

А.Ю.ФЕОКТИСТОВ, канд. техн. наук, ассистент, feoktistov.a.u@gmail.com

А.А.КАМЕНЕЦКИЙ, студент, laytin@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный горный университет

Л.И.БЛЕХМАН, старший научный сотрудник, iliya.i.blekhman@gmail.com

В.Б.ВАСИЛЬКОВ, ведущий научный сотрудник

Институт проблем машиноведения Российской академии наук

И.Н.СКРЯБИН, технический директор, i.skryabin@axis-tech.ru

ООО «Аксистек»

К.С.ИВАНОВ, инженер, ivanoff.k.s@gmail.com

ОАО «НПК «Механобр-техника»», Санкт-Петербург

A.J.FEOKTISTOV, PhD in eng. sc., assistant lecturer, feoktistov.a.u@gmail.com

A.A.KAMENECKI, student, laytin@mail.ru

Saint Petersburg State Mining University

L.I.BLEKHMAN, senior research assistant, iliya.i.blekhman@gmail.com

V.B.VASILKOV, leading research assistant

Institute of problems of mechanical engineering of RAS

I.N.SKRYABIN, technical director, i.skryabin@axis-tech.ru

Axistec Co

K.S.IVANOV, ingeneur, ivanoff.k.s@gmail.com

“NPK «Mechanobr-technica»” Co, Saint Petersburg

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рассмотрена возможность использования метода дискретных элементов для моделирования промышленных технологических процессов. Расчеты выполнены применительно к процессам сегрегации, измельчения в шаровых мельницах и загрузки шахтных печей известняковой шихтой. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными.

Ключевые слова: метод дискретных элементов, сыпучий материал, сегрегация, шаровая мельница, шахтная печь, компьютерное моделирование.

THE APPLICATION OF DISCRETE ELEMENT METHOD TO MINING AND METALLURGY PROCESS MODELING

The capability of the discrete element method (DEM) for the estimation of industrial processes was examined. Estimation evaluated for processes of segregation, grinding in a ball mill and feeding for shaft furnace. Estimated results had compared with experimental work results.

Key words: discrete element method, bulk material, segregation, ball mill, shaft furnace, computer modeling.

Метод дискретных элементов (DEM – Discrete Element Method) является обобщением метода конечных элементов (FEM). Распространение метода дискретных эле-

ментов на решение разнообразных задач, встречающихся в горно-металлургической промышленности, связано с развитием вычислительной техники и появлением соот-

ветствующего программного обеспечения. Метод позволяет моделировать поведение большого количества частиц сыпучего вещества в процессе выполнения различных промышленных операций, в том числе горной и металлургической отрасли.

В работе приводятся примеры использования метода дискретных элементов для моделирования поведения сыпучих сред в следующих технологических процессах:

- моделирование загрузки шахтной печи известняковой шихтой с равномерным распределением по всему объему печи;
- моделирование процесса вибрационной сегрегации;
- моделирование движения шаровой загрузки в мельницах с различной формой сечения рабочей камеры.

Компьютерное моделирование процессов проводилось с использованием программного пакета EDEM. Отличительная способность пакета – возможность взаимодействия с другими САПР-приложениями (в частности, с пакетом Fluent компании ANSYS Inc.). Мощная встроенная система визуализации позволяет выявить «слабые места» в элементах оборудования, рассчитать износ оборудования, представить результаты моделирования в виде цветных графиков и гистограмм, отображающих кинематические и динамические характеристики.

Пакет уже получил широкую известность среди представителей фармацевтической, химической и горно-добывающей отраслей, а также сельскохозяйственной сферы. Он активно используется в ряде университетов (Rutgers University, New Jersey Institute of Technology, University of Cape Town, University of Queensland и др.).

Моделирование загрузки шахтной печи. При загрузке шахтной печи обжига известняком существует проблема равномерного распределения шихты внутри печи [3]. Шибер в рассматриваемой конструкции печи, открывающий нижний проход шлюза и обеспечивающий тем самым просыпку материала внутрь без разгерметизации, совершает поступательное движение только в одну сторону во время открытия. Шихта начинает сыпаться сначала с одного края и

только спустя некоторое время происходит равномерная выгрузка шихты из шлюза. Это приводит к скоплению большого количества необожженной шихты с одной стороны шахты, что вызывает неравномерный обжиг известняка.

Для обеспечения равномерного распределения известняка по всему объему печи необходимо было разработать модель загрузочного устройства соответствующих геометрических размеров. Проверка эффективности предложенного устройства загрузки шихты осуществляется с использованием программного пакета EDEM. Результаты моделирования представлены на рис.1.

Для равномерного распределения материала используется воронка, концентрирующая шихту по вертикальной оси шахты печи, и конус, который, смещаясь вниз, освобождает проход для материала и осуществляет его равномерное рассеяние

Для моделирования задавались близкие к реальным параметры известняковой шихты (гранулометрический состав, плотность, коэффициент Пуассона и т.д.), а также соответствующие парные коэффициенты трения и восстановления для известняка и шахты печи (сталь 3).

На рис.2 видно, что распределение материала происходит достаточно равномерно и поэтому применение разработанного устройства можно считать обоснованным.

Моделирование процесса вибрационной сегрегации. Сегрегационный способ разделения сыпучего материала по крупности основан на следующем. При продвижении по вибрирующей поверхности расслоение материала по высоте слоя происходит таким образом, что крупные частицы «всплывают» вверх, а мелкие оказываются внизу [1]. Экспериментальные исследования по разделению сыпучего материала (отсев щебня) с использованием отсекающей пластины для разделения слоев первоначально проводились на специальном вибрационном стенде [4] “НПК «Механобр-техника»”. Затем был выполнен расчет в программном пакете EDEM и сравнение результатов. В качестве исходных данных был задан гранулометрический состав материала, отвечаю-

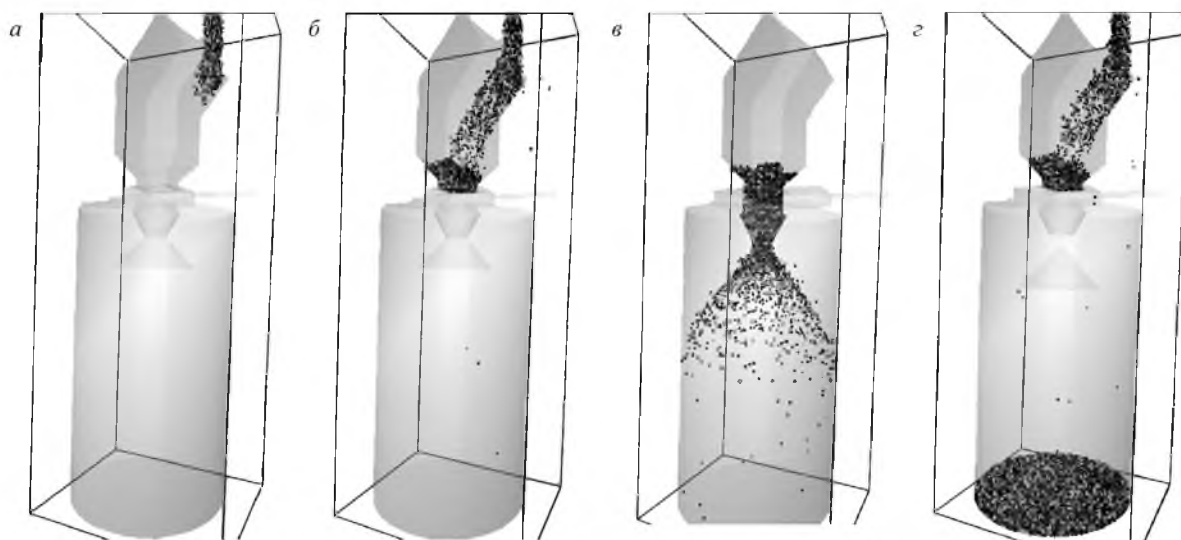


Рис. 1. Моделирование процесса загрузки шахтной печи: *а* – поступление материала в шлюз из виртуальной плоскости, имитирующей скип, $t = 0,4$ с; *б* – открытие шибера, $t = 2,5$ с; *в* – материал просыпается внутрь шахты, $t = 7,5$ с; *г* – первая порция шихты загружена, поступает следующая порция, шибер закрыт, $t = 11,8$ с

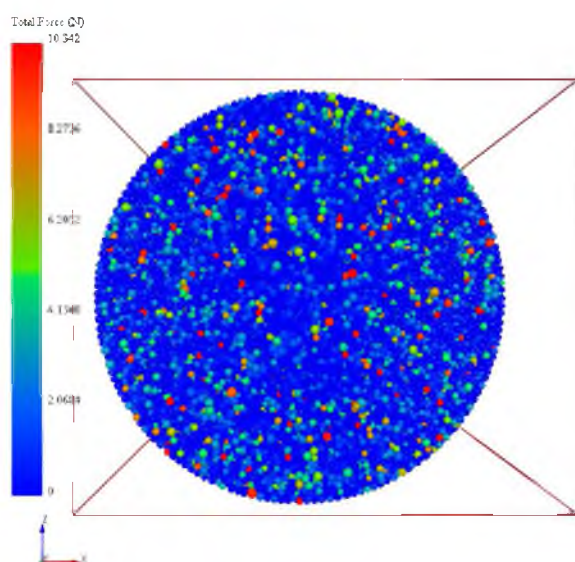


Рис.2. Распределение шихты по ходу шахтной печи

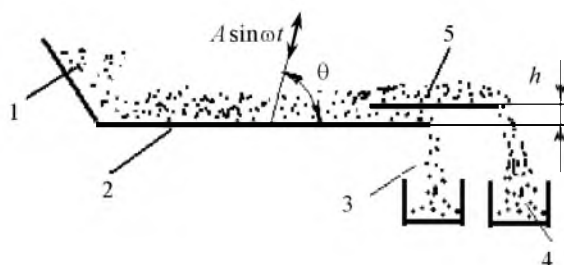


Рис.3. Схема устройства для исследования процесса сегрегации

1 – бункер; 2 – лоток; 3 – нижний продукт; 4 – верхний продукт; 5 – отсекающая пластина

ший экспериментальным исследованиям, геометрические параметры: угол вибрации θ , амплитуда A и частота колебаний ω , время t , высота установки отсекающей пластины h (рис.3). Контролировался выход мелкой фракции ($-0,18$ мм) в нижний и верхний продукт. Результаты моделирования показаны на рис.4.

Содержание в исходном материале мелкой фракции ($-0,18$ мм) в экспериментах

и в модели составляло 11,61 %, крупной фракции $+0,18$ мм – 88,39 %).

Натурный эксперимент и математическое моделирование дали следующие результаты. Содержание в нижнем продукте мелкой фракции ($-0,18$ мм): в эксперименте 22,35 %, в модели 24,51 % (соответственно верхней фракции в этом продукте 77,65 и 75,49 %). Содержание в верхнем продукте мелкой фракции: в эксперименте

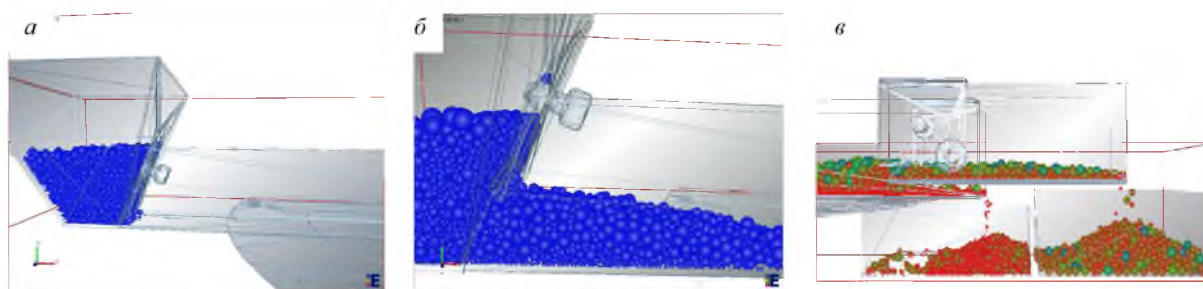


Рис.4. Моделирование работы сегрегационного устройства: *а* – шибер бункера открывается, $t = 1,24$ с; *б* – шибер открыт (происходит процесс сегрегации), $t = 4,05$ с; *в* – процесс сегрегации завершился (разделение материала отсекающей плоскостью на верхний и нижний продукты), $t = 48,9$ с

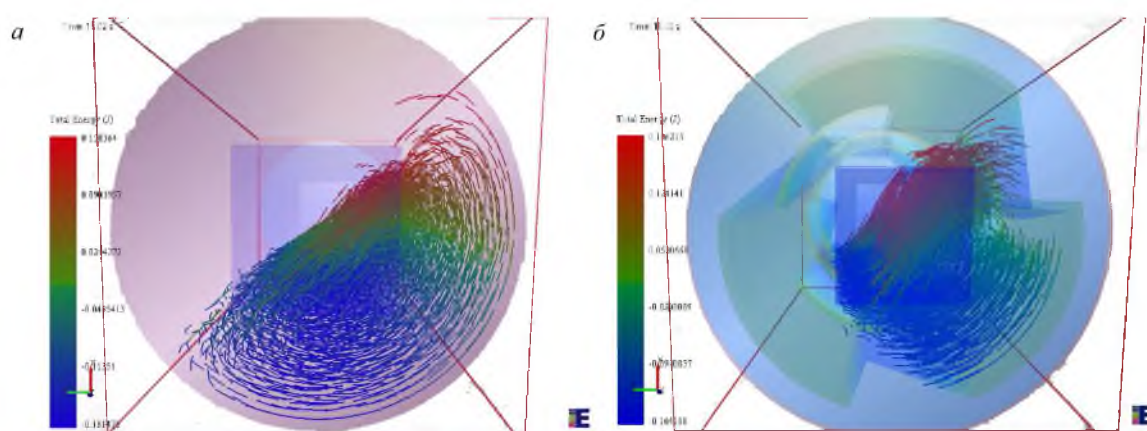


Рис.5. Движение загрузки в мельнице с цилиндрической формой камеры (*а*) и с сечениями некруговой формы (*б*)

4,63 %, в модели 0,07 % (соответственно крупной фракции 95,37 и 99,93 %)

Моделирование движения шаровой загрузки в мельницах с различной формой рабочих камер. Барабанные мельницы являются традиционными машинами для измельчения. Тысячи таких машин используются на обогатительных фабриках, на предприятиях по производству строительных материалов и переработке отходов. В то же время измельчение – крайне энергоемкий процесс. На дробление и измельчение расходуется более 10 % всей добываемой в мире электроэнергии. Крупные современные шаровые мельницы имеют барабаны диаметром до 8 м и привод мощностью до 14000 кВт, а мельницы самоизмельчения – барабаны диаметром до 13 м и привод мощностью до 22000 кВт. Поэтому повышение энергоэффективности мельниц является важнейшей технической задачей.

Перспективным направлением значительного снижения энергозатрат на измельчение является использование мельниц с нетрадиционной формой рабочей камеры. Изменение формы камеры в этих мельницах позволяет «турбулизировать» движение загрузки, вовлечь в процесс так называемое малоподвижное ядро. Предложено, в частности, использовать камеры с сечениями в виде неосесимметричной трехлепестковой фигуры, имеющие в продольном направлении форму дискретной спирали [2]. Механика движения загрузки в таких мельницах значительно сложнее, чем в стандартных, где она также весьма сложна.

Использование компьютерного моделирования позволяет исследовать движение загрузки в мельницах разных конструкций с различными формами камеры и типами футеровок, при любых значениях степени заполнения барабана, частоты его вращения и при

любом составе мелющих тел. Это дает возможность при испытаниях новых конструкций и оптимизации работы эксплуатируемых машин заменить значительную часть трудоемких технологических исследований вычислительными экспериментами. При этом такой важный количественный критерий, определяющий эффективность измельчения, как полезная мощность, легко рассчитывается как произведение веса загрузки, горизонтальной координаты ее центра тяжести и частоты вращения барабана. Расчет дает также картину пульсаций мощности, обусловленных некруговой формой сечения или автоколебательными процессами. При усложнении модели можно исследовать непосредственно процесс измельчения, а также износ футеровки и мелющих тел.

Использование программного пакета EDEM и метода дискретных элементов позволяет, «заглянув в мельницу», увидеть то, что недоступно для фотосъемки через прозрачный торец лабораторной модели. Можно, например, наблюдать распределение шаров по крупности вдоль барабана при использовании шаросортирующих футеровок. Программа дает также возможность вывода результатов в наглядном «потокосовом» виде (рис.5). На рисунке приведены результаты первых пробных численных экспериментов. Расчеты подтверждают, что в мельницах с нетрадиционной формой камеры обеспечивается интенсивное перемешивание загрузки и достигается значительное снижение энергозатрат.

Результаты компьютерного моделирования методом дискретных элементов качественно соответствуют данным, получен-

ным в экспериментах. Программный комплекс EDEM зарекомендовал себя как перспективное средство прогнозирования поведения сыпучих сред в установках горно-металлургической промышленности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 09-08-00745, № 09-08-00620).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вайсберг Л.А.* Вибрационное грохочение сыпучих материалов / Л.А.Вайсберг, Д.Г.Рубисов / Механобр. СПб, 1994. 47 с.
2. *Блехман Л.И.* Интенсификация измельчения: камеры нетрадиционной формы и нерегламентные режимы мельниц самоизмельчения / Л.И.Блехман, Е.Б.Кремер // Научная школа «Вибротехнология-97». Механическая обработка дисперсных (сыпучих) материалов и сред. Одесса, 1997. Ч.4. С.85-90.
3. *Тарасов В.П.* Загрузочные устройства шахтных печей. М.: Металлургия, 1974. 312 с.
4. Универсальный вибрационный стенд: опыт использования в исследованиях, некоторые результаты / Л.И.Блехман, Л.А.Вайсберг, Б.П.Лавров и др. // Научно-технические ведомости СПбГТУ, 2003. № 3. С.224-227.

REFERENCES

1. *Vaisberg L.A., Rubisov D.G.* Vibrational classification of bulk solid materials // *Mechanobr.* Saint Petersburg, 1994. 47 p.
2. *Blekhman L.I., Kremer E.B.* Grinding Intensification: untraditional shaped linings and irregular conditions for AG mills // Science school «Vibrotechnology-97». Mechanical treatment of dispersed (bulk) materials and mediums. Odessa, 1997. Part 4. P.85-90.
3. *Tarasov V.P.* Loading devices for shaft furnaces. Moscow: Metalurgy, 1974. 312 p.
4. *Blekhman L.I., Vaisberg L.A., Lavrov B.P., Vasilkov V.B., Yakimova K.S.* Universal vibrational test device: experience of application at research work, some results // Science-technical bulletin. SPbSTU. Saint Petersburg, 2003. N 3. P.224-227.