

Л.А. ВАЙСБЕРГ, д-р техн. наук, член-корр. РАН, К.С. ИВАНОВ, научный сотрудник, НПК «Механобр-техника» (Санкт-Петербург)

## Новые методы моделирования вибрационных грохотов

Грохочение – важнейший технологический процесс переработки минерального сырья для строительной промышленности и самый массовый процесс подготовки полезных ископаемых к обогащению. При переработке нерудных полезных ископаемых, а также строительных отходов грохочение является основным переделом, обеспечивающим выделение товарных классов крупности щебня и строительного песка.

Непосредственно на операции грохочения затрачивается 6–8% общих расходов электроэнергии в циклах обогащения. Кроме того, операции грохочения прямо влияют на расход электроэнергии в открытых и особенно в замкнутых циклах дробления, поскольку точность классификации по крупности определяет суммарную нагрузку на энергоемкое дробильное оборудование [1]. Таким образом, правильный расчет и выбор регулируемых параметров грохочения и конструкции грохотов обеспечивают реальное энергосбережение при переработке нерудных полезных ископаемых и гарантируют товарное качество конечных продуктов дробильно-сортировочных предприятий.

Благодаря возросшим возможностям вычислительной техники многие исследования, на которые еще совсем недавно потребовалось бы длительное время, могут быть проведены в считанные минуты. Это не только помогает упростить процесс разработки машин и механизмов, но и освобождает ресурсы, которые могут быть направлены на совершенствование процесса проектирования в целом, выводя его на принципиально новый уровень. Среди таких исследований перспективно применение так называемых эволюционных стратегий. Эффективность применения этих подходов может быть рассмотрена в контексте эволюционной парадигмы: при разработке нового устройства далеко не всегда можно знать наперед, в чем могут оказаться его преимущества, а процесс совершенствования в значительной степени определяется тем, что более эффективные образцы вытесняют конкурентов. Возможности современной вычислительной техники позволяют вынести заметную часть эволюционного отбора на уровень компьютерного моделирования, минимизируя тем самым часто дорогостоящие натурные эксперименты.

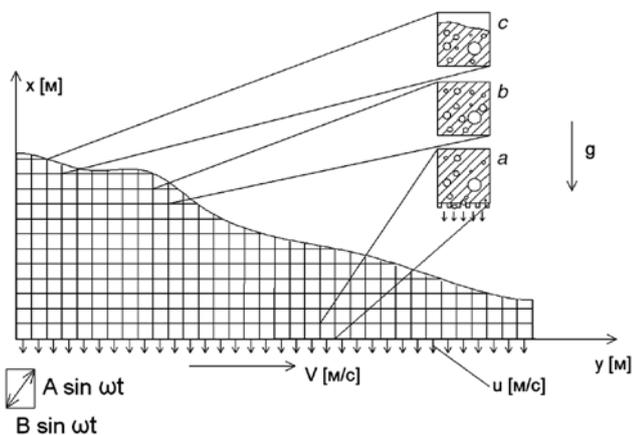


Рис. 1. Продольное сечение слоя материала на грохоте, разбиение на ячейки: а – ячейка из области контакта материала и сита; б – ячейка из толщи материала; с – ячейка поверхностного слоя

Важным условием для применения эволюционных стратегий при проектировании нового оборудования является адекватная параметризация задачи: необходимо представлять, какие параметры следует варьировать для максимизации заранее выбранной целевой функции. С помощью эволюционных методов и соответствующей модели процесса сепарации сыпучих материалов по крупности можно найти оптимальное сочетание конструктивных и технологических параметров для соответствующих устройств. Например, в НПК «Механобр-техника» в рамках работ по совершенствованию методов проектирования вибрационных грохотов созданы и непрерывно совершенствуются соответствующие методы компьютерного моделирования.

Параметризация задачи, важная роль которой отмечена выше, определяется выбранной моделью технологического процесса. Для процесса вибрационного грохочения существует множество альтернативных моделей, которые могут быть в основном отнесены к трем классам. В первую очередь это так называемые феноменологические модели, базирующиеся на разнообразных теориях процесса просеивания; эмпирические модели, выработанные на основе опыта разработки и эксплуатации оборудования; численные методы, основанные на классическом компьютерном моделировании механики взаимодействий частиц сепарируемого материала и контактирующих с ними деталей оборудования.

Классические компьютерные модели при исключительной точности и универсальности являются слишком ресурсоемкими для массовых вычислений, которые требуются для применения методов численной оптимизации; более того, оперируя геометрическими моделями, компьютерные методы не позволяют эффективно параметризовать задачу.

При построении эмпирических моделей учитывается опыт применения уже разработанных устройств, а значит, в процессе разработки принципиально нового оборудования такие модели могут играть только вспомогательную роль. Феноменологические модели недостаточно точны и учитывают слишком мало факторов. Развитие кинетических моделей проходило преимущественно по пути совершенствования частных представлений о процессах, протекающих в слое материала и в области контакта материала с просеивающей поверхностью. Дальнейшее совершенствование этих моделей привело к формированию континуального представления сыпучей среды. Новым шагом в обобщении полученных ранее результатов было предложение общего дифференциального соотношения, сводящееся при некоторых допущениях к дифференциальным уравнениям базовых моделей [1]:

$$\frac{d\varepsilon_D}{dy} = \frac{u\varphi}{v} \left(1 - \frac{D}{d_0}\right)^2 P_{D,y}(0)(1 - \varepsilon_D),$$

где  $\varepsilon_D$  – извлечение в подрешетный продукт узкого класса  $D$ ;  $v$  – скорость движения слоя материала по ситам, а выражение  $\varphi(1 - D/d_0)^2$ , где  $\varphi$  – живое сечение сита,  $d_0$  – размер отверстий, соответствует формуле Годена для вероятности прохождения одиночной частицы отверстия сита;  $u$  – скорость движения материала через отверстия сита,  $P_{D,y}(x)$  – функция распределения частиц класса  $D$  по толщине сечения.

Дальнейшие исследования в НПК «Механобр-техника» привели к созданию программы для модели-

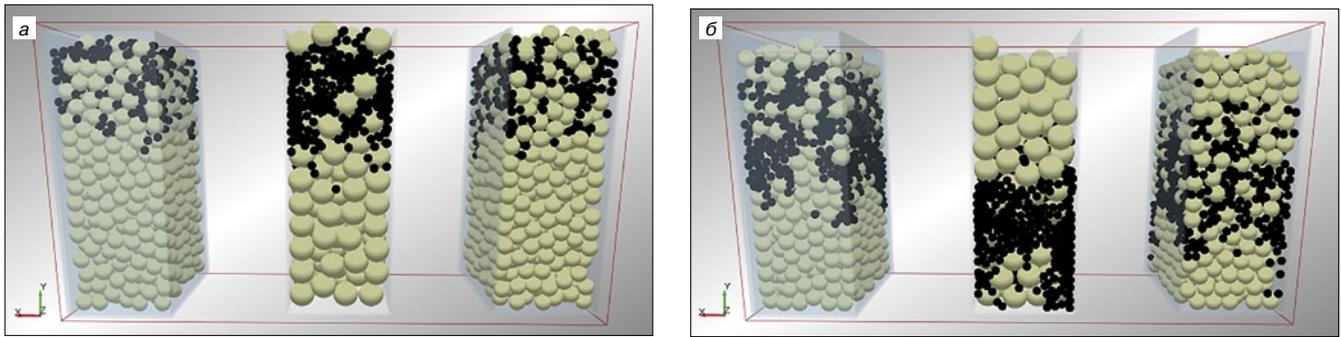


Рис. 2. Моделирование вибрационной сегрегации сыпучих материалов для различных фракционных составов и интенсивностей вибрации. Состояние после загрузки (а) и спустя 16 с вибрации (б)

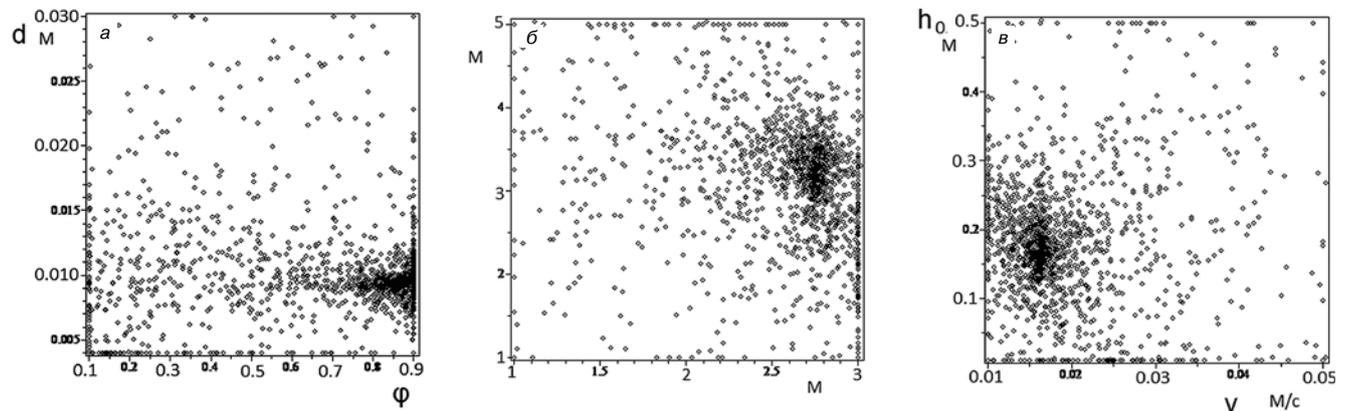


Рис. 3. Результат применения метода роя частиц совместно с предложенной моделью грохочения: а – живое сечение и диаметр отверстия сита; б – длина и ширина сита; в – скорость движения материала по ситам и толщина слоя материала под питателем

рования процесса вибрационного грохочения. В основу программы был заложен упомянутый выше подход с внесением ряда усовершенствований, касающихся процесса просеивания материала [2] и представления слоя сыпучей среды в виде массива условных ячеек (рис. 1). При этом также была учтена возможность совместного прохождения несколькими частицами отверстия в сите, для чего использована расширенная формула Годена.

Современные теоретические объяснения явления вибрационной сегрегации базируются в основном на представлениях о вибрационной конвекции и так называемом эффекте подклинивания крупных частиц мелкими. В разрабатываемой модели виброконвекция представляется как принудительный обмен частью содержимого между соседними по вертикали ячейками, а подклинивание представляется как процесс более интенсивного продвижения мелких ячеек в нижние слои благодаря их способности проходить в зазоры между частицами крупных фракций. Таким образом, в каждом слое материала происходит просеивание, в котором ситом служат крупные частицы. Если средний радиус частиц в слое равен  $\bar{R}$ , то условный диаметр отверстия сита, составленного таким слоем, составляет:

$$\bar{d} = 2 \left( \frac{2\sqrt{3}}{3} - 1 \right) \bar{R},$$

а живое сечение составит:

$$\bar{\varphi} = \frac{(2 - \sqrt{3})^2}{3\sqrt{3}} \pi.$$

В эти формулы были также внесены поправки, связанные с оживением и подбрасыванием материала при воздействии вибрации. Точность отражения такой моделью поведения частиц внутри слоя сыпучего материала, подверженного воздействию вибрации, подтверждается компьютерным исследованием с использованием метода дискретных элементов (рис. 2).

Новый подход к моделированию процесса вибрационного грохочения был положен в основу разрабатываемой программы, применяющей эволюционную стратегию для выбора оптимального сочетания технологических и конструктивных параметров устройств для разделения сыпучих материалов по крупности. Оптимизация проводится с помощью метода «роя частиц», который изначально использовался для имитации поведенческих реакций в бионике [3]. Пример работы программы автоматического поиска оптимальных параметров вибрационных грохотов представлен на рис. 3. Области сгущения точек содержат оптимальные сочетания параметров.

Таким образом, новые подходы к моделированию процессов транспортирования и сепарации сыпучих материалов, к которым относится большинство нерудных полезных ископаемых, позволяют связать физические свойства перерабатываемого сырья с конструктивными параметрами машин и механизмов и технологическими параметрами сортировки по крупности. Это, в свою очередь, открывает возможности обоснованного выбора конструктивных параметров машин, уменьшая риски и расходы на дорогостоящее натурное моделирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы, гранты 14.U02.21.0681 и 12-05-31376.

#### Список литературы

1. Вайсберг Л.А., Рубисов Д.Г. Вибрационное грохочение сыпучих материалов. СПб: Механобр, 1994, 47 с.
2. Пелевин А.Е. Вероятность прохождения частиц через сито и процесс сегрегации на вибрационном грохоте // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 1. С. 119–129.
3. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. IV, 1995, pp. 1942–1948.