массового отбора точечными пробами.

Так как интенсивным (идеальным) перемешиванием опробуемого массива можно добиться условия $S_T^2 \cong 0$, то можно отобрать одну точечную пробу как объединенную из n_T кусков [19, 20]. Такой предельный случай может быть реализован в лабораторных условиях.

В теории П. Жи [1] формула фундаментальной погрешности отбора описывает именно такой частный случай покускового (discrete) отбора проб, в котором дисперсия точечных проб переходит в покусковую дисперсию, а число точечных проб равно числу кусков в отобранной пробе. Тогда вместо полной формулы (8) используется формула частного случая (5):

Величины S_K^2 и n_T определяются по формулам

$$S_k^2 = \frac{\rho_m}{\rho_n} \alpha \beta_m; \quad (9)$$

$$n_T = \frac{q}{f \rho d^3} \quad (10)$$

В формулах (9) и (10): α и β_m — массовая доля определяемого компонента в руде и минерале; ρ_m — плотность зерен минерала; q — масса пробы; d — размер кусков в пробе; ρ — плотность пробы, $\rho \cong \rho_n$; f — коэффициент формы.

В итоге, с учетом интегрирования по гранулометрическому составу (коэффициент 0,25), будет получена формула погрешности отбора проб

$$S_\alpha^2 = 0,25 f \alpha \beta_m \rho_m d^3 / q. \quad (11)$$

Полученная формула внешне совпадает с формулой фундаментальной погрешности отбора (FSE) П. Жи (в обозначениях источника [1]):

$$S_{FSE}^2 = g f c L d^3 / M_s. \quad (12)$$

В формуле (12): g — коэффициент, зависящий от гранулометрической характеристики продукта ($g = 0,25$); f — коэффициент формы частиц ($f = 0,5$); c — фактор минерального состава; L — коэффициент раскрытия ($L = 0 \div 1$); M_s — масса пробы.

Формула (11) отличается от формулы (12) определенностью входящих в них величин: коэффициент 0,25 получен для равномерного распределения по классам крупности, коэффициент формы установлен экспериментально (для руд цветных металлов $f = 0,4$; для золота $f = 0,2$), массовая доля определяемого компонента в руде α и в минерале β_m , а также плотность минерала ρ_m , могут быть установлены непосредственно, крупность $d = d_{95}$ определяется ситовым анализом, а масса q — взвешиванием.

Как следует из представленного сопоставления формул (11) и (12), они описы-

вают частный случай отбора проб от тщательно перемешанного массива и не могут быть распространены на реальные случаи отбора точечных проб и формирование объединенной пробы.

Попытки использовать формулу (12) в реальных условиях всегда приводили к существенно заниженным расчетным оценкам погрешности отбора по сравнению с экспериментальными результатами [2]. Реальные погрешности могут быть получены лишь с переходом к полной формуле фундаментальной погрешности отбора (8).

Методика исследования

Практическое использование полной формулы фундаментальной погрешности отбора:

Полная формула фундаментальной погрешности отбора проб не только объединяет покусковой и массовый (точечными пробами массой q_T) отбор точечной пробы, но и позволяет раскрыть закономерности изменения минимальной массы с изменением параметров отбора.

Минимальная масса объединенной пробы

$$q = q_T \cdot N_T = q_T \cdot \frac{S_\alpha^2}{S_{\text{доп}}^2}. \quad (13)$$

где q_T — масса точечной пробы; N_T — число точечных проб; S_α — погрешность отбора пробы по формуле (8); $S_{\text{доп}}$ — допустимая погрешность отбора (задается).

Подставив N_T из формулы (8) при условии, что $S_\alpha^2 = S_{\text{доп}}^2$, получаем формулу

$$q = q_T \cdot \frac{\left(S_T^2 + \frac{S_k^2 - S_T^2}{n_T} \right)}{S_{\text{доп}}^2}. \quad (14)$$

Масса куска $q_k = q_T / n_T$.

Тогда

$$q = q_k \cdot \frac{S_k^2}{S_{\text{доп}}^2} + (q_T - q_k) \cdot \frac{S_T^2}{S_{\text{доп}}^2}. \quad (15)$$

Первое слагаемое формулы (15) соответствует массе пробы при учете только покусковой дисперсии. Реально такая масса может быть получена в условиях тщательного перемешивания опробуемого массива (частный случай) и может считаться опорной (q_0).

Второе слагаемое соответствует массе пробы при дополнительном учете различия точечных проб (общий случай) и зависит как от массы точечной пробы q_T , так и от дисперсии точечных проб S_T^2 (приращение массы Δq). Следовательно, минимальная масса объединенной пробы будет составлять

$$q = q_0 + \Delta q. \quad (16)$$

На основании полученных формул предлагается сделать вывод, что при отборе точечных проб, содержащих более одного куса опробуемого продукта, минимальная масса по сравнению с опорной увеличивается на величину Δq . Это увеличение зависит от массы точечной пробы q_T и дисперсии точечных проб S_T^2 . Так как обычно $q_T \gg q_L$, то увеличение Δq будет составлять

$$\Delta q = q_T \cdot \frac{S_T^2}{S_{\text{доп}}^2}. \quad (17)$$

Формулу (8) возможно записать с использованием коэффициентов вариации

$$V_\alpha^2 = \frac{1}{N_T} \left(\frac{V_K^2 - V_T^2}{n_T} + V_T^2 \right). \quad (18)$$

Коэффициенты вариации как относительные характеристики позволяют выполнять сравнительные расчеты для различных условий опробования. Так, отношения $\frac{S_K^2}{S_{\text{доп}}^2}$ и $\frac{S_T^2}{S_{\text{доп}}^2}$ заменяются отношениями $\frac{4V_K^2}{P_{\text{доп}}^2}$ и $\frac{4V_T^2}{P_{\text{доп}}^2}$. В этих отношениях величина $P_{\text{доп}}$ — допустимая относительная погрешность, выражаемая в процентах.

Ниже дано сопоставление величин q_0 и Δq при помощи формул (15) и (18) при условии $q_T \gg q_K$:

$$q = q_0 + \Delta q = q_K \cdot \frac{4 \cdot V_K^2}{P_{\text{доп}}^2} + q_T \cdot \frac{4 \cdot V_T^2}{P_{\text{доп}}^2}. \quad (19)$$

Для медной руды:

$$\alpha = 0,55 \% ; V_K = 927,2 \% ; V_T = 20 \% ; q_T = 0,3 \text{ кг} ; d = 0,5 \text{ мм} ;$$

$$q_K = 256 \cdot 10^{-9} \text{ кг (0,256 мг)} ; P_{\text{доп}} = 5 \% .$$

Тогда

$$q = q_0 + \Delta q = 256 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{4 \cdot 927,2^2}{5^2} + 0,3 \cdot \frac{4 \cdot 20^2}{5^2} = (0,035 + 19,2) \text{ кг} = 19,235 \text{ кг} .$$

Для золотой руды:

$$\alpha = 3,5 \text{ г/т} ; V_K = 1,242 \cdot 10^5 \% ; V_T = 80 \% ; q_T = 0,3 \text{ кг} ; d = 0,5 \text{ мм} ;$$

$$q_K = 256 \cdot 10^{-9} \text{ кг (0,256 мг)} ; P_{\text{доп}} = 5 \% .$$

$$q = q_0 + \Delta q = 256 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{4 \cdot 1,242^2 \cdot 10^{10}}{5^2} + 0,3 \cdot \frac{4 \cdot 80^2}{5^2} = (632 + 307,2) \text{ кг} = 939,2 \text{ кг} .$$

Выполненное сопоставление показывает, что величина покусковой дисперсии по сравнению с дисперсией точечных проб может быть различной: от незначимой (медная руда) до преобладающей (золотая руда).

Из выражения (16) следует вывод о неоднозначности понятия минимальной массы пробы: существует ее предельное (опорное) значение q_0 и фактическое значение q , дополнительно зависящее от массы точечных проб и их дисперсии. Фактическое значение минимальной массы может значительно превышать опорное.

Обсуждение результатов

Одновременный учет как различия кусков, отбираемых в точечную пробу, так и различия точечных проб, формирующих объединенную пробу, позволяет составить полную формулу фундаментальной погрешности отбора (8), объединяющую покусковой (discrete) и массовый (continuel) отбор проб и показывающую связь между ними. Основным является массовый отбор проб, а дискретный (покусковой) отбор точечными пробами является его частным случаем, позволяющим найти опорное значение минимальной массы пробы.

Точечные пробы могут отбираться и формировать объединенную пробу, передаваемую на анализ, либо анализироваться непосредственно в опробуемом массиве при использовании автоматических анализаторов. В любом из этих случаев осуществляется массовый отбор проб или их массовый анализ непосредственно в опробуемом массиве [21].

Полная формула фундаментальной погрешности отбора (8) показывает, что фундаментальная погрешность отбора точечных проб зависит не только от свойств кусков опробуемого мас-

сива, но и от дисперсии точечных проб, и определяется их суммарным влиянием. Погрешность объединенной пробы снижается не только с увеличением массы объединенной пробы или со снижением крупности кусков, но и с увеличением числа точечных проб.

Минимальная масса объединенной пробы является функцией массы точечной пробы и при одной и той же допустимой погрешности может намного превышать опорное значение минимальной массы, возможное при покусковом отборе точечных проб.

Выводы

1. Получена полная формула фундаментальной погрешности отбора проб, связывающая понятия покускового (discrete) и массового (continual) отбора, показывающая совместимость указанных величин.

2. Формула фундаментальной погрешности, учитывающая только различия кусков опробуемого массива, является частным случаем полной формулы, применимой при покусковом отборе точечных проб, а минимальная масса объединенной пробы в этом случае является опорной массой, теоретически возможной, но реально недостижимой. Фактическое значение минимальной массы может намного превышать опорное.

3. Масса точечной пробы выбирается в зависимости от характеристик используемого инструмента (пробоотбирателя) или предопределяется условиями прямого измерения массовой доли аналитическим прибором.

4. Минимальная масса объединенной пробы является функцией массы точечных проб и меняется с изменением массы точечной пробы. Масса объединенной пробы обычно превышает опорную массу и первой опера-

цией подготовки пробы может быть ее сокращение.

5. Снижение крупности кусков, отбираемых в точечные пробы, помимо снижения минимальных масс точечных проб, снижает фундаментальную погрешность опробования. Такой спо-

соб используется в анализаторах массовой доли в потоке пульпы или в сыпучем продукте на конвейере, так как при анализе выполняется сканирование незначительной части поверхности куска — это эквивалентно снижению крупности пробы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gy. P. Sampling of Particulate Material: Theory and Practice. Elsevier: Amsterdam, 1979 and 1982, 431 p.p.
2. Lotter N. O. Evans C. L. Engströrn K. Sampling — A key tool in modern process mineralogy/ Minerals Engineering. V. 116, 15 January 2018. p. 196 — 202.
3. Holmes, R. J. Challenges of developing ISO sampling standards. Fifth World Conference on Sampling & Blending. Conference Proceedings, Gecamin Ltda, 2011, pp. 57 — 63.
4. Esbensen, K. H, Minkinen, P. Illustrating Sampling standards — How to guarantee complete understanding and TOS — compliance? Fifth World Conference on Sampling & Blending, Conference Proceedings, Gecamin Ltda, 2011, p. 383 — 392.
5. Dihalu, D. S. Geelhoed, B. A. Critique of Gy's Sampling Theory. Published 2012. Computer Science dx.doi.org/10.1255/tosf.11.
6. Pitard F. F. Pierre Gy's Sampling Theory and Sampling Practice: Heterogeneity, Sampling Correctness and Statistical Process Control. 2nd Edn. CRC Press, 1993.
7. Geelhoed, B. Approaches in Material Sampling, Delft University Press, 2010. 152 p.p.
8. Geelhoed, B. Is Gy's Formula for the Fundamental Sampling Error accurate? Experimental evidence. Minerals Engineering, 2011, 24 (2): p. 169 — 173.
9. Dihalu D. S, Geelhoed B. A new multi-axial particle shape factor — application to particle sampling. Analyst, 2011, № 136 (18): 3783 — 8.
10. Карпенко Н. В. Опробование и контроль качества продуктов обогащения руд. М. Недра. 1987. 215 с.
11. Ляпин А. Г. Инженерно-аналитический контроль технологий добычи и переработки минерального сырья. Горный журнал, 2009, № 4, С. 14 — 16.
12. Морозов В. В., Столяров В. Ф., Коновалов А. М. Повышение эффективности управления флотацией с использованием поточных анализаторов состава пульпы. Обогащение руд, 2003, № 4, С. 33 — 36.
13. Зайцев В. А., Макарова Т. А., Барков А. В., Бахтияров А. В., Москвин Л. Н. Неразрушающий контроль состава полиметаллических руд и продуктов обогатительного цикла // Цветные металлы, 2006, № 8, С. 60 — 67.
14. Козин В. З. Опробование минерального сырья на обогатительных фабриках: учебник для ВУЗов / В. З. Козин; Урал. гос. горный ун-т. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. — 208 с.
15. Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л., Дуда А. М., Морозов В. В. Управление обогащением медно-молибденовых руд на основе комплексного радиометрического анализа руды // Материалы международного совещания «Плаксинские чтения». Екатеринбург: Изд-во ФДН, 2011. С. 118 — 121.
16. Даваасамбуу Д., Эрдэнэцогт Д. Оптимизация процессов флотации медно-молибденовых руд на основе оперативного анализа минерального состава // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XX Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2015. С. 52 — 56.

17. Козин В. З., Комлев А. С. Экспериментальное определение случайных погрешностей опробования на обогатительных фабриках // Обогащение руд. 2017, № 2, С. 44–48.
18. Ступакова Е. В. Определение погрешностей стандартных образцов состава руд золотосодержащих. Известия вузов. Горный журнал, № 6, 2019, с. 136–143.
19. Gleeson D. Getting to the core. International Mining. February 2019. p. 64–68.
20. Moore P. Making it elementary. International Mining. February 2018, p. 10–17.
21. Holmes R. J. The importance of sampling in resource definition, process control, metallurgical accounting and sales of mineral products // XXVIII international Mineral Processing Congress. Quebec City, Canada. 2016. Paper ID 804. **ИМАБ**

REFERENCES

1. Gy. P. Sampling of Particulate Material: Theory and Practice. Elsevier: Amsterdam, 1979 and 1982, 431 p.
2. Lotter N. O. Evans C. L. Engström K. Sampling A key tool in modern process mineralogy/ Minerals Engineering. V. 116, 15 January 2018. pp. 196–202.
3. Holmes, R. J. Challenges of developing ISO sampling standards. Fifth World Conference on Sampling & Blending. Conference Proceedings, Gecamin Ltda, 2011, pp. 57–63.
4. Esbensen, K. H, Minkkinen, P. Illustrating Sampling standards How to guarantee complete understanding and TOS compliance? Fifth World Conference on Sampling & Blending, Conference Proceedings, Gecamin Ltda, 2011, pp. 383–392.
5. Dihalu, D. S. Geelhoed, B. A. Critique of Gy's Sampling Theory. Published 2012. Computer Science dx.doi.org/10.1255/tosf.11.
6. Pitard F. F. Pierre Gy's Sampling Theory and Sampling Practice: Heterogeneity, Sampling Correctness and Statistical Process Control. 2nd Edn. CRC Press, 1993.
7. Geelhoed, B. Approaches in Material Sampling, Delft University Press, 2010. 152 p.
8. Geelhoed, B. Is Gy's Formula for the Fundamental Sampling Error accurate? Experimental evidence. Minerals Engineering, 2011, 24 (2): pp. 169–173.
9. Dihalu D. S, Geelhoed B. A new multi-axial particle shape factor application to particle sampling. Analyst, 2011, no. 136 (18): 3783–8.
10. Karpenko N. V. *Oprobovanie i kontrol' kachestva produktov obogashcheniya rud* [Testing and quality control of ore dressing products]. Moscow: Nedra. 1987. 215 p. [In Russ]
11. Lyapin A. G. Engineering and analytical control of technologies of extraction and processing of mineral raw materials. *Gornyj zhurnal*, 2009, no. 4, pp. 14–16. [In Russ]
12. Morozov V. V., Stolyarov V. F., Kononov A. M. Improving the efficiency of flotation management using in-line pulp composition analyzers. *Obogashchenie rud*, 2003, no. 4, pp. 33–36. [In Russ]
13. Zaitsev V. A., Makarova T. A., Barkov A. V., Bakhtiyarov A. V., Moskvina L. N. Non-destructive control of the composition of polymetallic ores and products of the processing cycle. *Cvetnye metally*, 2006, no. 8, pp. 60–67. [In Russ]
14. Kozin V. Z. *Oprobovanie mineral'nogo syr'ya na obogatitel'nykh fabrikah: uchebnyk dlya VUZov* [Testing of mineral raw materials at processing plants: textbook for universities]. V. Z. Kozin; Ural State Mining University. Yekaterinburg: Publishing house of UGSU, 2018. 208 p. [In Russ]
15. Ganbaatar Z., Dalgerbat L., Duda A. M., Morozov V. V. Management of copper-molybdenum ore enrichment on the basis of complex radiometric ore analysis. *Materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya «Plaksinskie chteniya»*. Yekaterinburg: FDN Publishing House, 2011. pp. 118–121. [In Russ]

16. Davaasambu D., Erdenetsogt D. Optimization of flotation processes of copper-molybdenum ores on the basis of operational analysis of mineral composition. / Scientific bases and practice of processing ores and technogenic raw materials: *Materialy XX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Yekaterinburg: Publishing house "Fort Dialog-Iset", 2015. pp. 52–56. [In Russ]

17. Kozin V. Z., Komlev A. S. Experimental determination of random sampling errors at processing plants. *Obogashchenie rud*. 2017, no. 2, pp. 44–48. [In Russ]

18. Stupakova E. V. Determination of errors of standard samples of the composition of gold-bearing ores. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*, no. 6, 2019, pp. 136–143. [In Russ]

19. Gleeson D. Getting to the core. *International Mining*. February 2019. pp. 64–68.

20. Moore P. Making if elementary. *International Mining*. February 2018, pp. 10–17.

21. Holmes R. J. The importance of sampling in resource definition, process control, metallurgical accounting and sales of mineral products. XXVIII international Mineral Processing Congress. Quebec City, Canada. 2016. Paper ID 804.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Козин Владимир Зиновьевич*¹ — докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых, декан горно-механического факультета,

*Комлев Алексей Сергеевич*¹ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник;

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kozin V. Z.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Mineral Processing Department, Dean of the Mining and Mechanics Faculty, e-mail: tails2002@inbox.ru;

*Komlev A. S.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher;

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 25.05.2021; получена после рецензии 21.06.2021; принята к печати 10.10.2021.

Received by the editors 25.05.2021; received after the review 21.06.2021; accepted for printing 10.10.2021.

