

А.Ю. Прокопенко, С.А. Денисов, А.С. Морковин, Д.К. Нестеров

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ МАЯТНИКОВОГО ПРОБООТБОРНИКА С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Ошибка пробоотбора маятниковых пробоотборников выше, чем у устанавливаемых на пересыпку, и зависит от многих факторов. Изучены параметры работы маятникового пробоотборника с помощью компьютерного моделирования, определен диапазон рабочих режимов, определены технические требования к маятниковому пробоотборнику для достижения максимальной достоверности пробоотбора. Проведены исследования ошибки пробоотбора маятникового пробоотборника на основе моделирования методом конечных элементов. На основании данных, полученных в результате моделирования была проведена оценка факторов, влияющих на качество пробоотбора в непрерывном потоке сыпучего материала. Установлено, что для качественной работы маятникового пробоотборника необходимо поддержание стабильной скорости пробоотбора на оптимальном уровне. Установлены факторы, влияющие на оптимальную скорость пробоотбора. Для ряда скоростей конвейера и грансостава материала были рассчитаны оптимальные скорости пробоотбора и параметры двигателя, необходимые для поддержания этой скорости. Сделан вывод о необходимости компьютерного моделирования работы маятникового пробоотборника в конкретной точке установки и с конкретными параметрами производства для верного подбора технических характеристик пробоотборника и минимизации ошибки пробоотбора.

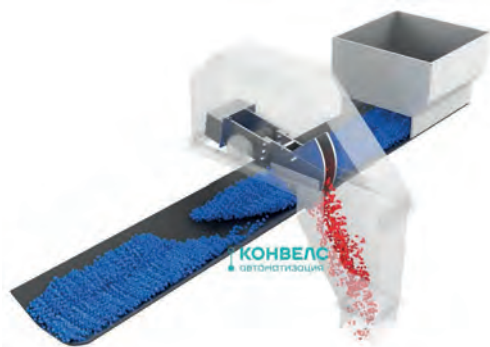
Ключевые слова: руда, качество, пробоотбор, маятниковый пробоотборник, пробоотбор с конвейера, репрезентативность, грансостав.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-193-201

Для увеличения показателей эффективности предприятий горно-металлургического комплекса необходимо знать точные параметры текущего производства. Современные вычислительные мощности и средства механизации позволяют с высокой скоростью реагировать на изменение параметра для его компенсации, а современные лабораторные методы позволяют точно определять значение параметра. В этой ситуации, становится критически важным быстро и качественно подготавливать для лаборатории образцы, достоверно отображающие состояние обрабатываемого материала [1, 2].

На стадии подготовки образца для лаборатории неизбежно нарушается соответствие между характеристиками обрабатываемого материала и характеристиками отобранного для лаборатории образца (репрезентативность пробы). Возникает так называемая ошибка пробоотбора.

Множество литературы посвящено стационарному пробоотбору, при котором материал находится в состоянии покоя [3]. В данном случае исследуется методика пробоотбора из потока с непрерывным неупорядоченным движением нештучного продукта [4]. В случае движущегося материала возникают



Моделирование маятникового пробоотбора

сложности, связанные с необходимостью отбора пробы всего сечения потока. Наиболее широко методика данного пробоотбора, величина ошибки и степень репрезентативности пробоотбора рассмотрены в трудах французского инженера Пьера Ги [5]. Результаты этих исследований были включены в современные стандарты, в частности, международный стандарт ISO 3082 «Ironores — Sampling and sample preparation procedures» [6], составленный с участием специалистов из РФ.

Основные требования к пробоотборникам, приведенные в ISO 3082, включают в себя:

- отсутствие утечек либо просыпаний отбираемого материала;
- отсутствие препятствий для прохода отбираемого материала;
- достаточный размер пробоотборника для вмещения в себя всего объема пробы;
- отсутствие налипания внутри пробоотборника или возможности засора пробоотборника;
- отсутствие перемешивания отобранного материала с любым другим, не имеющим отношения к пробе;
- отсутствие изменений измеряемых характеристик материала в результате пробоотбора;
- створ ковша пробоотборника должен пересекать весь поток материала;
- створ ковша пробоотборника должен пересекать поток перпендикулярно направлению течения материала;
- скорость ковша не должна изменяться более чем на $\pm 5\%$;
- ковши с прямым движением должны иметь прямое направление раствора, ковши с круговым движением должны иметь радиальный раствор;
- плоскость раствора ковша не должна быть вертикальной или близка к вертикальной.

Как соответствующие этим требованиям, в работах Пьера Ги описываются пробоотборники, устанавливаемые на пересыпке материала (рис. 1). Также, в случае необходимости отбора проб непосредственно с конвейерной ленты, предлагаются методики, требующие остановки конвейера.

К сожалению, во многих ситуациях, установка пробоотборника на пересыпку либо остановки конвейера для проведения пробоотбора экономически нецелесообразны. В такой ситуации, в мировой практике широко используются пробоотборники маятниковой схемы. Данные пробоотборники упоминаются в ГОСТ Р ИСО 11648-2-2009 [7]. В них

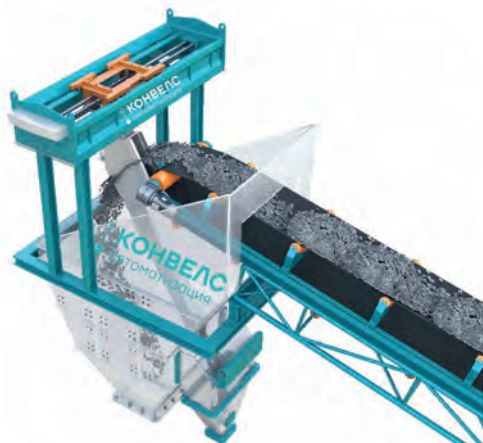


Рис. 1. Отбор материала на пересыпке с помощью пересечного пробоотборника — осуществляется отведение отбираемой части материала вбок от основного потока

ковш пробоотборника, совершая вращательное движение, сдвигает отобранную массу материала вбок с ленты конвейера (рис. 2).

Данная методика не обеспечивает выполнение части требований к пробоотборникам, приведенным в стандартах. В частности:

- мелкие частицы материала проходят в зазор между кромками ковша и конвейерной лентой;
- плоскость раствора ковша вертикальна или близка к вертикальной.

В связи с этим, необходимо подробное исследование репрезентативности пробы, отбираемой маятниковым пробоотборником при различной крупности отбираемого материала и различной скорости конвейерной ленты.

Также, в случае с маятниковым пробоотборником, требование о неизменности скорости ковша соблюсти гораздо труднее, чем в случае с пробоотборником, установленным на пересыпке материала. Двигателю необходимо преодолеть сопротивление материала и сдвинуть его с конвейерной ленты.

В связи с этим, важным параметром становится мощность двигателя пробоотборника.

Задачей данной работы является:

- изучение с помощью компьютерного моделирования параметров работы маятникового пробоотборника в различных режимах;
- определение диапазона рабочих режимов, в которых достигается максимально возможная репрезентативность пробоотбора;
- определение технических требований к маятниковому пробоотборнику в этих режимах.

Моделирование

Для решения поставленной задачи применялось математическое моделирование маятникового пробоотбора ме-



Рис. 2. Маятниковый пробоотборник

тодом конечных элементов в пакете ROCKYDEM Simulation.

Был проведен расчет для четырех различных грансоставов (25 мм-, 50 мм-, 100 мм-, 150 мм-) и пяти различных скоростей ковша (0,6 м/с, 0,8 м/с, 1 м/с, 1,2 м/с, 1,5 м/с). Ширина ковша равнялась утроенному максимальному диаметру частиц материала, согласно требованиям стандартов ГОСТ [8] и ISO [6]. Частицы разного диаметра были расположены равномерно по всему сечению конвейера. Пробоотбор производился на небольшом удалении от места загрузки конвейера с целью исключения влияния

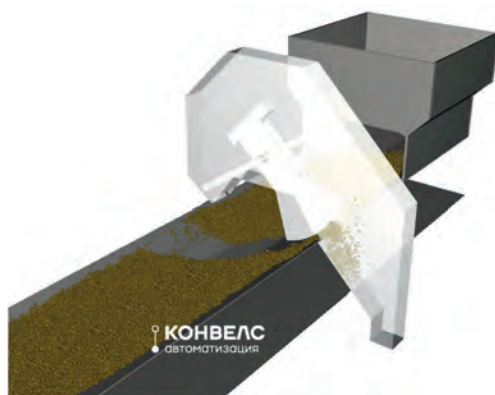


Рис. 3. Моделирование маятникового пробоотбора. Расход = 530 т/ч, насыпная плотность частиц = 1600 кг/м³, скорость конвейера = 1 м/с, наклон роликов конвейера — 35°/0°/35°, ширина конвейера — 1,2 м

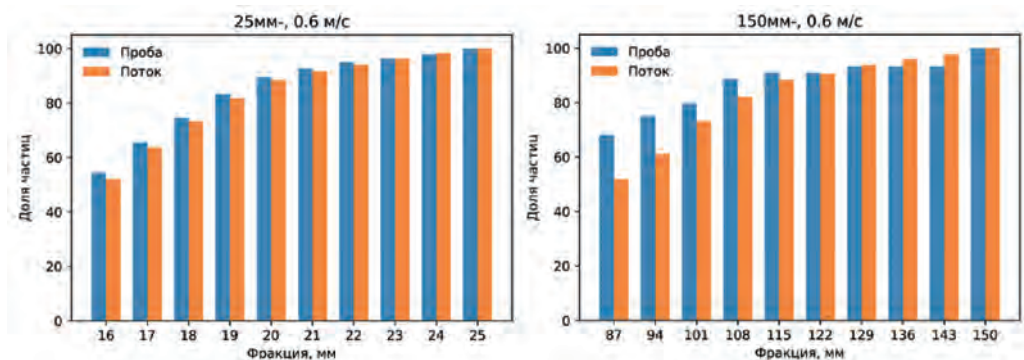


Рис. 4. Сравнение результатов пробоотбора для разных грансоставов 25 мм- и 150 мм- при движении ковша со скоростью 0,6 м/с

сегрегации материала [9]. Общее количество частиц для каждого моделирования составило 62 000.

В качестве параметра материала, по которому оценивается репрезентативность пробы, был принят гранулометрический состав материала. Это сделано потому, что на гранулометрический состав влияет множество дополнительных факторов, связанных с самим пробоотбором — например дробление частиц [10], а большинство современных исследований рассматривают влияние пробоотбора лишь на содержание того или иного элемента в финальной пробе [2, 11].

Формула Пьера Ги для ошибки пробоотбора, в таком случае, принимает следующий вид:

$$SE = \frac{\sum_{i=1}^n |f(a_i) - g(a_i)|}{n},$$

где $a_1, a_2, \dots, a_n$ — разбиение интервала $0.5x, x$ на n равных отрезков; $f(a_i)$ — относительное количество частиц диаметра меньше a_i в потоке; $g(a_i)$ — относительное количество частиц диаметра меньше a_i в пробе; SE — ошибка пробоотбора.

Результаты вычислений ошибки пробоотбора серии экспериментов для различного максимального размера частиц и различных скоростей движения ковша представлены в табл. 1

Также дополнительно для 300 мм ковша было проведено несколько одинаковых экспериментов на скорости 1 м/с с целью определения колебаний точности. Результат серии моделирования приведен в табл. 2.

Как можно заметить, ошибка пробоотбора значительно изменяется даже при повторении эксперимента в посто-

Таблица 1

Ошибка пробоотбора

	25- мм (ширина ковша 75 мм)	50- мм (ширина ковша 150 мм)	100- мм (ширина ковша 300 мм)	150- мм (ширина ковша 450 мм)
0,6 м/с	0,892%	2,127%	1,763%	4,157%
0,8 м/с	0,431%	0,656%	1,637%	1,808%
1 м/с	0,323%	1,027%	4,035%	5,187%
1,2 м/с	0,321%	0,534%	1,106%	1,030%
1,5м/с	0,763%	1,219%	1,190%	2,009%

Таблица 2

Серия моделирования ошибки пробоотбора при одних и тех же параметрах процесса. Ширина ковша — 300 мм, скорость ковша — 1 м/с

1	2	3	4	5	6
4,524%	4,071%	1,295%	2,201%	1,835%	1,318%

янных условиях. Однако, при всех прочих равных параметрах потока, пробоотбор крупных частиц дает стабильно большую ошибку. Из этого можно сделать следующие выводы:

- для обеспечения репрезентативности пробоотбора, маятниковый пробоотборник должен отбирать большее количество точечных проб на партию, чем пробоотборники на пересыпке;
- при увеличении размера частиц требуется дополнительно увеличивать количество точечных проб на партию.

Кроме того, можно сделать вывод о том, что на ошибку пробоотбора сильное влияние оказывает скорость ковша.

Для качественного пробоотбора необходимо чтобы в результирующую пробу полностью попадал материал из поперечного сечения потока [12]. Для про-

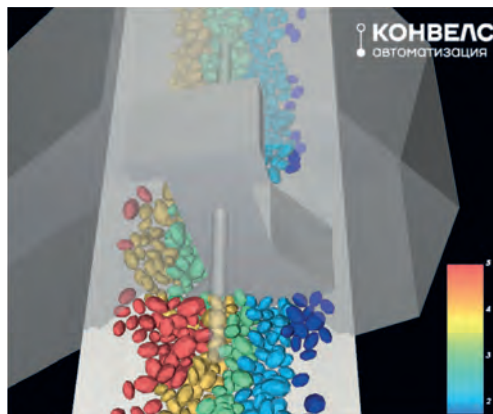


Рис. 5. Моделирование равномерности пробоотбора

верки данного эффекта поток условно был поделен на 5 вертикальных секторов (рис. 5). После чего измерялась доля частиц из каждого сектора в результиру-

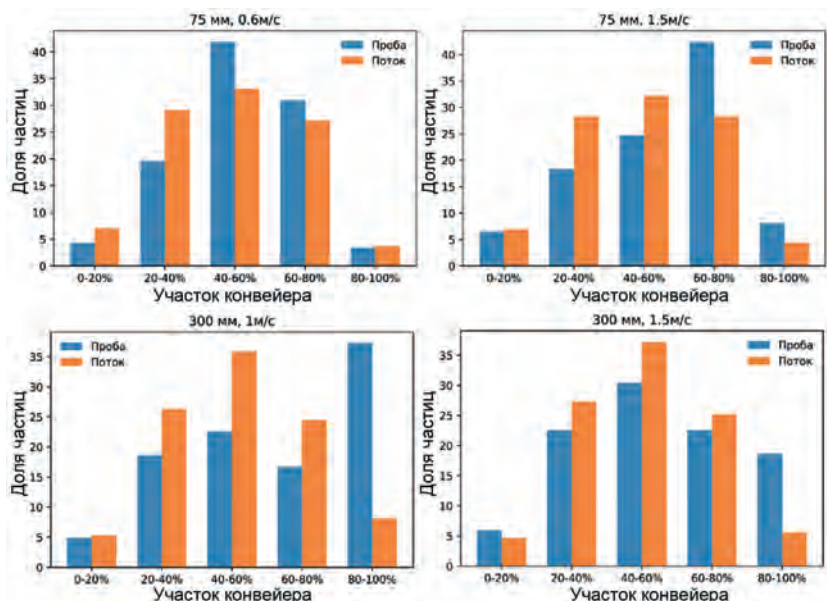


Рис. 6. Зависимость равномерности отбора материала от размера частиц и скорости пробоотборника

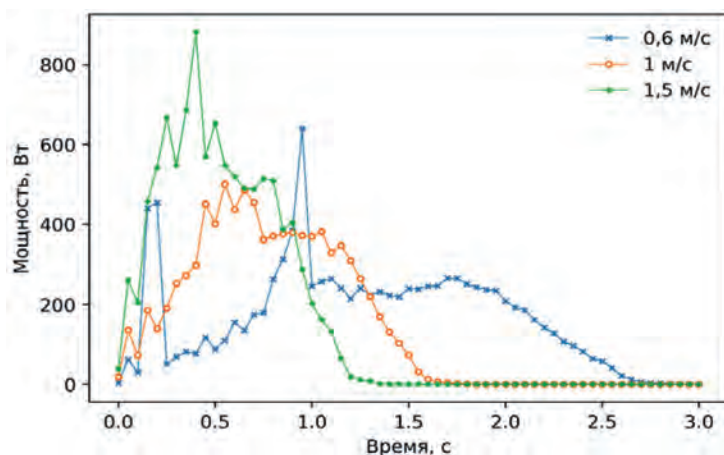


Рис. 7. Необходимая мощность для поддержания заданной скорости. Ширина ковша — 75 мм

ющей пробе. Результаты приведены на рис. 6.

Как можно видеть, для крупных частиц лучшая равномерность пробоотбора достигается при больших скоростях, а для маленьких наоборот. Кроме размера частиц и скорости ковша, также следует учитывать скорость и геометрию конвейера, геометрию самого ковша и множество других параметров, поэтому для каждого конкретного случая применения маятникового пробоотбора рекомендуется применять математическое моделирование для определения его оптимальных параметров.

Скорость ковша во время движения поддерживалась на постоянном уровне, однако сопротивление материала было непостоянным. В частности, это следует из колебаний ошибки самого пробоотбора. Для улучшения точности необходимо проводить отбор проб как можно чаще, что увеличивает нагрузку на оборудование.

Таким образом получаем, что важным параметром маятникового пробоотборника является мощность двигателя, которая может обеспечить поддержание равномерной скорости на всем интервале отбора пробы, учитывая не-

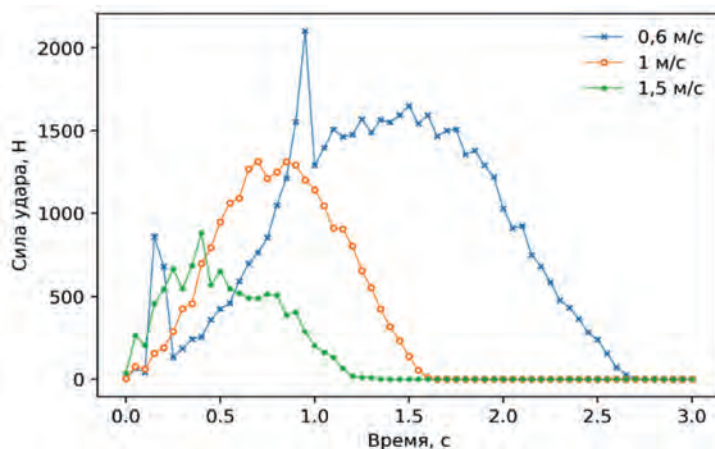


Рис. 8. Давление материала на ковш. Ширина ковша — 75 мм

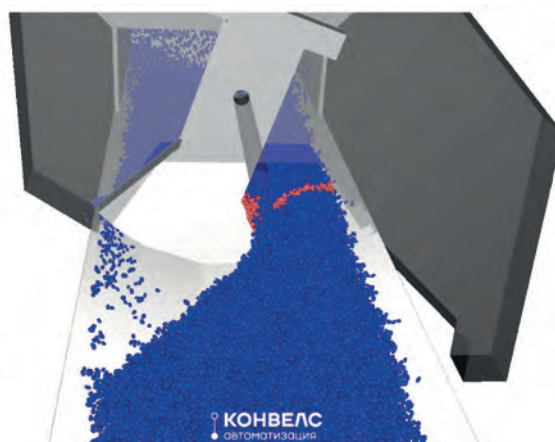


Рис. 9. Момент максимальной нагрузки на ковш

равномерности потока. На рис. 7 и 8 приведены значения мгновенной мощности, которая необходима для поддержания заданной скорости при пересечении потока материала.

Как можно заметить на рис. 7, в целом, с увеличением скорости ковша для отбора пробы требуется более мощный двигатель. Однако, при слишком медленном пробоотборе, материал начинает накапливаться у стенок ковша, затрудняя его движение (рис. 8). Рассмотрим этот эффект подробнее на примере 75 мм ковша, движущегося со скоростью 0,6 м/с. Наибольшая нагрузка на

пробоотборник соответствует моменту, когда ковш полностью погрузился в поток материала (рис. 9). При дальнейшем движении, накопившийся у стенок материал станет обходить ковш и нагрузка на пробоотборник упадет.

Таким образом, для выбора оптимальной мощности двигателя пробоотборника следует учитывать не только необходимую скорость ковша, но также расход материала и геометрию конвейера. В табл. 3 приведены максимальные значения мощности, необходимые для поддержания равномерного движения ковша при заданных условиях.

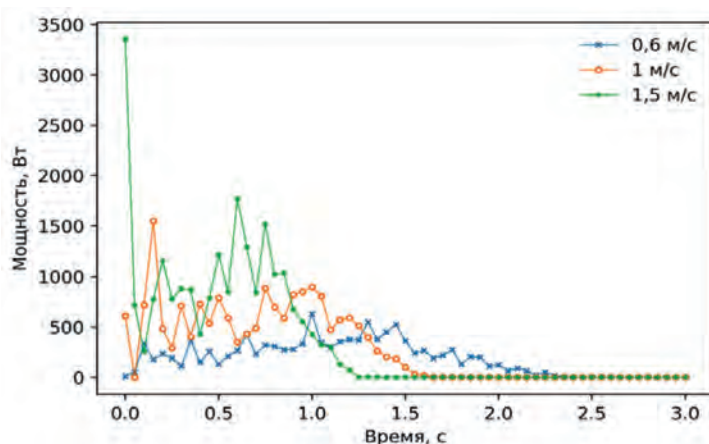


Рис. 10. Необходимая мощность для поддержания заданной скорости. Ширина ковша — 450 мм

Таблица 3

Максимальные значения мощности двигателя, необходимые для поддержания заданной скорости, Вт

	25-мм (ширина ковша 75 мм)	50-мм (ширина ковша 150 мм)	100-мм (ширина ковша 300 мм)	150-мм (ширина ковша 450 мм)
0,6 м/с	638	590	489	629
0,8 м/с	711	652	801	1061
1 м/с	500	1061	1133	1547
1,2 м/с	1013	777	1348	1908
1,5 м/с	881	1253	1508	3353

С другой стороны, при отборе пробы материала большого диаметра, максимальное сопротивление зачастую приходится на начальный момент (рис. 10).

Это происходит в следствии того, что кромка ковша попадает в точности на грань одной из частиц и не может ни оттолкнуть ее, ни протолкнуть внутрь ковша из-за давления остального материала.

Заключение

Маятниковая схема устройства пробоотборника не зря не значится в числе рекомендуемых стандартом ISO. Как можно заметить, репрезентативность пробоотбора таким методом сопряжена с рядом проблем. Для каждого частного случая использования маятникового пробоотборника требуется отдельный глубокий анализ ошибки пробоотбора.

По результатам данного анализа, для каждой точки установки требуется вычислять оптимальную скорость движения ковша, количество точечных проб за партию продукта, минимальную мощность двигателя. Из-за возросшего числа точечных проб за партию, придется использовать систему дальнейшей подготовки проб, рассчитанную на большее количество материала. Также потребуются больший коэффициент сокращения проб.

Тем не менее, во многих производственных процессах маятниковый пробоотбор с конвейерной ленты остается

единственным возможным технологически. Для повышения его репрезентативности, возможно производить компьютерное моделирование процесса пробоотбора, с дальнейшим вычислением всех требуемых параметров. Для этого требуются современные программные комплексы и высокопроизводительные вычислительные машины.

Компания ООО «КОНВЕЛС Автоматизация», предлагая своим клиентам системы пробоотбора, включает в предложение также полный спектр математического моделирования данной системы. Мы отдельно вычисляем все параметры предлагаемого устройства, используя для моделирования все имеющиеся данные по характеристикам производства в точке установки. Это позволяет максимально снизить ошибку пробоотбора даже при использовании такого устройства, как маятниковый пробоотборник.

Выводы

По результаты проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- При отборе точечных проб сыпучего материала с конвейерной ленты с помощью маятникового пробоотборника точечные пробы будут обладать ошибкой пробоотбора по гранулометрическому составу составляет от 1% для крупных классов до 5% для мелких классов. В таком случае требуется увеличе-

ние числа точечных проб для получения репрезентативной выборки материала.

- Увеличение числа точечных проб приводит к увеличению производительности маятникового пробоотборника, однако скорость отбора не может быть пропорционально увеличена, так как значительно влияет на репрезентативность отбора отдельных частей потока материала. Для определения оптимального режима работы маятникового пробоотборника

ка для достижения минимальной ошибки пробоотбора требуется проводить моделирование для конкретного применения.

- Для минимизации ошибки пробоотбора требуется использовать двигатель соответствующей производительности для поддержания постоянной скорости отбора пробы. С помощью математического моделирования необходимую мощность двигателя возможно рассчитать с высокой точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туртыгина Н. А. Сущность проблемы контроля и управления качеством руд на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 6. — С. 372–373.
2. Karin Engström, Kim H. Esbensen Evaluation of sampling systems in iron ore concentrating and pelletizing processes — Quantification of Total Sampling Error (TSE) vs. process variation // Minerals Engineering, 2018, vol. 116, pp. 203–208.
3. Морозов В. Б., Морозова Т. Г. Методологическое и техническое обеспечение процесса получения репрезентативных проб // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2015. — № 7. — ч. 2. — С. 14–21.
4. Горелов А. С. Методология автоматизированного статистического контроля массовых производств // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2010. — № 2. — ч. 1. — С. 173–186.
5. Pierre M. Gy. Sampling of particulate materials. Theory and practice. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. 1979. 431p.
6. ISO 3082:2017(E) Iron ores — Sampling and sample preparation procedures. Geneva: International Organization for Standardization. 2017. 81 p.
7. ГОСТ Р ИСО 11648-2-2009 Статистические методы. Выборочный контроль нештучной продукции. Ч. 2. — М.: Стандартинформ, 2010. — 139 с.
8. ГОСТ 14180-80 Руды и концентраты цветных металлов. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 19 с.
9. Ломоносов Г. Г., Туртыгина Н. А. Явление сегрегации рудной массы и его влияние на формирование качества продукции горнорудного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 6. — С. 37–40.
10. Pawlus P., Zelasko W. The importance of sampling interval for rough contact mechanics // Wear, 2012, vol. 276–277, pp. 121–129.
11. Claude Bazin, Daniel Hodouin, Raphaël Mermillod Blondin. Estimation of the variance of the fundamental error associated to the sampling of low grade ores // International Journal of Mineral Processing, 2013, vol. 124, pp. 117–123.
12. Barry A. Wills, James Finch. Wills' Mineral Processing Technology. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. 2016. 498 p. **ПЛАТ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Прокопенко Алексей Юрьевич¹ — генеральный директор,
e-mail: alexei.prokopenko@konvels.com,

Денисов Сергей Александрович¹ — заместитель генерального директора по развитию,
e-mail: sergei.denisov@konvels.com,

Морковин Александр Сергеевич¹ — руководитель отдела мат. моделирования,
e-mail: alexander.morkovin@konvels.com,

Нестеров Дмитрий Константинович¹ — руководитель конструкторского отдела,
e-mail: dmitry.nesterov@konvels.com,

¹ ООО «КОНВЕЛС Автоматизация».