

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕЗИНТЕГРАЦИИ В ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКЕ СО СЛОЖНЫМ КАЧАНИЕМ ЩЕК

И. И. БЕЛОГЛАЗОВ¹, А. С. СТЕПАНЯН², А. Ю. ФЕОКТИСТОВ³, Г. А. ЮСУПОВ¹

(1 – Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, РФ;

2 – НПК «Механобр-техника», г. Санкт-Петербург, РФ;

3 – ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», г. Санкт-Петербург, РФ)*

В работе рассматривается модель процесса дробления в щековой дробилке, созданная с применением метода дискретных элементов. Использование современного программного обеспечения позволило подробно изучить воздействие щек дробилки на дробимый материал. Описаны этапы моделирования, начиная с подготовки геометрической модели, создания параметрического проекта для многовариантного моделирования, калибровки параметров математической модели с учетом данных эксперимента и заканчивая моделированием с изменением режимных параметров работы дробилки. Работа выполнялась применительно к опытному образцу новой конструкции, разработанной в НПК «Механобр-техника»; на ней же проводились экспериментальные исследования. Полученные экспериментальные результаты были сопоставлены с компьютерным моделированием в соответствии с особенностями работы машины, характером разрушения и распределения частиц по крупности. Приведенный анализ показывает, как соотносятся результаты физического эксперимента и компьютерного моделирования.

Ключевые слова: низкочастотная щековая дробилка, имитационное моделирование, DEM, метод дискретных элементов, дробление, рудоподготовка.

DOI: 10.17580/or.2018.02.01

Введение

Щековые дробилки являются достаточно распространенным в промышленной практике видом оборудования. К их преимуществам следует отнести простоту конструкции, удобное обслуживание, несложный ремонт, к недостаткам — наличие значительных качающихся масс, что приводит к высокому энергопотреблению при работе. Одним из наиболее современных путей оптимизации конструкции и повышения ее энергоэффективности является численное моделирование процесса дробления в подобном агрегате.

В данной работе изучалось взаимодействие между стенками щековой дробилки и загружаемым материалом с использованием метода дискретных элементов (МДЭ). В научной литературе широко описывается работа шаровых мельниц, мельниц самоизмельчения и полусамоизмельчения [1–5], тогда как по моделированию щековых дробилок можно найти лишь отдельные публикации [6–9]. Численное моделирование процесса дробления в таком агрегате является актуальной задачей, позволяющей наглядно изучить особенности процесса, фактически заглянув внутрь рабочей камеры.

* Белоглазов Илья Ильич — доцент, канд. техн. наук, beloglazov@spmi.ru; Степанян Александр Степанович — технический директор, stepanyan_as@nprk-mt.spb.ru; Феоктистов Андрей Юрьевич — директор по развитию бизнеса Rocky; Юсупов Григорий Адамбаевич — аспирант.

© Белоглазов И. И., Степанян А. С., Феоктистов А. Ю., Юсупов Г. А., 2018

МДЭ, или DEM (Discrete Element Method), является одним из новых инструментов для исследования разрушения различных материалов [9–12]. Фундаментальное положение метода заключается в том, что материал состоит из отдельных взаимодействующих дискретных частиц, чаще всего сферических, движущихся согласно классическим законам Ньютона с учетом внешних полей сил — учитываются гравитация, трение, инерция, упругое взаимодействие. МДЭ позволяет получить исчерпывающие сведения о любой частице в интересующий момент времени: местоположение, действующие силы, скорость, направление движения и т. п.

Использование МДЭ требует простых, но достаточно ресурсоемких компьютерных вычислений. Кроме того, возникает необходимость использования современного программного обеспечения с графическим интерфейсом для поддержания гибкости задания исходных данных, оперативного изменения параметров модели, параметрической оптимизации, добавления в модель свойств, не предполагавшихся на начальной стадии разработки, и просто тестирования ряда конструкций с целью выбора лучшего варианта.

Из многообразия различных программных пакетов и интегрируемых платформ, существующих на сегодняшний день, был выбран программный пакет Rocky [13] для моделирования технологических процессов с сыпучими материалами и соответствующим оборудованием. Эксперименты по дроблению с использованием оригинальной низкочастотной щековой дробилки со сложным качанием щек проводились в НПК «Механобр-техника».

Калибровка модели осуществлялась на основе экспериментальных данных, что в итоге позволило добиться небольшого расхождения между данными, полученными при моделировании и в эксперименте.

Постановка задачи. Исходные данные

Для выполнения расчетов была выбрана низкочастотная дробилка со сложным качанием щек ЩДС 100×200 (рис. 1) [14]. Отметим, что при одинаковых габаритных размерах дробилки со сложным движением щек более производительны. Именно такая особенность этих дробилок представляет интерес для моделирования и оптимизации движения.

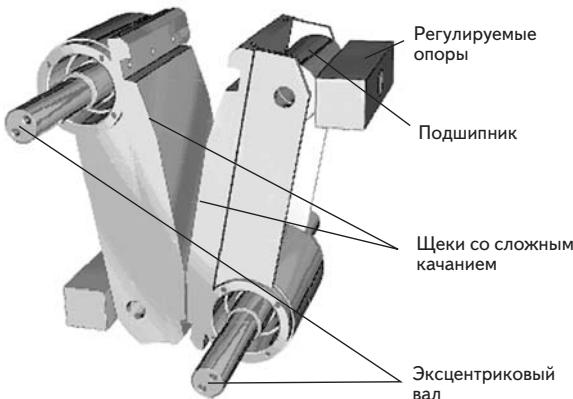


Рис. 1. Геометрическая модель низкочастотной щековой дробилки ЩДС 100×200 (конструкция НПК «Механобр-техника»)

В представленной работе моделирование производилось для крупности готовых фракций больше 0,5 мм. В качестве материала для дробления был выбран гранит, как доступная горная порода с хорошо изученными свойствами.

Возможности программного пакета Rocky позволяют задавать параметры исходного материала, а также учитывать взаимодействие частиц между собой и с рабочими элементами оборудования (табл. 1). Параметры, указанные в табл. 1, задаются в этом пакете в качестве начальных условий для горной породы. Размерные параметры подбираются на основании усредненных размеров реального куска материала.

В отличие от множества других основанных на МДЭ средств моделирования, в которых используются частицы сферической формы [15, 16], в программном пакете Rocky, наряду с широким спектром базо-

вых форм, присутствует возможность выбора произвольной формы частиц. Это позволяет учитывать особенности поведения частиц несферической формы. В качестве формы частицы был выбран сложный многоугольник (рис. 2).

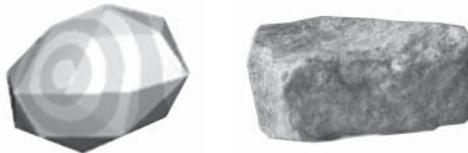


Рис. 2. Частицы обрабатываемого материала

Справа — фотография образца гранита, слева — модель частицы

Моделирование процесса дробления ограничивается рабочей зоной щековой дробилки, то есть тем пространством, где происходит разрушение материала в результате движения прилегающих рабочих элементов. Трехмерная геометрическая модель дробилки была выполнена в НПК «Механобр-техника». Дальнейшая работа по подготовке трехмерной модели к последующим расчетам велась в пакете геометрического моделирования ANSYS SpaceClaim. Все конструктивные детали, например каркас, крепеж и т. п., которые бы усложнили процесс моделирования или не участвовали в нем, были исключены из модели. Подготовленная модель была параметризована, в частности, выходным параметром стала величина нижнего зазора между рабочими элементами — щеками.

Параметризация геометрической модели позволяет, в том числе, в процессе исследования регулировать крупность получаемого материала, а также оптимизировать модель под определенные условия; при этом подготовленная модель легко переносится в программный пакет Rocky.

В рассматриваемой низкочастотной дробилке со сложным движением щек обе щеки являются подвижными. Одна из них верхней частью закреплена на эксцентричную часть главного вала, выступающую в роли шатуна, в нижней части ее движение ограничено валком, закрепленным на корпусе и имеющим пружинное основание для пропуска недробимого тела, что определяет в кинематике движения щеки наличие неподвижной точки. Благодаря такому закреплению каждая точка щеки при вращении главного вала будет описывать траекторию по замкнутой кривой в виде вытянутых эллипсов с изменением направления вращения ниже неподвижной точки. Вторая щека закреплена на приводном валу в нижней части и имеет контакт с неподвижным валком в верхней. Вращение обоих приводных валов происходит в одном направлении, в ходе чего осуществляется процесс полупринудительной разгрузки готового материала [17].

Кроме движения щек дробилки, учитываются также физические характеристики материала самой

Таблица 1
Параметры частиц

Параметр	Значение
Вертикальный коэффициент размера	1,50
Горизонтальный коэффициент размера	0,75
Количество углов частицы	25
Плотность материала, кг/м ³	2600

щеки, и при необходимости есть возможность контролировать износ футеровки, выявляя наиболее уязвимые зоны щек. Программный пакет Rocky позволяет реализовать сложное движение элементов машины заданием и настройкой таких параметров, как частота, амплитуда, направление и повторяемость движения.

На основе рассмотренной выше схемы движения цикл рабочего хода был разбит на ряд простых движений, использованных при моделировании, в результате чего была получена модель движения подвижных щек (рис. 3). Изменение направления движения щек осуществляется путем изменения последовательности простых движений.

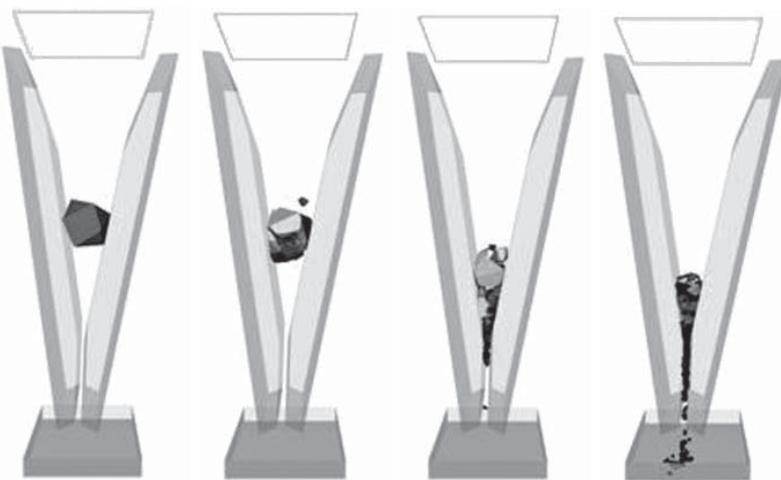


Рис. 3. Визуализация стадий дробления в щековой дробилке со сложным качанием щек

Реализовано в программном пакете Rocky

Моделирование дробления материала

Для каждой частицы, находящейся в контакте с другими частицами и/или геометрическими поверхностями, рассчитывается общая удельная энергия контактного взаимодействия E_t . Если эта энергия больше, чем минимальная энергия разрушения частицы ($E_t > E_{\min}$), то E_{\min} определяется как

$$E_{\min} = E_{\min,r}(L_r/L), \quad (1)$$

где L — размер частиц, L_r — средний размер частиц, $E_{\min,r}$ — минимальная удельная энергия для частиц среднего размера из выбранного материала (константа материала).

Общая энергия контакта будет равна накопленной энергии предыдущих контактов с учетом разницы энергии контакта и минимальной энергии:

$$E_t = E_{cum} + \max(0, E - E_{\min}). \quad (2)$$

Вероятность разрушения частиц P рассчитывается по формуле [18]

$$P = 1 - \exp(-S(L/L_r)E_t), \quad (3)$$

где S — параметр прочности частиц.

Если частица разрушена, то полученные геометрические фрагменты генерируют-

ся по алгоритму разрушения Вороного [19]. Степень фрагментации соответствует функции T_{10} :

$$T_{10} = M(1 - \exp(-S(L/L_r)E_t)), \quad (4)$$

где M представляет собой константу для выбранного материала. Размер фрагментов, образовавшихся в результате разрушения, определяется из величины T_{10} . Распределение частиц по крупности рассчитывается на основе модели Годена—Шумана [20], где массовая доля частиц сохраняется в каждом интервале вычислений и находится с помощью уравнения с двумя заданными константами

$$W_p = 100 \left(\frac{x}{k} \right)^m, \quad (5)$$

где W_p — массовый выход, %; x — размер частиц; k — константа размера частиц; m — константа распределения.

Параметры E_{\min} , S , L определяются исходя из стандартного теста разрушения материала падающим грузом, разработанного в австралийском научно-исследовательском центре JKMR [21]. Следует отметить, что выше приведены лишь основные параметры моделирования.

Кроме того, необходимо учитывать количество частиц, участвующих в моделировании. При дроблении количество частиц возрастает на несколько порядков по сравнению с исходным состоянием, при этом значительно увеличивается время расчета модели.

Калибровка параметров

Как отмечено ранее, был проведен натурный эксперимент по определению характеристик дробления гранита в новой дробилке ЩДС 100×200. Суть эксперимента заключалась в дроблении единичных кусков породы, подобранных по форме и характерному размеру (50 мм), и определении различных параметров: распределения частиц по крупности (табл. 2, рис. 4), продолжительности дробления, мощности и производительности. Всего в ходе натурного эксперимента производилось разрушение 11 образцов.

Следующим действием было задание исходных данных модели дробления, наиболее приближенных к результатам проведенных экспериментов по выходу фракций, путем автоматизированного подбора параметров дробления частицы гранита.

Таблица 2
Среднее распределение частиц по классам крупности в результате эксперимента

Ячейка сита, мм	5	2,5	1,25	0,8	0,5	0,18	0,074
Масса класса, г	0,83	20,98	54,35	22,24	5,56	19,66	8,58
Доля класса, %	0,63	15,87	41,11	16,82	4,21	14,87	6,49

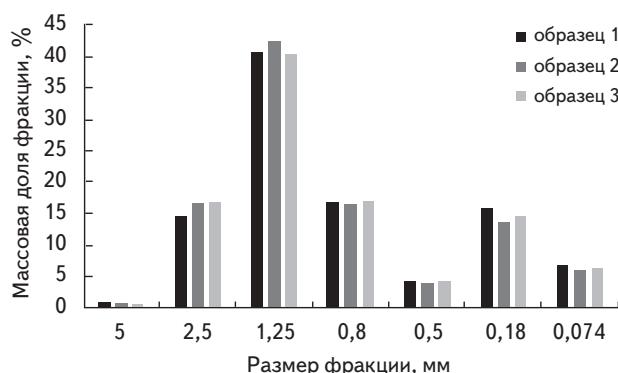


Рис. 4. Распределение частиц по крупности в результате эксперимента для трех образцов гранита

Калибровочные расчеты и подбор параметров модели дробления проводились под управлением программной платформы ANSYS Workbench, которая позволяет выполнять серию расчетов с изменяемыми параметрами в автоматизированном режиме. Калибровка параметров модели осуществляется по результатам множественных расчетов; определяется влияние исходных параметров на искомые величины, что обеспечивает получение наиболее точных и достоверных моделей. Методика автоматизированного подбора параметров модели в данной публикации не приводится.

На рис. 5 показано сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования.

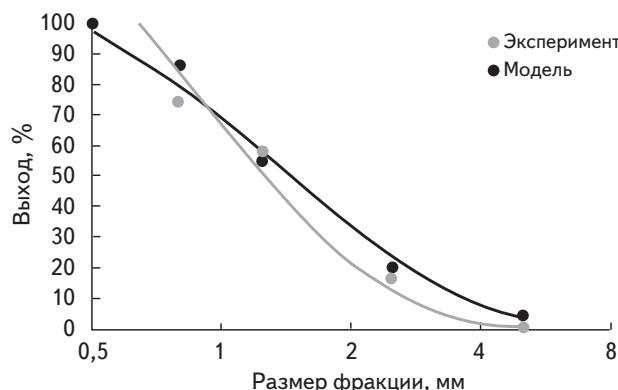


Рис. 5. Распределение частиц по крупности по результатам эксперимента и моделирования

На графике представлено распределение частиц полученных продуктов по крупности. Экспериментальный график, представленный на рис. 5, коррелируется с графиком, полученным по результатам моделирования. Нижней границей крупности дробленых частиц был установлен размер 0,5 мм.

Выводы и обсуждение результатов

1. Моделирование процесса дробления в щековой дробилке является лишь одним из многих примеров применения МДЭ. Подходы, применяемые для моделирования, могут стать основой для последующего

более детального изучения процесса. При этом можно заменить сложные и дорогостоящие испытания дробимости материалов (применение теста падающего груза) с целью получения требуемых для математической модели дробления параметров на автоматизированный подбор искомых параметров под результаты экспериментального дробления по разработанной методике.

2. Использование специализированного программного обеспечения и параметрических моделей позволяет оперативно изменять элементы конструкции и оптимизировать работу агрегата. Перспективным является дальнейшее использование созданной параметрической модели для оптимизации конструктивных и режимных параметров дробилки.

3. Неточность результатов моделирования связана с практической сложностью моделирования фракции менее 0,5 мм. Генерация в процессе моделирования более мелких частиц приводит к значительному увеличению требуемого для расчета времени. Следует отметить, что при использовании щековых дробилок задача получения более мелкого класса не ставится.

4. Результаты эксперимента по дроблению единичных кусков гранита могут быть не вполне точными из-за изменения свойств образцов гранита и наличия в них пористости [22], что также сказывается на точности совпадения данных эксперимента и моделирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ, проект № 17-79-30056).

Список литературы

1. Morton D., Dunstall S. Using the Web to increase the availability of DEM-based mill modeling // Minerals Engineering. 2004. Vol. 17, No. 11–12. P. 1199–1207.
2. Morrison R. D., Cleary P. W. Using DEM to model ore breakage within a pilot scale SAG mill // Minerals Engineering. 2004. Vol. 17, No. 11–12. P. 1117–1124.
3. Mishra B. K., Murty C. On the determination of contact parameters for realistic DEM simulations of ball mills // Powder Technology. 2001. Vol. 115, Iss. 3. P. 290–297.
4. Djodjevic N., Shi F. N., Morrison R. D. Applying discrete element method modelling to vertical and horizontal shaft impact crushers // Minerals Engineering. 2003. Vol. 16, Iss. 10. P. 983–991.
5. Измельчение. Энергетика и технология: учебное пособие для вузов / Г. Г. Пивняк, Л. А. Вайсберг, В. И. Кириченко, П. И. Пилов, В. В. Кириченко. М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2007. 296 с.
6. Beloglazov I. I., Ikonnikov D. A. Computer simulation methods for crushing process in an jaw crusher // VII International Scientific Practical Conference «Innovative Technologies in Engineering». IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 142, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012074.
7. Refahi A., Aghazadeh Mohandesi J., Rezai B. Comparison between bond crushing energy and fracture energy of rocks in a jaw crusher using numerical simulation // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2009. Vol. 109. P. 709–717.

8. Legendre D., Zevenhoven R. Assessing the energy efficiency of a jaw crusher // *Energy*. 2014. Vol. 74. P. 119–130.
9. Cleary P. W., Sinnott M. D. Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 1 — Compression crushers // *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 74. P. 178–197.
10. Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных и техногенных материалов / В. А. Арсентьев, И. И. Блехман, Л. И. Блехман, Л. А. Вайсберг, К. С. Иванов, А. М. Кривцов // *Обогащение руд*. 2010. № 1. С. 30–35.
11. Maksarov V. V., Olt J. Dynamic stabilization of machining process based on local metastability in controlled robotic systems of CNC machines // *Zapiski Gornogo Instituta*. 2017. Vol. 226. P. 446–451.
12. Вайсберг Л. А., Демидов И. В., Иванов К. С. Механика сыпучих сред при вибрационных воздействиях: методы описания и математического моделирования // *Обогащение руд*. 2015. № 4. С. 21–31. DOI: 10.17580/or.2015.04.05.
13. Моделирование динамики частиц методом DEM. URL: <http://www.rocky-dem.ru/rocky/review/> (дата обращения: 12.04.2018).
14. Аминов В. Н., Каменева Е. Е., Устинов И. Д. Моделирование дробления горных пород для производства щебня // *Обогащение руд*. 2017. № 4. С. 3–6. DOI: 10.17580/or.2017.04.01.
15. Schubert W., Jeschke H. DEM-simulation of the breakage process in an impact crusher // *Wissenschaftsportal baumaschine.de*. 2005. 4.
16. Khanal M., Schubert W., Tomas J. Ball impact and crack propagation — simulations of particle compound material // *Granular Matter*. 2004. Vol. 5, Iss. 4. P. 177–184.
17. Mikhailov A. V. Coal-peat compositions for co-combustion in local boilers // *Zapiski Gornogo Instituta*. 2016. Vol. 220. P. 538–544.
18. Modelling discrete, incremental, repetitive and/or simultaneous particle breakage / J. Bruchmuller, S. Gu, B. G. M. van Wachem, K. H. Luo // 7th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2010, Tampa, FL, May 30 – June 4, 2010.
19. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение. М.: Мир, 1989. 478 с.
20. Stamboltzis G. A. Calculation of Gates–Gaudin–Schuhmann and Rosin–Rammler parameters from the size analysis of the coarse part of the distribution // *Mining and Metallurgical Annals*. 1989. No. 72–73. P. 29–38.
21. <http://www.jkmrc.uq.edu.au/>
22. Вайсберг Л. А., Каменева Е. Е. Возможности компьютерной рентгеновской микротомографии при исследовании физико-механических свойств горных пород // *Горный журнал*. 2014. № 9. С. 85–90. 

OBOGASHCHENIE RUD, 2018, No. 2, pp.3–8.
DOI: 10.17580/or.2018.02.01

Disintegration process modeling for a jaw crusher with complex jaws swing

Information about authors

Beloglazov I. I.¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, beloglazov@spmi.ru;
Stepanyan A. S.², Technical Director, stepanyan_as@nkp-mt.spb.ru;
Feoktistov A. Yu.³, Director of Rocky Business Development;
Yusupov G. A.¹, Postgraduate Student.

¹ St. Petersburg Mining University (St. Petersburg, Russia).

² REC «Mekhanobr-Tekhnika» (St. Petersburg, Russia).

³ CADFEM CIS JSC (St. Petersburg, Russia).

Abstract

This study describes a model of the crushing process in a jaw crusher developed using the Discrete Element Method (DEM). The use of advanced software enabled a detailed study of the impact produced by crusher jaws on the material crushed. All modeling stages are detailed, starting with the preparation of a geometric model, parameter design for multivariate modeling and parameter calibration for a mathematical model with account of the experimental data, and ending with modeling of variations in the operating parameters of the crusher. This work was carried out with reference to the prototype of a new design developed by «Mekhanobr-Tekhnika» REC, which was used in the experimental studies. The experimental results obtained were compared with the computer model with account of all specific features of the machine operation and the nature of particle fracture and particle size distribution. The analysis presented in the paper demonstrates the correlation between the results of the physical experiment and the computer simulation data.

The research was carried out with the support of the grant issued by the Russian Science Foundation (project No. 17-79-30056).

Keywords: low-frequency jaw crusher, simulation, DEM, discrete element method, crushing, ore preparation.

References

1. Morton D., Dunstall S. Using the Web to increase the availability of DEM-based mill modeling. *Minerals*

Engineering. 2004. Vol. 17, No. 11–12. pp. 1199–1207.

2. Morrison R. D., Cleary P. W. Using DEM to model ore breakage within a pilot scale SAG mill. *Minerals Engineering*. 2004. Vol. 17, No. 11–12. pp. 1117–1124.

3. Mishra B. K., Murty C. On the determination of contact parameters for realistic DEM simulations of ball mills. *Pow. Technology*. 2001. Vol. 115, Iss. 3. pp. 290–297.

4. Djodjevic N., Shi F. N., Morrison R. D. Applying discrete element method modelling to vertical and horizontal shaft impact crushers. *Minerals Engineering*. 2003. Vol. 16, Iss. 10. pp. 983–991.

5. Pivnyak G. G., Vaisberg L. A., Kirichenko V. I., Pilov P. I., Kirichenko V. V. Grinding. Energy and technology: a textbook for universities. Moscow: «Ruda i Metally» Publishing house, 2007. 296 p.

6. Beloglazov I. I., Ikonnikov D. A. Computer simulation methods for crushing process in an jaw crusher. *VII International Scientific Practical Conference «Innovative Technologies in Engineering». IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 142, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012074.

7. Refahi A., Aghazadeh Mohandes J., Rezai B. Comparison between bond crushing energy and fracture energy of rocks in a jaw crusher using numerical simulation. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2009. Vol. 109. pp. 709–717.

8. Legendre D., Zevenhoven R. Assessing the energy efficiency of a jaw crusher. *Energy*. 2014. Vol. 74. pp. 119–130.

9. Cleary P. W., Sinnott M. D. Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 1 — Compression crushers. *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 74. pp. 178–197.

10. Arsentyev V. A., Blekhman I. I., Blekhman L. I., Vaisberg L. A., Ivanov K. S., Krivtsov A. M. Dynamics of particles and discrete element methods as a tool of studies and optimization of natural and man-made materials processing. *Obogashchenie Rud*. 2010. No. 1. pp. 30–35.

11. Maksarov V. V., Olt J. Dynamic stabilization of machining process based on local metastability in controlled robotic systems of CNC machines. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2017. Vol. 226. pp. 446–451.
12. Vaisberg L. A., Demidov I. V., Ivanov K. S. Mechanics of granular media under vibration action: the methods of description and mathematical modeling. *Obogashchenie Rud*. 2015. No. 4. pp. 21–31. DOI: 10.17580/or.2015.04.05.
13. Next generation DEM particle simulator. URL: <http://www.rocky-dem.ru/rocky/review/> (accessed: 12.04.2018).
14. Aminov V. N., Kameneva E. E., Ustinov I. D. Modeling of rock material crushing for crushed stone production. *Obogashchenie Rud*. 2017. No. 4. pp. 3–6. DOI: 10.17580/or.2017.04.01.
15. Schubert W., Jeschke H. DEM-simulation of the breakage process in an impact crusher. *Wissensportal baumaschine.de*. 2005. 4.
16. Khanal M., Schubert W., Tomas J. Ball impact and crack propagation — simulations of particle compound material. *Granular Matter*. 2004. Vol. 5, Iss. 4. pp. 177–184.
17. Mikhailov A. V. Coal-peat compositions for co-combustion in local boilers. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2016. Vol. 220. pp. 538–544.
18. Bruchmuller J., Gu S., van Wachem B. G. M., Luo K. H. Modelling discrete, incremental, repetitive and/or simultaneous particle breakage. *7th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2010, Tampa, FL, May 30 – June 4, 2010*.
19. Preparata F., Shamos M. Computational geometry: an introduction. Moscow: Mir, 1989. 478 p.
20. Stamboltzis G. A. Calculation of Gates–Gaudin–Schuhmann and Rosin–Rammler parameters from the size analysis of the coarse part of the distribution. *Mining and Metallurgical Annals*. 1989. No. 72–73. pp. 29–38.
21. <http://www.jkmrc.uq.edu.au/>
22. Vaisberg L. A., Kameneva E. E. X-ray computed tomography in the study of physico-mechanical properties of rocks. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 9. pp. 85–90.

УДК 534.1: (622.73 + 622.74)

ВИБРАЦИОННАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОСОБО ХРУПКОГО МИНЕРАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

В. В. ГЛАДКОВА, С. В. КАЗАКОВ (НПК «Механобр-техника», г. Санкт-Петербург, РФ),
К. Г. КАРАПЕТЯН (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, РФ),
А. А. ОТРОЩЕНКО (Пермский государственный национальный исследовательский
университет, г. Пермь, РФ)*

Исследованы варианты дробления и вибрационной классификации особо хрупкого материала стеклоапатита, используемого в агротехнике в качестве удобрения пролонгированного действия. Показано, что минимальное переизмельчение стеклоапатита достигается при применении виброконусной дробилки, а эффективность грохочения на стальных просеивающих поверхностях выше, чем на полиуретановых.

Ключевые слова: вибрационное дробление, вибрационное грохочение, сыпучие материалы, хрупкие материалы, минеральные удобрения.

DOI: 10.17580/or.2018.02.02

Важным направлением в современной агротехнике является использование минеральных удобрений и модификаторов почв пролонгированного действия. К отличительным особенностям подобного типа веществ относятся их химический состав и физическая форма внесения в почву, которые обеспечивают мед-

* Гладкова Виктория Валентиновна — старший инженер, gladkova_vv@npk-mt.spb.ru; Казаков Сергей Владимирович — ведущий конструктор, канд. техн. наук, kazakov_sv@npk-mt.spb.ru; Карапетян Кирилл Гарегинович — доцент, канд. хим. наук; karapetian@spmi.ru; Отрощенко Анатолий Анатольевич — зав. лабораторией, alfa.distress@gmail.com.

© Гладкова В. В., Казаков С. В., Карапетян К. Г.,
Отрощенко А. А., 2018

ленное и равномерное растворение или выщелачивание ценных компонентов при взаимодействии с биологической средой (так называемый эффект «леденца»). Использование удобрений пролонгированного действия позволяет повысить эффективность абсорбции ценных элементов по сравнению с порошковыми поликристаллическими удобрениями ориентировано-но с 50 до 90–95 %.

Типичный пример такого удобрения — гранулированный стеклообразный апатит, получаемый путем спекания апатитового концентрата в присутствии фосфорной кислоты с последующей нейтрализацией фосфатной пульпы. На стадии спекания в шихту могут быть внесены те или иные микроэлементы. По принятой технологии полученная после спекания