

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКЕ

И. И. БЕЛОГЛАЗОВ, Д. А. ИКОННИКОВ

*Национальный минерально-сырьевой университет „Горный“ 199106, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: filosofem@mail.ru*

Рассматривается использование метода дискретных элементов при моделировании процесса измельчения горной массы в щековых дробилках. Исследуется взаимодействие между стенками щековой дробилки и загружаемым материалом. Поэтапно представлен процесс моделирования начиная с проектирования конструкции дробилки в системе твердотельного и поверхностного моделирования Solig Edge. Моделирование процесса дробления базировалось на экспериментальных данных, полученных на дробильной установке BOYD. Приведены результаты исследования процесса разрушения материала и распределения частиц по крупности. Проведен сравнительный анализ по сопоставлению результатов фактического эксперимента и моделирования.

Ключевые слова: моделирование, щековая дробилка, метод дискретных элементов, дробление, крупное дробление

Введение. На современных горно-добывающих предприятиях одним из основных способов добычи и транспортирования горной массы является применение циклично-поточной технологии. Использование конвейерного транспорта, с одной стороны, позволяет снизить расходы на энергоносители и повысить производительность труда, а с другой — предусматривает определенные требования к качеству транспортируемого материала, одним из основных параметров которого является максимальный размер куска горной породы.

Подготовка горной массы к обогащению включает весьма энергозатратный процесс дробления. Первоначально измельчение горной породы производится посредством буровзрывных работ. Для последующего дробления материала до максимально допустимого на конвейерном транспорте применяются дробильные установки крупного дробления, в основном представленные щековыми дробилками, получившими широкое распространение.

Принцип работы щековой дробилки основан на сжатии материала ее поверхностями (щеками). К преимуществам щековых дробилок следует отнести простоту конструкции, надежность, а также небольшие размеры и массу, что обеспечивает несложность обслуживания и ремонта; недостатком же щековых дробилок является периодичный режим работы и специфическое движение основных узлов (качающихся масс).

В научной литературе достаточно широко описывается работа такого оборудования, как шаровые мельницы, мельницы самоизмельчения и т.п. [1—4], тогда как по моделированию щековых дробилок в настоящее время можно найти лишь небольшое количество публикаций [5—8]. Моделирование процесса измельчения материала в щековой дробилке является интересной и актуальной задачей, решение которой позволит максимально оптимизировать процесс и повысить эффективность оборудования при транспортировке и переработке горных пород.

В настоящей статье представлены результаты исследований по взаимодействию между стенками щековой дробилки BOYD и загружаемым материалом с использованием метода дискретных элементов.

Метод дискретных элементов. Моделирование процесса дробления обеспечивает максимально эффективный режим работы агрегата, а также позволяет наглядно изучить процесс измельчения, заглянуть „внутрь“ процесса дробления. Метод дискретных элементов (МДЭ) представляет собой один из новых эффективных инструментов моделирования для исследования процесса разрушения различных материалов [8—10]. Фундаментальным предположением, лежащим в основе метода, является представление материала совокупностью отдельных, дискретных взаимодействующих частиц (чаще всего сферических), движущихся согласно классическим законам Ньютона с учетом внешних полей сил (учитывается гравитация, трение, инерция, упругое взаимодействие). МДЭ позволяет получить исчерпывающие сведения о любой частице в конкретный момент времени: местоположение, действующие силы, скорость, ускорение, направление движения и энергия частицы.

При реализации МДЭ цикл расчета представляет собой пошаговое вычисление физических процессов, происходящих за единицу времени, в течение которого закон движения применяется к каждой частице материала и к каждому контакту их поверхностей. Сформированные начальные условия для поверхностей дробилки и частиц материала учитывают положение сил взаимодействия и скорости движения частиц. Граничные условия обновляются в процессе моделирования, кроме того, взаимодействия между элементами формируются и прекращаются автоматически. Цикл расчета в общем виде приведен на рис. 1. Расчет производится за один шаг моделирования — в среднем в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-6} с.

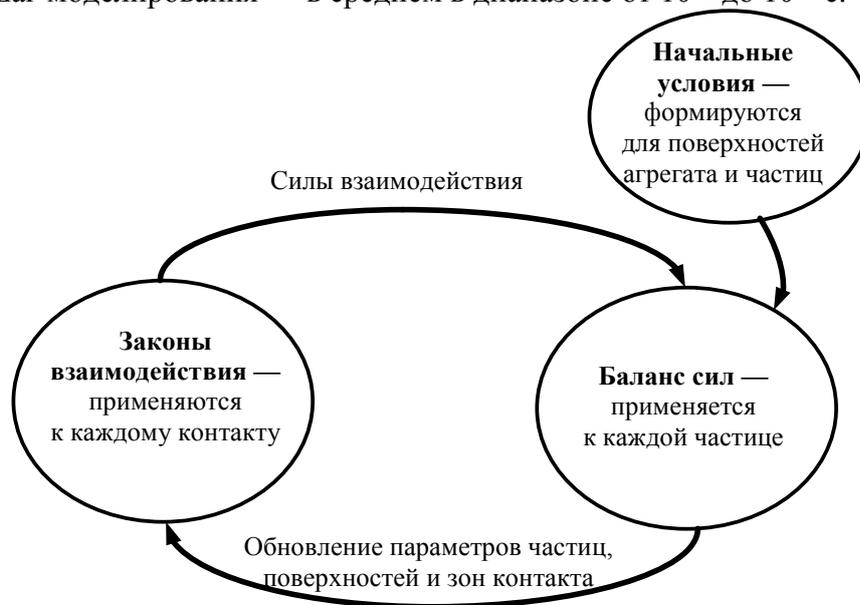


Рис. 1

Использование МДЭ требует относительно простых, но ресурсоемких компьютерных вычислений. Кроме того, для поддержания гибкости системы необходимо современное программное обеспечение с возможностью оперативного изменения параметров модели, параметрической оптимизации, дополнения модели свойствами, не предполагавшимися на начальной стадии разработки, и тестирования ряда конструкций с целью выбора эффективного решения.

В качестве такого инструмента из многообразия различных программных пакетов и открытых интегрируемых платформ [10, 11], существующих на сегодняшний день, был выбран программный комплекс Rocky [12] для моделирования технологических процессов с использованием сыпучих материалов и соответствующего оборудования. Моделирование производилось в специализированной лаборатории кафедры автоматизации технологических процессов и производств Горного университета (Санкт-Петербург) с использованием рабочей станции.

Параллельно были проанализированы результаты физических экспериментов по дроблению материалов на реальных установках.

Моделирование конструкции. Моделирование процесса дробления ограничивается рабочей зоной щековой дробилки, т.е. пространством, где происходит измельчение материала и непосредственно движение прилегающих геометрических поверхностей (щек дробилки). Моделирование конструкции дробилки в реальном масштабе было произведено в системе твердотельного и поверхностного моделирования Solid Edge [13]. Конструктивные детали, которые усложняют процесс моделирования или не участвуют в нем (например, вал, каркас, шатун и т.п.), не вошли в трехмерную модель. Использование Solid Edge в качестве среды трехмерного моделирования позволяет не только легко произвести построение модели, но и достаточно быстро и эффективно ввести любые изменения в конструкцию. В дальнейшем созданная модель легко импортируется в комплекс Rocky (рис. 2).

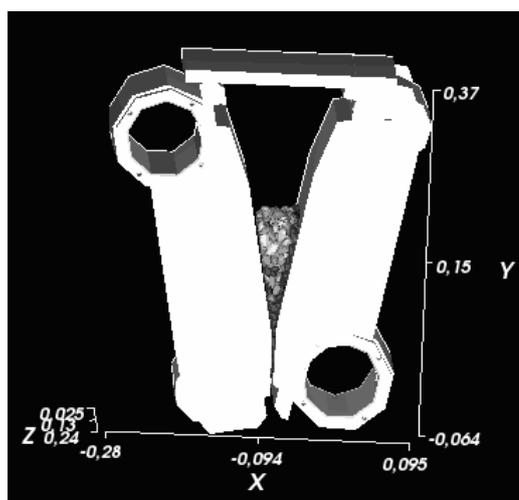


Рис. 2

Моделирование материала. В качестве материала для дробления был выбран строительный бетон, свойства которого хорошо изучены. Программные возможности комплекса Rocky позволяют задавать для генерируемых частиц большое количество параметров, например следующие.

| | |
|--|-------------------|
| Вращение частиц | Да |
| Сопротивление качению | 0 |
| Вертикальное отношение | 1,50 |
| Горизонтальное отношение | 0,75 |
| Количество углов | 25 |
| Плотность материала, кг/м ³ | 1600 |
| Жесткость загрузки, Н/м ² | 1·10 ⁸ |
| Объемная плотность | Не учитывается |

В отличие от множества других средств моделирования с помощью МДЭ, в которых используются частицы сферической или другой предустановленной формы [14, 15], комплекс Rocky предусматривает возможность выбора произвольной геометрии частиц. Это позволяет максимально учитывать особенности используемого материала и его структуры при разрушении.



Рис. 3

В качестве формы частицы был выбран сложный многогранник (рис. 3).

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

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

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

В этом случае общая удельная энергия контакта определяется как

$$E_t = E_{\text{cum}} + E - E_{\min},$$

где E_{cum} — накопленная энергия предыдущих контактов, E — текущая энергия контакта.

Вероятность разрушения частиц рассчитывается по формуле [16]

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

где S — параметр прочности, характеризующий разрушение частиц.

Если частица разрушена, то ее фрагменты генерируются по алгоритму разрушения Вороного [17] согласно распределению, указанному в соответствии со встроенной функцией T_{10} :

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

где M — константа выбранного материала.

Распределение размера фрагментов, образовавшихся в результате разрушения частиц, определяется исходя из величины T_{10} . Распределение частиц по крупности рассчитывается на основе модели Gaudin — Schumann [18], где массовая доля частиц сохраняется в каждом интервале вычислений и рассчитывается с помощью следующего уравнения:

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

где x — размер частиц на выходе, k — константа размера частиц, m — константа распределения.

Параметры моделирования приведены ниже.

| | |
|--|-------|
| Минимальный размер частицы, м | 0,005 |
| Стандартный размер частицы, м..... | 0,007 |
| Минимальная удельная энергия, Дж/кг..... | 0 |
| Максимальное значение функции T_{10} | 10,00 |

Следует отметить, что выше приведены лишь некоторые параметры моделирования. Функционал программы Rocky охватывает большее количество свойств частиц и параметров процесса.

Кроме того, необходимо учитывать количество частиц, участвующих в моделировании. При дроблении в реальных условиях нет ограничений по количеству частиц и степени их измельчения, однако при численном моделировании необходимо задавать граничные условия, что связано с конкретными вычислительными возможностями. К примеру, для численной обработки всего 1000 частиц потребуется около 20 ч вычислений на рабочей станции с 9 ядрами.

Моделирование динамики движения поверхностей (щека). В дробилках со сложным движением подвижная поверхность (щека) верхней головкой закреплена на эксцентричной части главного вала, выполняя одновременно роль шатуна. В нижней части вала шатун прикреплен к распорной плите, способной совершать колебательные движения около неподвижной точки. Благодаря такому закреплению при вращении главного вала движение различных точек щеки происходит по сложной траектории, описываемой эллипсом. При приближении подвижной щеки к неподвижной одновременно совершается движение подвижной щеки вниз, при этом материал, помимо сжатия, подвергается касательному воздействию, вследствие чего происходит как бы проталкивание материала и легкое его истирание. Таким образом осуществляется полупринудительная выгрузка дробленого материала.

Вследствие этого при одинаковых размерах дробилок именно дробилки со сложным движением щеки более производительны, что представляет особый интерес для моделирования

и оптимизации движения. Программный комплекс Rocky позволяет реализовать такое сложное движение путем настройки его частоты и амплитуды.

Кроме движения щеки дробилки, следует учитывать физические характеристики поверхности и контролировать (при необходимости) износ „щековой брони“.

Калибровка и эксперименты. Прежде чем выполнить моделирование процесса измельчения, необходимо провести калибровку статических параметров, т.е. оценить распределение частиц по крупности и число степеней свободы.

Путем задания значений параметров материала формируются данные для калибровки и производится сравнение эксперимента и модели (см. таблицу).

| Параметр | Эксперимент | Модель |
|--|--|--|
| Исходный материал | Агрегатное состояние | Около 1200 частиц |
| Плотность материала, кг/м ³ | 1600 | 1600 |
| Средний диаметр частицы, мм | 0,1...16 | 5...16 |
| Жесткость | Агрегатная — 30...40 кН/мм ² | Цементы — 5·10 ⁶ Н/м |
| Сила | Компрессионная — более 35 Н/м | Нормальная — более 1,5·10 ⁷ Н/м ² |
| Коэффициент трения (бетон-сталь) | 0,3 | 0,3 |

Следует отметить, что необходимо уделять внимание возможности трансляции результатов моделирования относительно таких технологических параметров, как распределение частиц по крупности или удельный расход энергии. Далее, параметры модели и материала изменяются до тех пор, пока не будут соответствовать реальным. Последовательность процедуры калибровки подробно описана в работах [19, 20].

Данные, приведенные в работе [20] и основанные на реальных экспериментах с использованием щековой дробилки BOYD, использовались в процессе последующей калибровки модели и проверки результатов моделирования. При проведении натурных экспериментов по дроблению изменялись следующие параметры процесса: скорость подачи материала (определенной крупности) изменялась от 0,5 до 4,0 т/ч, что соответствует объемной доле твердых частиц в рабочей зоне 2,6...12,4 %, скорость вращения ротора изменялась от 25 до 38 м/с.

На рис. 4 представлен график распределения частиц (N) по крупности (D) полученных измельченных продуктов при различных скоростях вращения ротора (V). Экспериментальные кривые распределения соответствуют определенному порядку: чем выше скорость ротора, тем мельче получаемый продукт; кривая, отражающая результаты моделирования, расположена чуть ниже экспериментальных кривых, поскольку минимальная крупность моделируемых частиц составляла 5 мм. Выбор указанной крупности частиц был лимитирован временем расчетов.

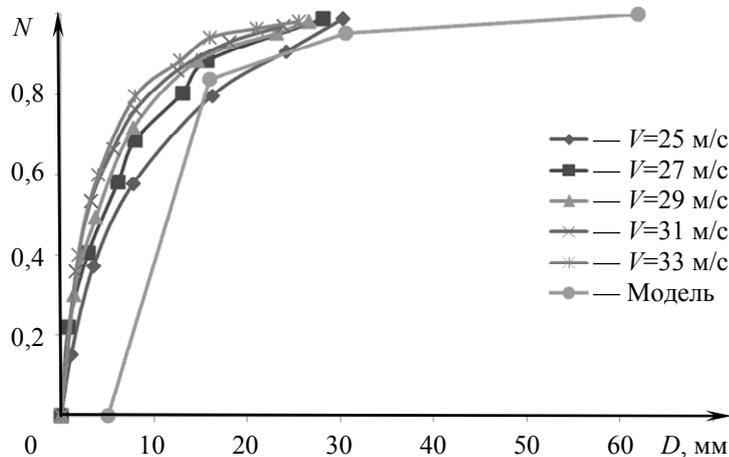


Рис. 4

Заключение. Моделирование процесса измельчения горной массы с использованием щековой дробилки является лишь одним из многих примеров применения метода дискретных элементов. Особенности такого моделирования могут послужить основой для более детального изучения процесса с учетом следующих условий:

— взаимодействие различных пакетов специализированного программного обеспечения позволяет оперативно изменять элементы конструкции и оптимизировать работу агрегата, что обеспечивает возможность мгновенно импортировать результаты моделирования для последующей оценки;

— при моделировании процесса невозможно учитывать несоизмеримо большое количество частиц, образующихся в результате измельчения, что приводит к значительному увеличению времени расчетов; в этом случае процесс моделирования может быть описан как распределение Максвелла по скоростям в изотропной системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morton D., Dunstull S.* Using the Web to increase the availability of DEM-based mill modelling // *Minerals Engineering*. 2004. N 17. 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. N 17. 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. N 115. P. 290—297.
4. *Djordjevic N., Shi F. N., Morrison R. D.* Applying discrete element method modelling to vertical and horizontal shaft impact crushers // *Minerals Engineering*. 2003. N 16. P. 983—991.
5. *Tomas J., Schreier M., Gröger T., Ehlers S.* Impact crushing of concrete for liberation and recycling // *Powder Technology*. 1999. N 105. P. 39—51.
6. *Refahi A., Aghazadeh Mohandesi J., Rezai B.* Comparison between bond crushing energy and fracture energy of rocks in a jaw crusher using numerical simulation // *J. of the South. African Inst. of Mining and Metallurgy*. 2009. Vol. 109. P. 709—717.
7. *Legendre D., Zevenhoven R.* Assessing the energy efficiency of a jaw crusher // *Energy*. 2014. Vol. 74. P. 119—130.
8. *Cleary P. W., Sinnott M. D.* Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: P. 1. Compression crushers // *Minerals Engineering*. 2015. Vol 74. P. 178—197.
9. *Арсентьев В. А., Блехман И. И., Блехман Л. И., Вайсберг Л. А.* Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных и техногенных материалов // *Обогащение руд*. 2010. № 1. С. 30—35.
10. *Феоктистов А. Ю., Блехман Л. И., Васильков В. Б., Иванов К. С.* Применение метода дискретных элементов для моделирования процессов в горно-металлургической промышленности // *Записки Горного ин-та*. 2011. Т. 192, № 1.
11. *Cundall P. A., Potyondy O., Konietzky H.* Manual of the DEM Program System Particle Flow Code in 2 and 3 Dimensions (PFC) Vers. 3.1. Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group Inc., 2005.
12. Электронный ресурс: <<http://www.rocky-dem.ru/rocky/review/>>.
13. *Белокопытов С. А., Лепестов А. Е., Мельников А. Н.* Конструирование специального оборудования в среде Solid Edge // *CADmaster*. 2014. № 5 (78). С. 35—39.
14. *Schubert W., Jeschke H.* DEM-Simulation of the breakage process in an impact crusher // *Wissensportal Baumaschine.de* 4. 2005.
15. *Khanal M., Schubert W., Tomas J.* Ball impact and crack propagation — simulations of particle compound material // *Granular Matter*. 2004. N 5 (4). P. 177—184.
16. Modelling discrete, incremental, repetitive and/or simultaneous particle breakage / *J. Bruchmuller, B.G.M. van Wachem, S. Gu, K.H. Luo* // *Proc. of the 7th Intern. Conf. on Multiphase Flow (ICMF 2010)*, Tampa, FL, May 30 — June 4, 2010.

17. *Препарата Ф., Шеймос М.* Вычислительная геометрия. Введение. М.: Мир, 1989.
18. *Stamboltzis G. A.* Calculation of Gates — Gaudin — Schuhmann and Rosin Rammmler parameters from the size analysis of the coarse part of the distribution // *Mining and Metallurgical Annals*. 1989. N 72—73. P. 29—38.
19. *Кривцов А. М.* Деформация и разрушение твердых тел с микроструктурой. М.: Физматлит, 2007. 304 с.
20. *Schubert W., Khanal M., Tomas J.* Impact crushing of particle-particle compounds — experiment and simulation // *Intern. Journal of Mineral Processing*. 2005. N 75 (1—2). P. 41—52.

Сведения об авторах

- Илья Ильич Белоглазов** — канд. техн. наук; НМСУ „Горный“, кафедра автоматизации технологических процессов и производств; E-mail: filosofem@mail.ru
- Дмитрий Андреевич Иконников** — канд. техн. наук; НМСУ „Горный“, кафедра безопасности производств; E-mail: ArtSciencesD@gmail.com

Рекомендована Университетом

Поступила в редакцию
05.04.16 г.

Ссылка для цитирования: *Белоглазов И. И. Иконников Д. А.* Применение метода дискретных элементов для моделирования процесса измельчения горных пород в щековой дробилке // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 9. С. 780—786.

**APPLICATION OF THE DISCRETE ELEMENT METHOD
FOR MODELING OF ROCKS CRUSHING IN A JAW CRUSHER**

I. I. Beloglazov, D. A. Ikonnikov

*Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Russia
E-mail: filosofem@mail.ru*

Application of the discrete element method for modeling of rocks crushing in a jaw crusher is considered. Interaction between the jaw crusher walls and the bulk material under processing is studied. The process of modeling is examined stage by stage starting from the crusher construction design in solid and surface-modeling system Solid Edge. Modelling of the crushing process is based on experimental data obtained using the crushing unit BOYD. Results of the study of the material crushing process and size distribution of the rock mass pieces are presented. Comparative analysis of actual experimental data with the modeling process is performed.

Keywords: modeling, jaw crusher, discrete element method, crushing, coarse crushing

Data on authors

- Ilya I. Beloglazov** — PhD; St. Petersburg Mining University, Department of Technological Process Automation and Production; E-mail: filosofem@mail.ru
- Dmitry A. Ikonnikov** — PhD; St. Petersburg Mining University, Department of Industrial Safety; E-mail: ArtSciencesD@gmail.com

For citation: *Beloglazov I. I., Ikonnikov D. A.* Application of the discrete element method for modeling of rocks crushing in a jaw crusher // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 9. P. 780—786 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-9-780-786