

**ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ
СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЕГО РАССЕВЕ
НА ВИБРИРУЮЩЕЙ ТКАНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СЕТКЕ**

**DIGITAL SIMULATION OF BULK MATERIAL MOVEMENT DURING
ITS SCREENING ON A VIBRATING WOVEN METAL MESH/SIEVE**

В.А. ОГУРЦОВ¹, Л.А. ОПАРИНА¹, А.В. ОГУРЦОВ², М.В. ТАНИЧЕВ¹, Д.А. ПИРОГОВ¹

V.A. OGURTZOV¹, L.A. OPARINA¹, A.V. OGURTZOV², M.V. TANICHEV¹, D.A. PIROGOV¹

(¹Ивановский государственный политехнический университет,

²Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина)

(¹Ivanovo State Polytechnic University,

²Ivanovo State Power Engineering University)

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru, L.A.Oparina@gmail.com, ogurtsovav@mail.ru,
maxt_ivanovo@mail.ru, pirogov81@mail.ru

Разделение на фракции сыпучих материалов на тканых металлических сетках полотняного или саржевого переплетения широко применяется в химической, строительной, горнодобывающей, пищевой и других отраслях промышленности. Скорость движения сыпучего материала по вибрирующей металлической сетке при его расसेве является важнейшим параметром, который необходим для расчета эффективности фракционирования и производительности классификатора. Разработанные в настоящее время модели движения ансамбля частиц по вибрирующей поверхности упрощают физическую картину процесса, что приводит к значительным погрешностям в расчетах показателей процесса. Авторами разработана цифровая 3D-модель металлической сетки полотняного переплетения, которая реализует имитацию процесса движения ансамбля частиц по вибрирующему просеивающему полотну. Цифровая модель адаптирована для имитации процесса вибрационного фракционирования в программной системе Autodesk 3Ds Max. Реализовано виртуальное просеивание и движение сыпучего материала по вибрирующей сетке, которая отличается от реального сита уменьшенными габаритами. Представлены результаты численных экспериментов, демонстрирующих влияние амплитудно-частотных характеристик колебаний просеивающего полотна и угла его наклона на скорость перемещения частиц по классификатору. Цифровые эксперименты позволили использовать значение средней скорости движения сыпучей среды по

просеивающей сетке для описания процесса отсева в промышленных условиях. Определялось время пребывания частиц на реальном сите, что позволило прогнозировать эффективность фракционирования при заданной производительности промышленного аппарата. Компьютерные эксперименты отсева на виртуальном просеивающем полотне проводились при различных режимах его работы в более широких диапазонах изменения параметров колебаний, чем у промышленных аппаратов.

Separation of bulk materials into fractions on woven metal meshes of plain or twill weave is widely used in the chemical, construction, mining, food and other industries. The speed of movement of bulk material on a vibrating metal mesh during its screening is the most important parameter, which is necessary for calculating the efficiency of fractionation and the classifier performance. Currently developed models of particle ensemble motion on a vibrating surface simplify the physical picture of the process, which leads to significant errors in calculating the process indicators. The authors have developed a digital 3D model of a metal mesh with a plain weave, which simulates the process of movement of an ensemble of particles along a vibrating screening cloth. The digital model to simulate the process of vibration fractionation in the Autodesk 3Ds Max software system is adapted. The virtual screening and movement of bulk material along a vibrating mesh, which differs from a real sieve in its reduced dimensions, is implemented. The results of numerical experiments are presented demonstrating the influence of the amplitude-frequency characteristics of the screening cloth oscillations and the angle of its inclination on the speed of particle movement along the classifier. Digital experiments made it possible to use the value of the average speed of movement of the bulk medium along the screening mesh to describe the screening process under industrial conditions. The residence time of particles on a real sieve was determined, which made it possible to predict the efficiency of fractionation at a given productivity of the industrial apparatus. Computer experiments of screening on a virtual screening cloth were carried out under various modes of its operation in wider ranges of variation of the oscillation parameters than that in industrial devices.

Ключевые слова: тканая металлическая сетка, сыпучий материал, имитационное моделирование.

Keywords: woven metal mesh, bulk material, simulation modeling.

Введение

Тканые металлические сетки полотняного или саржевого переплетения имеют обширную область применения. Они используются в химической, строительной, горнодобывающей, пищевой и других отраслях промышленности [1]. Процесс сортировки сыпучих материалов по размеру частиц на вибрирующих сетках включает три составляющих: движение ансамбля частиц по ситовому полотну, миграцию частиц по виброоживленному слою, проникновение частиц, размер которых меньше

размеров ячейки сита, через него. Эффективность процесса извлечения мелких частиц из сыпучей среды зависит от времени пребывания выделенной порции сыпучего материала на сетке. Это время определяется скоростью движения частиц по просеивающему полотну. Сравнение разработанных на настоящее время теоретических моделей движения ансамбля частиц по вибрирующей поверхности показывает наличие существенных пробелов в описании законов механики транспортирования сыпучего материала по ситам. До сих пор движение ча-

стиц, которые перемещаются по вибрирующей сетке, взаимодействуя друг с другом и с просеивающей поверхностью, часто моделируют движением одиночной частицы. Такое упрощение приводит к расхождению между реальной и расчетной скоростью перемещения сыпучей среды по ситам, которое может составлять более 60% [2]. Среди методов компьютерного моделирования процесса транспортирования сыпучего материала по вибрирующей поверхности особый интерес представляют методы динамики частиц (молекулярной динамики) и дискретных элементов.

Отечественные исследователи (Научно-производственная корпорация «Механобротехника», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Институт проблем машиноведения РАН, Уральский государственный горный университет и другие) и зарубежные разработчики (США, Англия, Германия, Япония, Китай), занимающиеся процессами переработки дисперсных сред, для определения закономерностей движения ансамбля частиц в виброоживленном слое используют программные комплексы Chute Maven (Hustrulid Technologies Inc.), PFC2D и PFC3D, EDEM (DEM Solutions Ltd.), GROMOS 96, ELFEN, MIMES, PASSAGE®/DEM [3...5]. Рассматриваются двумерные и трехмерные модели. Частицы моделируются круглыми или шарообразными. Исследователи делают допущения, которые упрощают реальную картину процесса. Эмпирическое определение скорости движения сыпучего материала по вибрирующей сетке при различных амплитудно-частотных параметрах колебаний с помощью позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) или метода электроемкостной томографии (ЕСТ) требует больших материальных и трудовых затрат.

Методы

Очевидно, что цифровое моделирование реального процесса фракционирования и транспортирования частиц сыпучего материала на вибрирующем ситовом полотне весьма трудоемко из-за крупных габаритов просеивающих поверхностей классификаторов и огромного числа частиц раз-

ных размеров, которые участвуют в процессе [6...8]. Поэтому была разработана цифровая 3D-модель металлической сетки полотняного переплетения в Autodesk 3Ds Max, которая позволила создать виртуальный процесс движения сыпучего материала по вибрирующей просеивающей поверхности, отличающейся от реального сита уменьшенными габаритами. На рис. 1 показан процесс движения и отсева сыпучего материала в виртуальном классификаторе.

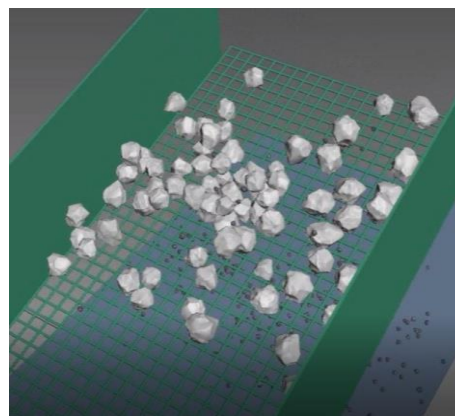


Рис. 1

Для имитации процесса была создана просеивающая сетка полотняного переплетения, у которой количество ячеек на единицу длины по основе и утку, размер ячейки в свету, диаметр проволоки и другие параметры соответствовали реальному тканому металлополотну [1]. Угол наклона сетки к горизонту, частота и амплитуда круговых колебаний сетки соответствовали параметрам реальных промышленных аппаратов. Создавались копии натуральных частиц реальной формы и размеров. Всем виртуальным объектам процесса были приданы реальные физические свойства: жесткость нитей, масса и плотность частиц, коэффициенты статического и динамического трения между частицами и металлополотном, коэффициенты восстановления скорости при ударе частиц друг о друга и ситом. Воспроизводился процесс движения частиц по вибрирующей сетке. Сыпучий материал перемещался по просеивающей поверхности, мелкие частицы проникали через отверстия сетки, крупные попадали в разгрузочный поддон.

Результаты

Скорость перемещения сыпучего материала по металлической сетке определялась следующим образом. Фиксировалось время нахождения каждой крупной частицы на просеивающем полотне. На рис. 2 показана кумулятивная кривая, описывающая заполнение по времени крупными частицами разгрузочного поддона (Q_i – отношение количества частиц, покинувших классификатор к определенному моменту времени, к общему числу частиц, находящихся на просеивающем полотне).

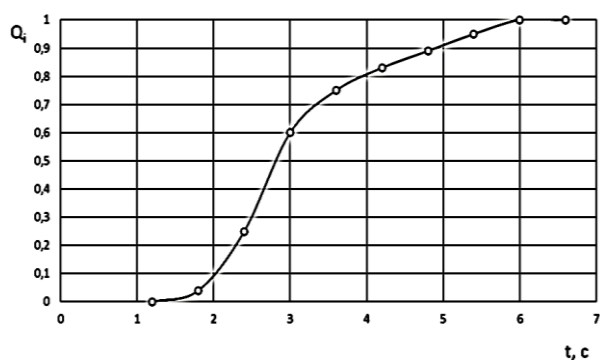


Рис. 2

На рис. 3 показана гистограмма распределения времени нахождения крупных частиц на просеивающей сетке.

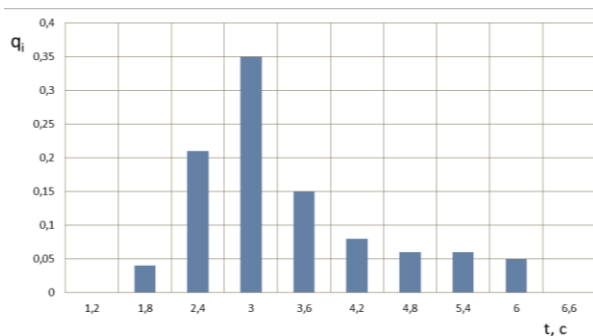


Рис. 3

Среднее время пребывания частиц на сетке определялось как

$$t_{\text{ср}} = \sum q_i t_i, \quad (1)$$

где q_i – нормированный выход крупных частиц с поверхности сетки в момент времени t_i за интервал времени $\Delta t = 0,6$ секунд.

Средняя скорость транспортирования частиц по сетке определялась как

$$v_{\text{тр}} = \frac{L}{t_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где L – длина виртуального просеивающего полотна.

Результаты обработки данных компьютерных экспериментов позволили получить среднюю скорость транспортирования ансамбля частиц по просеивающей поверхности виртуального виброклассификатора. На рис. 4 представлены зависимости скорости транспортирования частиц по просеивающему полотну от амплитуды его колебаний. Угол наклона просеивающего полотна к горизонту, заданный в эксперименте, составлял 8 градусов, частота колебаний сита 12 Гц.

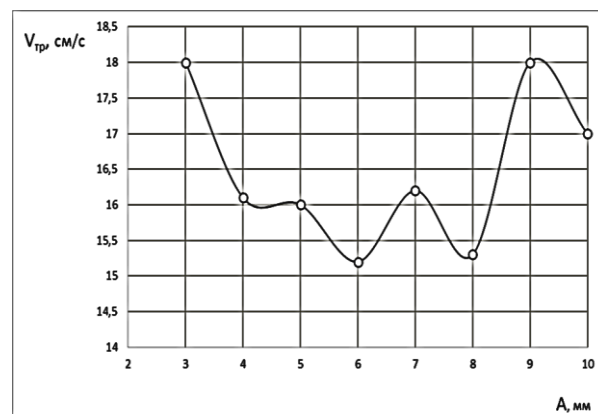


Рис. 4

Результаты численного эксперимента по определению зависимости скорости движения частиц по вибрирующему сити от частоты его колебаний представлены на рис. 5. Заданный в эксперименте угол наклона полотна к горизонту составлял 14 градусов, амплитуда колебаний сита 4 мм.

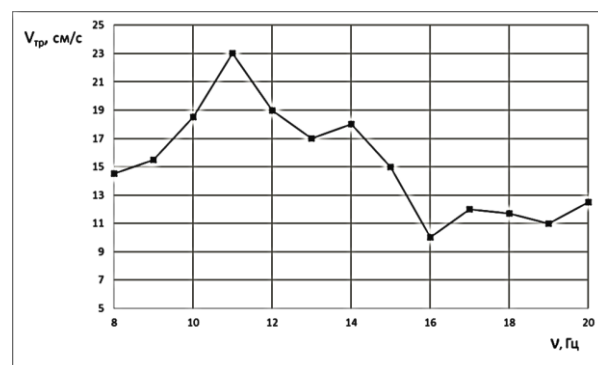


Рис. 5

На рис. 6 показано влияние угла наклона сита на скорость движения частиц по просеивающему полотну. Амплитуда колебаний виртуального сита составляла 8 мм, частота 17 Гц.

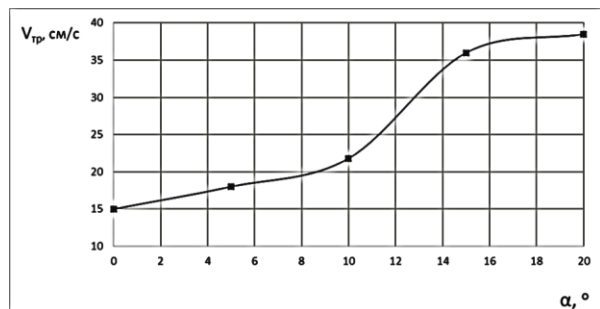


Рис. 6

Численные эксперименты показали, что зависимость скорости перемещения сыпучего материала по вибрирующему полотну от различных амплитудно-частотных режимов его колебаний носит скачкообразный характер. Поэтому скорость транспортирования частиц по ситам должна определяться для каждого конкретного режима его колебаний.

Виртуальный метод позволил проводить численные эксперименты по моделированию движения сыпучего материала по вибрирующей тканой металлической сетке при различных режимах работы классификатора в диапазонах параметров колебаний, которые намного шире, чем у промышленных машин.

ВЫВОДЫ

Средняя скорость транспортирования сыпучего материала по виртуальной вибрирующей тканой металлической сетке будет такой же, как у частиц, двигающихся по реальному ситам. Зная значение средней скорости, можно пересчитать время пребывания частиц на сите реального классификатора. Расчет кинетики фракционирования сыпучих материалов, включающий имитационную модель транспортирования сыпучего материала по просеивающему полотну, повышает точность прогнозирования фракционного состава конечного продукта отсева, позволяет более точно рассчитать эффек-

тивность процесса при заданной производительности промышленного аппарата. В имитационной модели можно в широком диапазоне менять параметры колебаний просеивающего полотна, механические свойства сыпучей среды, включая размеры частиц, геометрические и механические свойства тканых сеток, выполненных не только из металлической проволоки, но и из шелковых или синтетических нитей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирогов Д.А., Тувин А.А., Гусев Б.Н. Комплексная оценка качества тканых металлических сеток // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2011. №1. С. 19...22.
2. Огурцов В.А., Хохлова Ю.В., Алешина А.П., Огурцов А.В. К расчету процесса вибросепарации на ситовых тканях сыпучих материалов с высоким содержанием частиц мелких фракций // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. № 4. С. 257...261.
3. Zhao L., Zhao Y., Liu C. etc. Simulation of screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM // Mining Science and Technology, V. 21, Issue 5, 2011, pp. 677...680.
4. Chen Y., Tong X. Application of the DEM to screening process: a 3D simulation // Mining Science and Technology, V. 19, Issue 4, 2009, pp. 493...497.
5. Webb J., Li C., Pandiella S.S., Campbell G.M. Discrete particle motion on sieves—a numerical study using the DEM simulation // Powder Technology, V.133, Issues 1–3, 2003, pp. 190...202.
6. Вайсберг Л.А., Картавый А.Н., Корвников А.Н. Просеивающие поверхности грохотов. Конструкции, материалы, опыт применения / под ред. Л.А. Вайсберга. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005. 252 с.
7. Богданов В.С., Ильин А.С. Семикопенко И.А. Процессы в производстве строительных материалов. Белгород: «Везелица», 2007. 512 с.
8. Пелевин А. Е. Вероятность прохождения частиц через сито и процесс сегрегации на вибрационном грохоте // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 1. С. 119...129.

REFERENCES

1. Pirogov D.A., Tuvin A.A., Gusev B.N. Complex quality estimation of woven metal meshes // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2011. No. 1. Pp. 19...22.
2. Ogurtsov V.A., Khokhlova Yu.V., Aleshina A.P., Ogurtsov A.V. To the calculation of the vibration separation process on sieve fabrics of bulk materials with a high content of fine particles // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2023. No. 4. Pp. 257...261.

3. *Zhao L., Zhao Y., Liu C. etc.* Simulation of screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM // *Mining Science and Technology*, V. 21, Issue 5, 2011, pp. 677...680

4. *Chen Y., Tong X.* Application of the DEM to screening process: a 3D simulation // *Mining Science and Technology*, V. 19, Issue 4, 2009, pp. 493...497.

5. *Webb J., Li C., Pandiella S.S., Campbell G.M.* Discrete particle motion on sieves—a numerical study using the DEM simulation // *Powder Technology*, V.133, Issues 1–3, 2003, pp. 190...202.

6. *Vaisberg L.A., Kartavy A.N., Korovnikov A.N.* *Proseivayushie poverkhnosti grokhotov. Konsruksii,*

materialy, opytprimeneniya / ed. By L.A. Vaisberg. St. Petersburg: VSEGEI Press, 2005. 252 p.

6. *Bogdanov V.S., Il'in A.S., Semikopenko I.A.* *Protsessi v proizvodstve stroitel'nih materialov.* Belgorod: "Vezelitsa", 2007. 512 p.

5. *Pelevin A.E.* Veroyatnost prokhojdeniya chastits cherez sito I protsess segregatsii na vibratsyonnom grokhote // *Izvestiya vuzov. Gorny jurnal.* 2011. No 4. Pp. 119...129.

Рекомендована кафедрой строительства и инженерных систем ИВГПУ. Поступила 13.01.25.
