

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕЗИНТЕГРАЦИИ В ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦАХ БАРАБАННОГО ТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

И. И. Белоглазов<sup>1</sup>, Д. С. Сабинин<sup>1</sup>, М. Ю. Николаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

**Аннотация:** В представленной работе был использован метод дискретных элементов, с учетом процессов измельчения материала, для описания особенностей и режимов работы шаровых мельниц барабанного типа с использованием типичной руды. Применяемый метод дискретных элементов, моделирующий движение шаров и горных пород в обогащательном оборудовании, позволяет понять структуру потока и характер измельчения материала. Он также предоставляет информацию об энергии, рассеиваемой при каждом столкновении дискретных частиц. Явления рассеяния энергии определяют характер и интенсивность измельчения, при этом процесс измельчения можно охарактеризовать с помощью энергетических спектров столкновений. В представленной статье исследуются количественные структурные изменения в шаровой мельнице барабанного типа при различной скорости вращения барабана. Моделирование показывает, что изменение скорости вращения мельницы существенно влияет на процесс измельчения. Для изучения процесса измельчения были проведены экспериментальные исследования с использованием лабораторной установки. На основе полученных данных была построена трехмерная динамическая модель мельницы, включающая в себя шары и исходный материал. Полученные результаты могут быть использованы для разработки цифрового двойника технологического оборудования для прогнозирования текущего состояния объекта и выдачи управляющих воздействий в систему автоматического управления.

**Ключевые слова:** шаровая мельница, измельчение, минеральное сырье, дезинтеграция, имитационное моделирование, метод дискретных элементов, рудоподготовка, частотный привод, цифровой двойник.

**Благодарность:** Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год №FSRW-2020–0014.

**Для цитирования:** Белоглазов И. И., Сабинин Д. С., Николаев М. Ю. Моделирование процесса дезинтеграции в шаровых мельницах барабанного типа с использованием метода дискретных элементов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 268–282. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_268.

### Modeling the disintegration process for ball mills using dem

I. I. Beloglazov<sup>1</sup>, D. S. Sabinin<sup>1</sup>, M. Yu. Nikolaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, 199106, Russia

**Abstract:** In the presented work, the method of discrete elements was used, taking into account the processes of grinding the material, to describe the features and modes of operation of drum-type ball mills using typical ore. The applied method of discrete elements, which simulates the movement of balls and rocks in the processing equipment, makes it possible to understand the structure of the flow and the nature of material grinding. It also provides information on the energy dissipated in each collision of discrete particles. The phenomena of energy dissipation determine the nature and intensity of grinding, while the grinding process can be characterized using energy collision spectra. In the presented article, we investigate the quantitative structural changes in a drum-type ball mill at different drum rotation speeds. Modeling shows that changing the speed of rotation of the mill significantly affects the grinding process. To study the grinding process, experimental studies were carried out using a laboratory setup. Based on the data obtained, a three-dimensional dynamic model of the mill was built, including balls and source material. The results obtained can be used to develop a digital twin of technological equipment for predicting the current state of an object and issuing control actions to an automatic control system.

**Key words:** Ball mill, grinding, mineral ore, disintegration, simulation, discrete element method, ore preparation, frequency drive, digital twin.

**For citation:** Beloglazov I. I., Sabinin D. S., Nikolaev M. Yu. Modeling the disintegration process for ball mills using dem. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6–2):268–282. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_268.

---

## Введение

Большинство мельниц работают в режиме, не позволяющем так или иначе влиять на технологический процесс, энергозатраты, подачу воды, а значит, изменять их производительность, что негативно влияет на предприятие, где этот объект расположен [1–2]. Этому способствует наличие таких негативных факторов, как повреждение футеровки, наличие застойных зон, длительное время отклика, непостоянство крупности как исходного сырья, так и получаемого продукта [3].

Целью данной работы является моделирование процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице. Конечной целью является разработка системы управления и оптимизация работы шаровой мельницы барабанного типа посредством технологий цифрового двойника для увеличения производительности объекта и минимизации энергозатрат [4].

Моделирование процессов измельчения с использованием метода дис-

кретных элементов является достаточно сложной задачей и заключается в установлении модельных параметров, определяющих взаимодействие частиц между собой, с шарами и футеровкой мельницы. Кроме этого, необходимо учитывать коэффициенты динамического и статического трения, определить параметр восстановления для всех пар материалов, взаимодействующих в процессе измельчения. Более того, не существует регламентированных методик для определения указанных параметров. Поэтому важным этапом является проведение экспериментального исследования с последующим моделированием, что позволяет изучить влияние варьируемых факторов на процесс измельчения. При этом цифровая модель позволяет исследователю наглядно продемонстрировать недоступные места исследуемого объекта, что при проведении реального эксперимента сделать невозможно [5–7].

Цифровой двойник мельницы — это виртуальный прототип реального объ-

екта, действующего на производстве, который позволяет оценить и спрогнозировать рабочие характеристики процесса измельчения и объекта при различных режимах работы, условий окружающей среды и других факторов, влияющих на процесс и объект, а также наглядно продемонстрировать деформацию конструкции объекта на протяжении его жизненного цикла [8–9].

Проведение прогноза работы и инженерного анализа объекта с помощью такой технологии позволяет получить подробные сведения об объекте, его параметрах работы, изменениях характеристик (износ) на протяжении жизненного цикла. Использование современных программных средств для динамического моделирования процесса и выдача управляющих воздействий в систему автоматического управления позволит реализовать концепцию цифрового двойника. Система управления, основанная на использовании динамической модели, позволит предсказать изменения параметров работы реального объекта и внести коррективы в режиме реального времени.

### **Методы и модели**

Для проведения опытов по кинетике измельчения была использована лабораторная шаровая мельница. На основе объема шаровой мельницы и насыпной плотности измельчающей среды рассчитывалась степень заполнения мельницы стальными шарами, которая составила 40%. Скорость вращения барабана шаровой мельницы в эксперименте задавалась как 80% от критической. Измельчение проводилось в сухом виде. После каждого временного интервала измельчения проводился ситовый анализ полученного продукта.

Для ситового анализа был использован набор сит с модулем шкалы 2,

начиная с 3,2 мм до 0,1 мм. Навеска пробы для ситового анализа засыпалась в ситовый набор, после чего набор ставился на встряхиватель на десять минут. После встряхивания проводилось взвешивание классов, полученных на ситах.

Создание трехмерной динамической модели шаровой мельницы осуществлялось с использованием программного обеспечения SpaceClaim и Rocky DEM. Последовательно выполнялись создание трехмерной модели и дальнейшая настройка динамических параметров модели, свойств материала конструкции объекта, а также настройка характеристик измельчаемого материала и шаров.

### **Описание модели разрушения**

Для твердых частиц, состоящих лишь из одного элемента, только некруглые твердые формы, такие как многогранник, брикет, граненый цилиндр и произвольные пользовательские частицы (импортированные), совместимы с расчетами разрушения [10–11].

Rocky включает модель для прогнозирования мгновенного разрушения частиц на основе энергии напряжения, возникающей при столкновении со стенками или другими частицами. Эта модель работает только с многогранными выпуклыми частицами, поэтому никакие сферические, закругленные или вогнутые формы не могут сломаться в Rocky при использовании этой модели. Вероятность поломки Ab-T10 основана на модели, предложенной Vogel & Peukert [12], и последующей модификации, предложенной Shi & Kojojić [13]. Эта модель разрушения рассматривает каждую частицу как единое целое, которое может быть мгновенно разбито на фрагменты в зависимости от получаемой энергии удара. Полученные осколки сохраняют как

массу, так и объем. Модель разрушения Ab-T10, реализованная в Rocky DEM, основана на алгоритме визуализации частиц трещины Вороного и вероятности энергии разрушения и результирующем распределении размеров фрагментов [14–15].

В Rocky общая удельная энергия контакта  $e_c$  вычисляется путем суммирования работы, выполненной контактными силами во всех точках контакта в частице в течение периода нагрузки. Чтобы разрушить частицу,  $e_c$  должна быть больше минимальной энергии разрушения частицы  $e_{min}$ . Эта минимальная энергия разрушения связана с размером частиц выражением

$$e_{min} = e_{ref} \left( \frac{L_{ref}}{L} \right), \quad (1)$$

где  $e_{ref}$  — значение минимальной удельной энергии, приложенной к измельчаемой частице кВт·ч/т. Данный параметр называется эталонным минимумом удельной энергии в пользовательском интерфейсе Rocky;  $L_{ref}$  — эталонный размер частиц;  $L$  — фактический размер частиц.

Чтобы учесть энергию при последовательных столкновениях, проверка разрушения производится с учетом совокупного значения удельной энергии контакта  $e_{cum}$ . Если  $e_c^t$  — текущее значение удельной энергии контакта в заданный момент времени во время фазы нагрузки, значение  $e_{cum}$  будет обновлено, только если  $e_c^t > e_{min}$  и  $e_c^t < e_{max}$ , где  $e_{max}$  — максимальное значение энергии контакта, зарегистрированное на частице до последнего обновления значения  $e_{cum}$ . Когда эти условия выполнены, обновление производится в соответствии с выражением

$$e_{cum} = e_{cum} + e_c^t - \left( e_c^{t-\Delta t}, e_{max} \right), \quad (2)$$

где  $e_c^{t-\Delta t}$  — значение удельной энергии воздействия к измельчаемой частице, рассчитанное на предыдущем временном шаге.

Каждый раз, когда частица разгружается и значение  $e_c^t$  уменьшается ниже  $e_{min}$ , значение  $e_{max}$  сбрасывается до нуля, поэтому может начаться новый цикл загрузки, в котором значение  $e_{cum}$  сможет снова увеличиться [16–18].

В модели Ab-T10 вероятность разрушения для данного суммарного значения удельной энергии контакта рассчитывается как

$$P(e_{cum}) = 1 - \exp \left( -b \cdot e_{cum} \frac{L}{L_{ref}} \right), \quad (3)$$

где  $b$  — параметр материала, характеризующий сопротивление частиц разрушению при соударении.

Частица разрушится, если значение  $P(e_{cum})$ , вычисленное по уравнению (3), будет больше, чем текущая сила частицы. Выполнение данного условия приводит к разрушению самой частицы и формированию фрагментов частиц по алгоритму Воронова с распределением размеров этих генерируемых частиц по Годену-Шуману. В этом случае модель разрушения находится по формуле

$$t_{10} = A \left[ 1 - \exp \left( -b \cdot e_{cum} \frac{L}{L_{ref}} \right) \right], \quad (4)$$

где  $t_{10}$  — выход подрешетного продукта при рассеивании материала на сите с размером ячейки в 10 раз меньше размера частицы, подвергавшейся разрушению;  $A$  — максимальное значение  $t_{10}$  для измельчаемого материала. Представленные в уравнении параметры  $A$  и  $b$  зависят от характеристик руды и определяются в ходе экспериментальных исследований.

Новые фрагменты, образовавшиеся в результате разрушения, могут дезин-

тегрироваться дальше, если они будут подвергнуты дополнительному воздействию, в результате чего образуются фрагменты еще меньшего размера. В итоге обновление  $e_{cum}$  с использованием уравнения (2) осуществляется в течение определенного количества временных шагов после события разрушения.

При увеличении коэффициента  $t_{10}$  соответственно будет увеличиваться выход мелких частиц, таким образом данный коэффициент соответствует индексу тонины помола. Величина параметра  $A$  лимитирует значение  $t_{10}$ , т. е. при увеличении приложенной энергии сверх определенного предела образование готового класса практически не происходит. Величина  $A \cdot b$  определяет наклон зависимости в начальной точке и, по сути, соответствует показателю прочности горной породы.

Полное распределение размеров частиц определяется по значению  $t_{10}$  в предположении распределения Годена–Шумана [21–22]:

$$Y = 10 \cdot t_{10} \left( \frac{X}{L} \right), \quad (5)$$

где  $Y$  — совокупный процент от массы проходящих осколков;  $x$  — размер просеивающего сита;  $L$  — размер разрушенной частицы.

## Результаты

### Лабораторное исследование

Для проведения опытов по измельчению выбрана навеска руды массой 150 грамм. Частота оборотов мельницы составила 120 об/мин при степени заполнения мельницы шарами 40%. Ситовой анализ исходной руды представлен на рис. 1.

Анализ результатов (табл. 1) показывает, что данные руды склонны к ошломованию, так как в классе крупности  $-0,1+0$  мм выход класса составляет 8,13%. На рис. 1 представлена графическая интерпретация данных по гранулометрическому составу исходной пробы.

Анализ данных, представленных на рис. 1, показывает, что полученная кривая имеет выпуклую форму, что говорит о некотором преобладании в пробе тонких классов. Полученные кривые построены корректно, симметричны друг относительно друга и пересекаются в точке 50%.

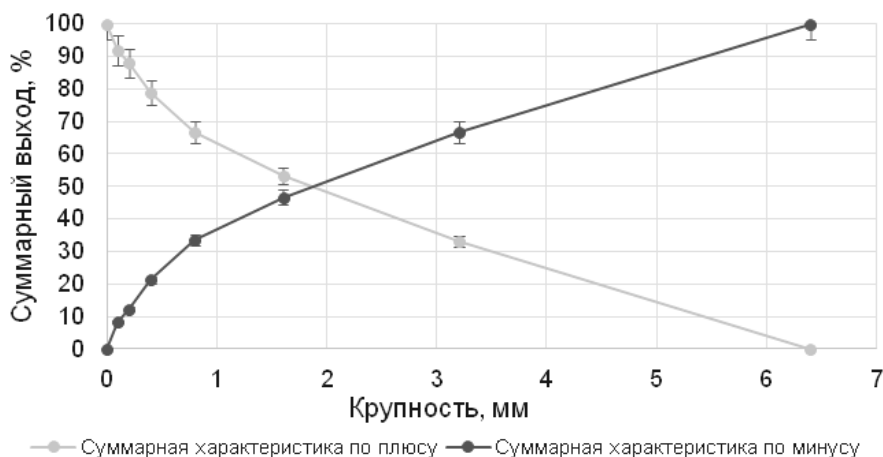


Рис. 1. Графическая интерпретация суммарной характеристики по плюсу и по минусу  
Fig. 1. Graphic interpretation of the total characteristics by plus and minus

Таблица

Динамика процесса измельчения

Table. Dynamic of disintegration process

Крупность класса, мм	$t = 0$ мин	$t = 5$ мин	$t = 10$ мин	$t = 15$ мин	$t = 20$ мин	$t = 25$ мин
	$\gamma, \%$	$\gamma, \%$	$\gamma, \%$	$\gamma, \%$	$\gamma, \%$	$\gamma, \%$
-6,4+3,2	33,16	30,14	25,05	14,23	10,22	3,21
-3,2+2,4	20,12	18,22	15,05	10,29	8,71	6,21
-1,6+0,8	13,24	11,34	9,85	8,16	6,22	2,12
-0,8+0,4	12,33	10,87	7,65	5,76	3,21	1,88
-0,4+0,2	9,01	8,11	6,23	5,06	3,14	1,28
-0,2+0,1	4,01	3,54	2,98	2,54	1,77	1,02
-0,1+0	8,13	17,78	33,19	53,96	66,73	84,28
ИТОГО	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

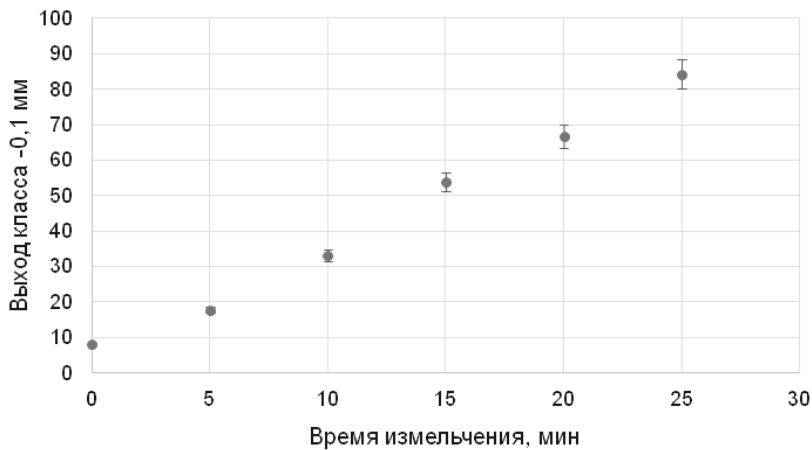


Рис. 2. Графическая визуализация зависимости выхода класса крупности  $-0,1+0$  мм от времени измельчения

Fig. 2. Graphical visualization of the dependence of the yield of the size class  $-0.1+0$  mm on the grinding time

В таблице представлены экспериментальные результаты крупности помола руды с интервалом 5 минут.

Интерпретация данных, представленных в таблице, показывает, что при измельчении в течение 25 минут выход класса  $-0,1+0$  мм составляет 84,28%. На рис. 2 приведена графическая визуализация полученных данных по зависимости выхода класса  $-0,1+0$  мм от времени измельчения.

Интерпретация полученных на рис. 2 данных показывает, что руда имеет

среднюю крепость, так как у нее достаточно высокие значения по выходу готового класса крупности в зависимости от времени измельчения. При времени измельчения 18 минут получен выход готового класса крупности для стадии флотационного обогащения, равный 60%.

### Численное моделирование

Цифровая трехмерная модель корпуса лабораторной мельницы  $120 \times 120$  мм в диаметре была создана

в SpaceClaim и затем экспортирована в Rocky DEM.

Задание значений для материалов корпуса и мелющих тел, коэффициентов восстановления, коэффициентов трения скольжения, а также коэффициентов трения качения позволяет определить параметры как контакта этих материалов между собой, так и в случае вступления в контакт материала с самим собой. В качестве шаров были использованы круглые частицы, а для материала заданы частицы полигональной формы приближенные к форме реальных частиц. В данном исследовании выполнено следующее упрощение: в качестве начального условия были использованы первые три крупные фракции эксперимента +0,8, +2,4 и +3,2, а мелкая объединена в крупную — 6,2, при этом такие частицы обладают свойствами мелкой фракции. Предложенный подход объясняется прежде всего ограничением по количеству частиц [23–25].

На рис. 3 приведены профили мельницы со стальными шарами и измельчаемым материалом, а также диаграммы распределения измельчаемого материала при скорости вращения барабана мельницы 90, 120 и 150 об/мин.

Как видно из представленных рисунков, характер измельчения меняется в зависимости от скорости вращения. Выход мелкой фракции в представленном подходе оценить практически невозможно вследствие того, что количество частиц будет увеличиваться в экспоненциальной прогрессии, что существенным образом увеличивает время расчётов.

Как было отмечено ранее, моделирование измельчения частиц минерального сырья с образованием мелкодисперсных частиц является чрезвычайно ресурсоемким процессом. Кроме этого, по представленным крупным фрак-

циям невозможно оценить кинетику измельчения в общем и для выхода класса крупности  $-0,1+0$  в частности. Поэтому оценка процесса измельчения может базироваться на анализе количества соударений частиц друг с другом, шарами и футеровкой. При анализе соударений можно использовать энергетические спектры — отношение величины удельной мощности к удельной энергии контакта [26–28].

На рис. 4 показаны энергетические спектры для всех столкновений в шаровой мельнице. Обе оси даны в логарифмических координатах. Представленные спектры были рассчитаны на основании частоты столкновений (скорости диссипации энергии). Поскольку разрушение коррелирует со скоростью поглощения энергии частицами, мы используем спектры, которые показывают скорость диссипации энергии на каждом уровне энергии столкновения. Общая форма спектра столкновений имеет параболический вид с максимумом (модальный пик распределения) примерно в середине диапазона (около 0,35 Дж) со все более быстрым спадом как на более высоких, так и на более низких уровнях энергии. Наивысшие энергии столкновения, составляющие около 100 Дж, связаны с падением самых крупных частиц на наибольшее расстояние, которое происходит для частиц на самых высоких траекториях. Частота столкновений для этих высоких энергий очень мала (порядка одного столкновения на оборот), поэтому их общий вклад в использование энергии незначителен [29–32].

Кроме этого, были смоделированы пограничные режимы при низкой (75 об/мин) и высокой (180 об/мин) скорости вращения (рис 5).

При частотах работы барабана шаровой мельницы полусамоизмельчения 180 об/мин и выше мелющие тела

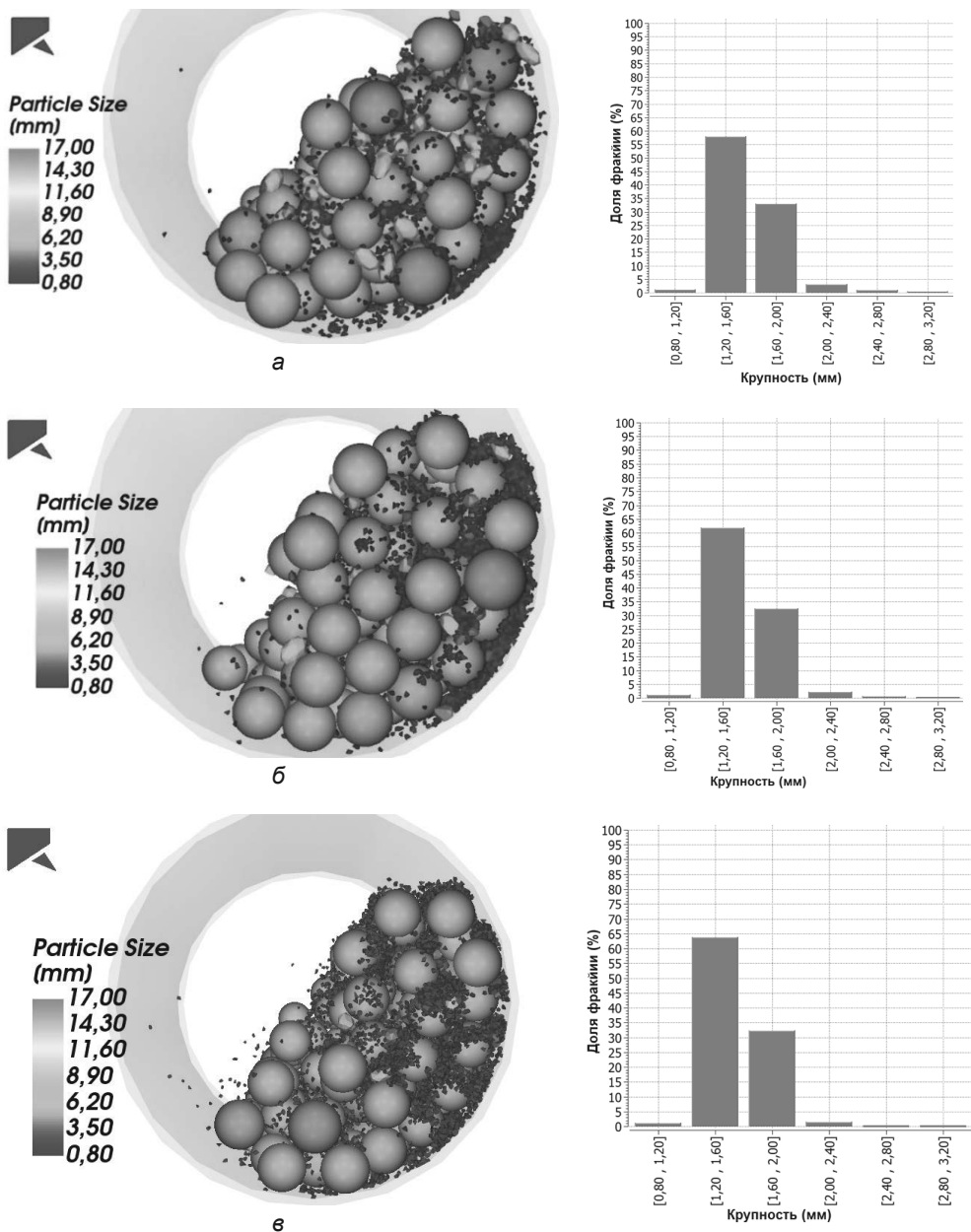


Рис. 3. Моделирование процесса измельчения при: а – 90 об/мин, б – 120 об/мин, в – 150 об/мин  
 Fig. 3. Simulation of the grinding process at: a – 90 rpm, b – 120 rpm, c – 150 rpm

под действием центробежной силы прижимаются к внутренней поверхности барабана и вращаются вместе с ним, при этом процесс измельчения практически прекращается [33–35].

При недостаточной скорости вращения барабана шары начинают перекачиваться по верхней поверхности, при этом формируется определенная застойная зона в центральной части



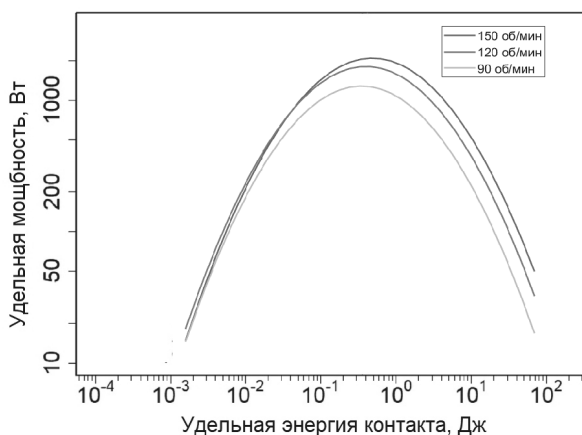


Рис 4. Изменение общих энергетических спектров для всех столкновений с увеличением скорости вращения мельницы

Fig 4. Change in the total energy spectra for all collisions with an increase in the speed of rotation of the mill

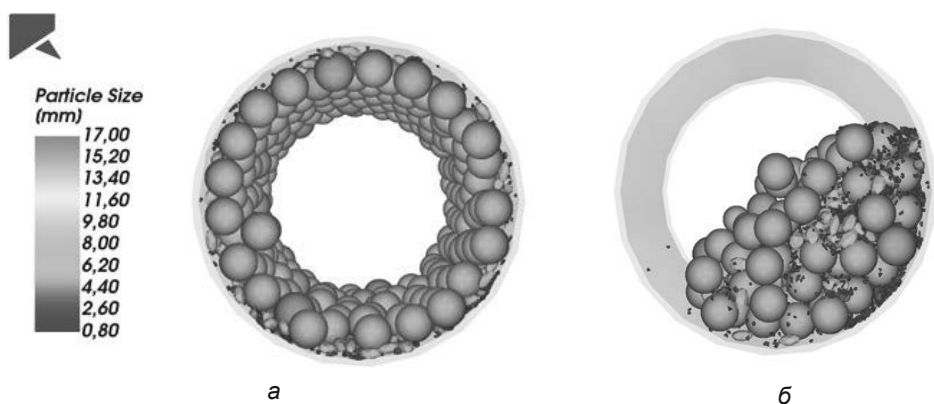


Рис. 5. Моделирование процесса измельчения при: а – 180 об/мин, б – 75

Fig. 5. Simulation of the grinding process at: a – 180 rpm, b – 75 rpm

рудной массы. Соответственно, скорость измельчения в каждом представленном случае падает.

Из представленных рисунков 3 и 6 видно, что выход фракции  $-1,6+0,8$  незначительно увеличивается при соответствующем увеличении скорости от 120 до 150 об/мин. Однако на рис. 4 и 6 видно, что увеличение скорости мельницы приводит к увеличению скорости рассеяния энергии в средней и более высокой частях диапазона энергии. Часть спектров до модального пика

(ниже 0,1 Дж) одинакова для разных скоростей вращения. Можно отметить, что при увеличении скорости происходит увеличение событий столкновения с высокой энергией (что также отражается на увеличении потребляемой мощности). Таким образом, увеличение скорости мельницы увеличивает потребляемую мощность. Однако при последующем увеличении скорости вращения барабана удельная энергия контакта будет уменьшаться. Стоит также заметить, что хотя снижение скорости мель-

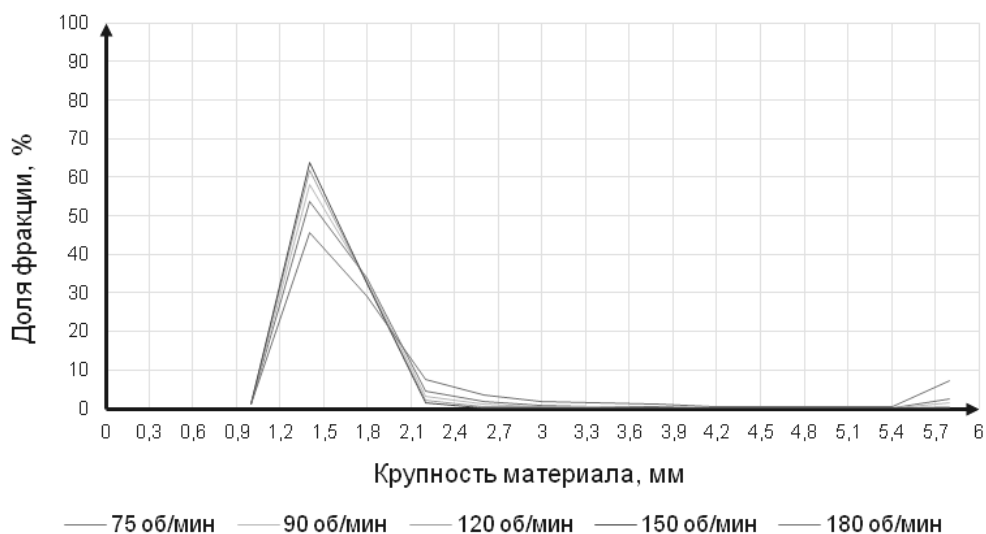


Рис. 6. Динамика измельчения при различных частотах вращения  
 Fig 6. Data from the model at different speeds

ницы и приводит к увеличению крупности по всем фракциям, однако не столь значительно, как в случае с увеличенными оборотами.

### Заключение

Анализ приведенных выше графиков наглядно показывает, что при увеличении частоты вращения мельницы интенсивность измельчения материала растет до тех пор, пока не произойдет достижение критической частоты вращения. При этом растет и затрачиваемая энергия на разрушение частиц. То есть это приведет к незначительному повышению скорости разрушения и при этом — к увеличению энергопотребления мельницы.

Определить общую эффективность процесса измельчения можно как средневзвешенную величину (по всем классам крупности) рассеяния энергии с учетом номинальной удельной энергии, необходимой для разрушения частиц. Представленные энергетические спектры можно использовать как

для оценки эффективности изменения параметров технологического процесса измельчения, так и для последующего выбора наиболее оптимального режима работы с учетом нагрузки мельницы исходным сырьем, шарами, скорости вращения и других параметров.

Система управления мельницы может использовать информацию от цифрового двойника для диагностирования текущего состояния оборудования и выдачи оптимальных режимов работы. Помимо использования математической модели необходимо обеспечить сбор оперативной информации от установленных на оборудовании датчиков и приборов. Это могут быть частотные приводы, датчики веса, анализаторы шума и т.п.

### Вклад авторов

*Белоглазов И. И.* — написание статьи, моделирование, обработка результатов.

*Сабинин Д. С.* — моделирование, проведение экспериментов.

Николаев М. Ю. — проведение экспериментов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдин К. А. К вопросу о математическом моделировании процессов разрушения материалов в шаровых мельницах // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2011. — № 1. — С. 91–94.

2. Барбанягрэ В. Д., Матвеев А. Ф., Смаль Д. В., Москвичев Д. С. Моделирование процессов для оценки производительности заводских шаровых трубных мельниц // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 5. — С. 144–146.

3. Читалов Л. С., Львов В. В. Сравнительная оценка испытаний рабочего индекса шаровой мельницы Бонда // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 1. — С. 130–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-130-145.

4. Баранов В. Ф. Обзор мировых достижений и проектов рудоподготовки новейших зарубежных фабрик // Обогащение руд. — 2008. — № 1. — С. 3–12.

5. Lvov V. V., Chitalov L. S. Modern trends in the design of processes and equipment for grinding of ores of non-ferrous metals // Non-ferrous Metals. 2020, vol. 10, pp. 20–26. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.03.

6. Скороходов В. Ф., Хохуля М. С., Опалев А. С. Прикладные аспекты применения компьютерного моделирования гидродинамики многофазных сред в исследованиях процессов разделения минералов при обогащении руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 2. — С. 139–153. DOI: 10.15372/FTPRPI20190216.

7. Ханин С. И., Старченко Д. Н., Мордовская О. С. Определение прочностных параметров энергообменных устройств шаровых мельниц с применением систем автоматизированного проектирования // Наука и бизнес: пути развития. — 2019. — № 11(101). — С. 86–93.

8. le Roux J. D., Steinboeck A., Kugi A., Craig I. K. Steady-state and dynamic simulation of a grinding mill using grind curves // Minerals Engineering. 2020, vol. 152, pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106208.

9. Попова Л. П., Олейник А. Г. Моделирование системы управления технологическим процессом обогащения с помощью методологий IDEF // Труды Кольского научного центра РАН. — 2010. — № 3(3). — С. 141–145.

10. Alexandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V. Justification of selective disintegration based on mineralogical and technological features of polymetallic ores // Minerals. 2021, no. 11, pp. 851–865. DOI:10.3390/min11080851.

11. Li Y., Bao J., Yu A., Yang R. ANN prediction of particle flow characteristics in a drum based on synthetic acoustic signals from DEM simulations // Chemical Engineering Science. 2021, vol. 246, pp. 1–10. DOI:10.1016/j.ces.2021.117012.

12. Vogel L., Peikert W. Fracture behavior of different materials — construction of a basic curve for fracture probability // Powder Technology. 2003, vol. 129, pp. 101–110. DOI:10.1016/S0032-5910(02)00217-6.

13. Shi F., Kojovic T. Validation of a model for impact fracture considering particle size effects // International Journal of Mineral Processing. 2007, vol. 82, pp. 156–163.

14. Boikov A. V., Saveliev R. V., Payor V. A., Potapov A. V. Part 2: Evaluation of the method of controlling the behavior of bulk materials in technological units using DEM // Review of CIS ferrous metallurgy. 2020, vol. 20, no. 2, pp. 3–6.

15. Белоглазов И. И., Иконников Д. А. Применение метода дискретных элементов для моделирования процесса измельчения горных пород в щековой дробилке // Изве-

ствия высших учебных заведений // Приборостроение. — 2016. — Т. 59. — № 9. — С. 780–786. DOI: 10.17586/0021 — 3454 1.

16. Pérez-García E. M., Bouchard J., Poulin É. Systematic calibration of a simulated semi-autogenous/ball-mill grinding circuit // PapersOnLine. 2020, vol. 53(2), pp. 12026–12031. DOI:10.1016/j.ifacol.2020.12.737.

17. Asbjörnsson G., Tavares L. M., Mainza A., Yahyaei M. Different perspectives of dynamics in comminution processes // Minerals Engineering. 2022, vol. 176, pp. 1–9. DOI:10.1016/j.mineng.2021.107326.

18. Nkwanyana S., Loveday B. Addition of pebbles to a ball-mill to improve grinding efficiency. Part 2 // Minerals Engineering. 2018, vol. 128, pp. 115–122. DOI:10.1016/j.mineng.2018.08.024.

19. Sharikov F. Yu., Krylov K. A. Mathematical model of optimal control of petroleum coke production in a rotary tube furnace // Theoretical bases of chemical technology. 2021, vol. 55, pp. 711–719.

20. Boykov A. V., Savel'yov R. V., Payor V. A., Potapov A. Universal approach to calibration of parameters of DEM of bulk materials // Symmetry. 2021, vol. 6, no. 13, pp. 1–13.

21. Mazukhina S. I., Masloboev V. A., Makarov D. V. Thermodynamic modeling of hypergenic processes in the tailings of copper-nickel ore dressing at different temperatures and moisture regimes // Chemistry for Sustainable Development, 2021. vol. 29, no. 1, pp. 69–79. DOI: 10.15372/KhUR2021279.

22. Alexandrova T. N., Afanasova A. V., Alexandrov A. V. Microwave treatment to reduce the refractoriness of carbonaceous concentrates // Journal of Mining Science. 2020, vol. 1, no. 56, pp. 136–141.

23. Kuzmin O. V., Kuzmina V. V. Modeling of multistage processes of ore mineral processing using combinatorial polynomials of partitioning. Modern Technologies. System analysis // Modeling. 2017, no. 3(55), pp. 48–53. DOI: 10.26731/1813 — 9108.2017.3(55).48 — 53.

24. Lvov V., Sischuk J., Chitalov L. Intensification of ball mill work index test using different methods // 17-I International Interdisciplinary Scientific Geoconference SGEM. 2017, vol. 17, pp. 857–864. DOI: 10.5593/sgem2017/11/S04.109.

25. Голубев В. О., Литвинова Т. Е. Динамическое моделирование промышленного цикла кристаллизации гиббсита // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 88–101. DOI:10.31897/PMI.2021.1.10.

26. Sharikov F. Yu., Sharikov Yu. V., Krylov K. A. Selection of key parameters for calcination of green coke in a tubular rotary furnace to produce anode petcoke // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol.15, pp. 2904–2912.

27. Барон Л. И., Коняшин Ю. Г., Курбатов В. М. Дробимость горных пород. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 169 с.

28. Голик В. И., Дмитрак Ю. В. Взаимодействие шаровой загрузки тел с материалом в мельницах // Вектор ГеоНаук. — 2021. — Т. 4. — № 1. — С. 20–27. DOI: 10.24411/2619-0761-2021-10002.

29. Андреев Е. Е., Львов В. В., Читалов Л. С. Экономия энергии с использованием различной измельчающей среды // Записки Горного института. — 2013. — Т. 202. — С. 141–142.

30. Дмитрак Ю. В. Движение мелющей загрузки в шаровых мельницах // Вектор ГеоНаук. — 2021. — Т. 4. — № 1. — С. 28–36. DOI: 10.24411/2619-0761-2021-10003.


31. Васильев Б. Ю., Малькова Я. М., Мардашов Д. В. Система управления комплектным электроприводом мельницы для измельчения золотосодержащих руд // IEEE Конференция российских молодых исследователей в области электротехники и электроники. — 2020 — С. 936–941. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039468.

32. Islamov Sh. R., Bondarenko A. V., Mardashov D. V. Justification of well killing technology for fractured carbonate reservoirs // Proceedings of Youth Technical Sessions:

VI World Petroleum Council Youth Forum – Future Leaders Forum London: SRC Press / Taylor and Francis Group, 2019, pp. 256–264.

33. Голик В. И. Исследование влияния свойств твердых тел на энергетику измельчения в мельницах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10. – С. 112–122. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_7\_0\_96.

34. Воронин В. А., Непша Ф. С. Имитационное моделирование электропривода очистного комбайна для оценки показателей энергоэффективности системы электро-снабжения // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246, С. 633–639. DOI: doi.org/10.31897/PMI.2020.6.5

35. Kul'chitskii A. A. and Kashin D. A. The choice of a method for non-contact assessment of the composition of briquetted charge materials // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1399 no. 4, art. 044108. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044108. 

## REFERENCES

1. Yudin K. A. An the mathematical modeling of material destruction processes in ball mills. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2011, vol. 1, pp. 91–94. [In Russ].

2. Barbanyagre V. D., Matveev A. F., Smal D. V., Moskvichev D. S. Process Modeling to Evaluate the Performance of Factory Pipe Ball Mills. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2016, no. 5, pp. 144–146. [In Russ].

3. Chitalov L. S., Lvov V. V. Comparative assessment of tests of the working index of the ball mill Bond. *MIAB. Mining Information-Analytical Bulletin*. 2021, no. 1, pp. 130–145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-130-145.

4. Baranov V. F. Review of world achievements and projects of ore dressing of the newest foreign plants. *Enrichment of ores*. 2008, no. 1, pp. 3–12. [In Russ].

5. Lvov V. V., Chitalov L. S. Modern trends in the design of processes and equipment for grinding of ores of non-ferrous metals. *Non-ferrous Metals*. 2020, vol. 10, pp. 20–26. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.03.

6. Skorokhodov V. F., Khokhulia M. S., Opalev A. C. Applied aspects of application of computer simulation of hydrodynamics of multiphase media in studies of mineral separation processes in ore beneficiation. *Physico-technical problems of mineral development*. 2019, no. 2, pp. 139–153. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20190216.

7. Khanin S. I., Starchenko D. N., Mordovskaya O. S. Determination of strength parameters of power exchange devices of ball mills using computer-aided design systems. *Science and Business: ways of development*. 2019, no. 11(101), pp. 86–93. [In Russ].

8. le Roux J. D., Steinboeck A., Kugi A., Craig I. K. Steady-state and dynamic simulation of a grinding mill using grind curves. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 152, pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106208.

9. Popova L. P., Oleynik A. G. Modeling of process control system of enrichment using IDEF methodologies. *Proceedings of Kola Scientific Center of RAS*. 2010, no. 3(3), pp. 141–145. [In Russ].

10. Alexandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V. Justification of selective disintegration based on mineralogical and technological features of polymetallic ores. *Minerals*. 2021, no. 11, pp. 851–865. DOI:10.3390/min11080851.

11. Li Y., Bao J., Yu A., Yang R. ANN prediction of particle flow characteristics in a drum based on synthetic acoustic signals from DEM simulations. *Chemical Engineering Science*. 2021, vol. 246, pp. 1–10. DOI:10.1016/j.ces.2021.117012.

12. Vogel L., Peikert W. Fracture behavior of different materials – construction of a basic curve for fracture probability. *Powder Technology*. 2003, vol. 129, pp. 101–110. DOI:10.1016/S0032-5910(02)00217-6.

13. Shi F., Kojovic T. Validation of a model for impact fracture considering particle size effects. *International Journal of Mineral Processing*. 2007, vol. 82, pp. 156–163.
14. Boikov A. V., Saveliev R. V., Payor V. A., Potapov A. V. Part 2: Evaluation of the method of controlling the behavior of bulk materials in technological units using DEM. *Review of CIS ferrous metallurgy*. 2020, vol. 20, no. 2, pp. 3–6.
15. Beloglazov I. I., Ikonnikov D. A. Application of the Discrete Element Method for Modeling the Crushing of Rocks in a Jaw Crusher. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*. 2016, vol. 59, no. 9, pp. 780–786. [In Russ]. DOI 10.17586/0021–3454 1.
16. Pérez-García E. M., Bouchard J., Poulin É. Systematic calibration of a simulated semi-autogenous/ball-mill grinding circuit. *PapersOnLine*. 2020, vol. 53(2), pp. 12026–12031. DOI:10.1016/j.ifacol.2020.12.737.
17. Asbjörnsson G., Tavares L. M., Mainza A., Yahyaei M. Different perspectives of dynamics in comminution processes. *Minerals Engineering*. 2022, vol. 176, pp. 1–9. DOI:10.1016/j.mineng.2021.107326.
18. Nkwanyana S., Loveday B. Addition of pebbles to a ball-mill to improve grinding efficiency. Part 2. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 128, pp. 115–122. DOI:10.1016/j.mineng.2018.08.024.
19. Sharikov F. Yu., Krylov K. A. Mathematical model of optimal control of petroleum coke production in a rotary tube furnace. *Theoretical bases of chemical technology*. 2021, vol. 55, pp. 711–719.
20. Boykov A. V., Savelyov R. V., Payor V. A., Potapov A. Universal approach to calibration of parameters of DEM of bulk materials. *Symmetry*. 2021, vol. 6, no. 13, pp. 1–13.
21. Mazukhina S. I., Masloboev V. A., Makarov D. V. Thermodynamic modeling of hypergenic processes in the tailings of copper-nickel ore dressing at different temperatures and moisture regimes. *Chemistry for Sustainable Development*. 2021, vol. 29, no. 1, pp. 69–79. DOI: 10.15372/KhUR2021279.
22. Alexandrova T. N., Afanasova A. V., Alexandrov A. V. Microwave treatment to reduce the refractoriness of carbonaceous concentrates. *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 1, no. 56, pp. 136–141.
23. Kuzmin O. V., Kuzmina V. V. Modeling of multistage processes of ore mineral processing using combinatorial polynomials of partitioning. Modern Technologies. System analysis. *Modeling*. 2017, no. 3(55), pp. 48–53. DOI: 10.26731/1813 – 9108.2017.3(55).48 – 53.
24. Lvov V., Sischuk J., Chitalov L. Intensification of ball mill work index test using different methods. *17-I International Interdisciplinary Scientific Geoconference SGEM*. 2017, vol. 17, pp. 857–864. DOI: 10.5593/sgem2017/11/S04.109.
25. Golubev V. O., Litvinova T. E. Dynamic modeling of the industrial cycle of gibbsite crystallization. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 88–101. [In Russ]. DOI:10.31897/PMI.2021.1.10.
26. Sharikov F. Yu., Sharikov Yu. V., Krylov K. A. Selection of key parameters for calcination of green coke in a tubular rotary furnace to produce anode petcoke. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol.15, pp. 2904–2912.
27. Baron L. I., Konyashin Yu. G., Kurbatov V. M. Crushability of rocks. Moscow: AN USSR, 1963, 169 p. [In Russ].
28. Golik V. I., Dmitrak Y. V. Interaction of ball loading bodies with material in mills. *Vector GeoNauk*. 2021, vol. 4, no. 1, pp. 20–27. [In Russ]. DOI: 10.24411/2619 – 0761 – 2021 – 10002.
29. Andreev E. E., Lvov V. V., Chitalov L. S. Energy saving using different grinding media. *Journal of Mining Institute*. 2013, vol. 202, pp. 141–142. [In Russ].
30. Dmitrak Y. V. Movement of the grinding load in ball mills. *Vector GeoNauk*. 2021, vol. 4, no. 1, pp. 28–36. [In Russ]. DOI: 10.24411/2619-0761-2021-10003.

31. Vasiliev B., Malkova Y. M., Mardashov D. V. Control system of a complete electric drive of the mill for grinding of gold-bearing ores. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical Engineering and Electronics*. 2020, pp. 936–941. [In Russ]. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039468.

32. Islamov Sh. R., Bondarenko A. V., Mardashov D. V. Justification of well killing technology for fractured carbonate reservoirs. *Proceedings of Youth Technical Sessions: VI World Petroleum Council Youth Forum – Future Leaders Forum London*: SRC Press / Taylor and Francis Group. 2019, pp. 256–264.

33. Golik V. I. Investigation of the influence of the properties of solids on the energy of grinding in mills. *MIAB. Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021, no. 10, pp. 112–122. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_7\_0\_96.

34. Voronin V. A., Nepsha F. S. Simulation of the electric drive of the shearer to assess the energy efficiency indicators of the power supply system. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 633–639. [In Russ]. DOI:10.31897/PMI.2020.6.5.

35. Kul'chitskii A. A. and Kashin D. A. The choice of a method for non-contact assessment of the composition of briquetted charge materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1399, no.4, art. 044108. DOI: 10.1088/1742–6596/1399/4/044108.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Белоглазов Илья Ильич* — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств, <https://orcid.org/0000-0002-1224-2117>, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, [Beloglazov\\_ii@pers.spmi.ru](mailto:Beloglazov_ii@pers.spmi.ru);

*Сабинин Денис Сергеевич* — магистрант кафедры автоматизации технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, [s202608@stud.spmi.ru](mailto:s202608@stud.spmi.ru);

*Николаев Михаил Юрьевич* — магистрант кафедры Автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургский Горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, [misha1999181@gmail.com](mailto:misha1999181@gmail.com).

**Для контактов:** *Белоглазов Илья Ильич*, e-mail: [Beloglazov\\_ii@pers.spmi.ru](mailto:Beloglazov_ii@pers.spmi.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Beloglazov I. I.*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of department of Automation of Technological Processes and Production, <https://orcid.org/0000-0002-1224-2117>, St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2 [Beloglazov\\_ii@pers.spmi.ru](mailto:Beloglazov_ii@pers.spmi.ru);

*Sabinin D. S.*, Master's student of the Department of Automation of Technological Processes and Production of St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, [s202608@stud.spmi.ru](mailto:s202608@stud.spmi.ru);

*Nikolaev M. Yu.*, Master's student of the Department of Automation of Technological Processes and Production of St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, [misha1999181@gmail.com](mailto:misha1999181@gmail.com).

**For contacts:** *Beloglazov Ilya Ilyich*, e-mail: [Beloglazov\\_ii@pers.spmi.ru](mailto:Beloglazov_ii@pers.spmi.ru).

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 01.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 01.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.