

УДК 621.928

DOI 10.47367/0021-3497_2021_1_133

**ДВУХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ
НА СИТОВЫХ ТКАНЯХ**

**TWO-DIMENSIONAL MODEL OF VIBROSEPARATION
OF FINE BULK MATERIALS
THROUGH THE HOLES OF FABRIC SIEVE**

В.А. ОГУРЦОВ, Е.И. КРУПНОВ, А.П. АЛЕШИНА, А.В. ОГУРЦОВ, А.М. ФАТАХЕТДИНОВ
V.A. OGURTZOV, E.I. KRUPNOV, A.P. ALESHINA, A.V. OGURTZOV, A.M. FATAKHETDINOV

(Ивановский государственный политехнический университет)

(Ivanovo State Polytechnical University)

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Рассматривается двухмерная математическая модель фракционирования частиц мелкодисперсного сыпучего материала на вибрирующем ситовом тканом полотне. Модель использует математический аппарат теории

цепей Маркова. Матрица переходных вероятностей описывает переходы частиц между соседними ячейками. Исследовано влияние производительности подачи сыпучего материала на выход частиц в подситовое и надситовое пространство. Модель прогнозирует локальные состояния сыпучего материала в виброклассификаторе.

A two-dimensional mathematical model of fractionation of particles of fine bulk material on a vibrating screen woven fabric is considered. The model uses the mathematical apparatus of the theory of Markov chains to a two-dimensional grid of cells. The process in the material is controlled by the matrix of transition probabilities that describes transitions between neighboring cells and particle outflows into the fine and coarse products of classification. Some of numerical examples demonstrating the ability of the model to describe technological parameters of the process are shown. In particular, the influence of the feed rate on the outflow of the fine fraction is examined. The model allows predicting the technological characteristics of the process on the basis of the local state of the granular material.

Ключевые слова: сепарация, ансамбль частиц, ситовое тканое полотно, мелкодисперсный сыпучий материал.

Keywords: separation, ensemble of particles, woven screen cloth, fine granular material.

При интенсивном воздействии на мелкодисперсный материал со стороны ситовой ткани, которая является просеивающей поверхностью в виброклассификаторе непрерывного действия, происходит перемешивание частиц различных фракций как в продольном, так и поперечном направлении относительно слоя сыпучего материала. Частицы, размер которых меньше размеров ячейки ситовой ткани, по мере их движения вдоль виброклассификатора просеиваются в подситовое пространство, а частицы, размер которых больше размеров ячейки сита, остаются на нем. В работе [1] описана одномерная модель, которая относится только к миграции частиц поперек виброоживленного слоя сыпучего материала. Эта модель может быть использована для описания кинетики периодического фракционирования. Поэтому целью настоящей статьи является развитие стохастической модели кинетики непрерывного вибрационного фракционирования, основанной на математическом аппарате теории цепей Маркова.

Материал на ситовой ткани представлен двумерной цепью ячеек идеального смешения (рис. 1).

Цепь содержит n строк и m столбцов ячеек, причем к собственно материалу относится $(n-1)$ строка, а последняя n -я строка представляет собой ячейки подстового пространства, куда попадают частицы подрешетного продукта. Будем рассматривать процесс через малые промежутки времени Δt – времена перехода, в течение которых возможен переход мелких частиц из данной ячейки в соседние. Тогда текущие моменты времени будут рассчитываться как $t_k = (k-1)\Delta t$, где целое число $k=1, 2, \dots$ (номер перехода) становится целочисленным аналогом времени процесса.

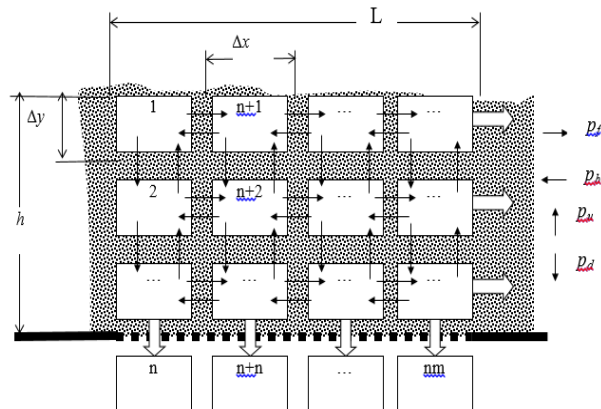


Рис. 1

В k -м состоянии распределение мелких частиц по ячейкам может быть представлено матрицей состояния:

$$S_m^k = \begin{bmatrix} S_1^k & S_{n+1}^k & \dots & S_{n(m-1)+1}^k \\ S_2^k & S_{n+2}^k & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_n^k & S_{n+n}^k & \dots & S_{nm}^k \end{bmatrix}, \quad (1)$$

элементы которой показывают относительное содержание мелких частиц наблюдаемой фракции в ячейках и пронумерованы последовательно от столбца к столбцу.

Развитие процесса во времени описывается рекуррентным матричным равенством

$$S^{k+1} = P(S^k + S_f^k), \quad (2)$$

где P – матрица переходных вероятностей, контролирующая переходы мелких частиц между ячейками в течение Δt , а S_f^k – вектор подачи, описывающий пополнение отдельных ячеек за счет внешних источников.

Матрица P имеет размер $(nm) \times (nm)$ и содержит вероятности (доли) перехода материала из одних ячеек в другие в соответствии с переходами, показанными на рис. 1. В частности, для цепи ячеек размером 3×3 эта матрица имеет вид:

$$P = \begin{bmatrix} p_s & p_u & 0 & p_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_d & p_s & 0 & 0 & p_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_f & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_f & 0 & 0 & p_s & p_u & 0 & p_b & 0 & 0 \\ 0 & p_f & 0 & p_d & p_s & 0 & 0 & p_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_f & 0 & 0 & p_s & p_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_f & 0 & p_d & p_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где p_d , p_u , p_f , p_b , p_s – вероятности перейти в течение Δt из данной ячейки вниз, вверх, вперед, назад и остаться в ячейке, соответственно. Выделяя в этих вероятностях по каждому из двух направлений симметричные (диффузионные) и конвективные составляющие, их можно выразить как

$$p_f = v_x + d_x, \quad p_b = d_x, \quad p_d = v_y + d_y, \quad p_u = d_y, \quad (4)$$

$$v_x = V_x \Delta t / \Delta x, \quad d_x = D_x \Delta t / \Delta x^2, \\ v_y = V_y \Delta t / \Delta y, \quad d_y = D_y \Delta t / \Delta y^2, \quad (5)$$

в которых V_x – размерная скорость продольного транспортирования слоя сыпучего материала вдоль просеивающей ситовой ткани, определяющая объемную производительность классификатора на единицу ширины сита $Q = V_x h$; V_y – направленная вниз скорость сегрегации фракции в сыпучем материале, D_x и D_y – коэффициенты макродиффузии, учитывающие стохастическую составляющую процесса. Вероятности p_s остаться в ячейках во всех столбцах, кроме $n-1$ последних, рассчитываются как единица минус сумма всех остальных вероятностей в столбце матрицы, а в этих последних столбцах из них дополнительно вычитается v_x , учитывающая вход материала за пределы цепи из последнего столбца ее ячеек (рис. 1). Для $(n-1)$ -й строки ячеек в цепи и соответствующих ей элементах матрицы следует заменить $p_d = v_y + d_y$ на $p_d = v_f$, где v_f – вероятность пройти через сито для мелких частиц, достигших его поверхности, которая зависит от параметров колебаний классификатора и свойств, способов переплетений и толщины нитей, из которых изготавливается ситовая ткань. Эта вероятность определяется согласно методике, изложенной в [2].

Если материал подается на сито слева, то он поступает в ячейки цепи с номерами от 1 до $(n-1)$. В этом случае при равномерном распределении частиц мелкой фракции по входящему потоку материала вектор подачи S_f^k постоянен, имеет такой же размер, что и S^k , и содержит первые $(n-1)$ ненулевых элементов, рассчитываемых как $S_{fi}^k = Q \Delta t / (n-1)$.

Полный выход фракции в подрешетный и надрешетный продукт рассчитывается по формулам:

$$Q_{Yout}^k = Q_\varepsilon^k = \sum_{j=1}^m (S_{nj}^{k+1} - S_{nj}^k), \quad (6)$$

$$Q_{Xout}^k = \sum_{i=1}^{n-1} S_{i, nm}^k v_x. \quad (7)$$

Величина $\varepsilon(k)=Q^k_\varepsilon / Q$ определяет степень извлечения частиц проходовой фракции в подрешетный продукт, а величина $1 - \varepsilon(k)$ – засоренность мелкими частицами надрешетного продукта [3...5]. Таким образом, предложенная модель (1)...(7) позволяет рассчитывать технологические показатели процесса по локальным характеристикам движения материала над вибрирующей ситовой поверхностью.

Рис.2 иллюстрирует характеристики кинетики, рассчитываемые с помощью модели. В расчетах рассматривалась цепь 5x6 ячеек. На рис.2-а показана кинетика извлечения частиц мелких фракций за 60 временных переходов.

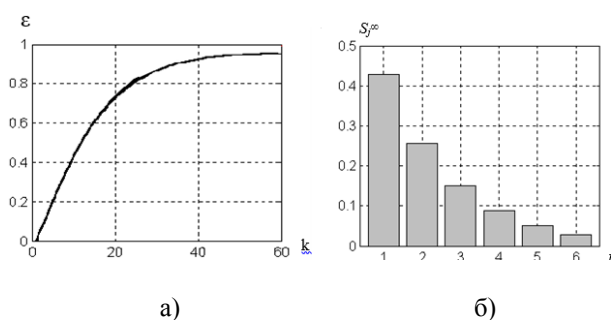


Рис. 2

В стационарном режиме работы в подрешетный продукт извлекается около 95% частиц проходовой фракции, а около 5% ее загрязняют надрешетный продукт.

Рис. 2-б иллюстрирует распределение содержания частиц проходовой фракции вдоль поверхности ситового полотна.

На рис. 3 оценено влияние производительности подачи на степень извлечения частиц проходовой фракции.

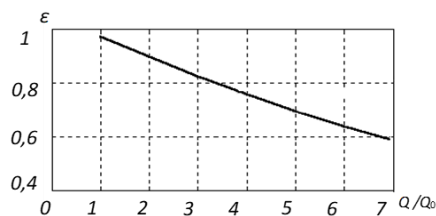


Рис. 3

С ростом производительности подачи происходит увеличение высоты слоя материала на сите, которое может быть учтено

через увеличение числа строк ячеек в модели. На рис.3 показано изменение степени извлечения ε от относительной производительности подачи Q/Q_0 , где Q_0 – производительность подачи, соответствующая одному ряду ячеек, который условно можно назвать монослоем. С ростом производительности подачи все большая доля частиц проходовой фракции остается в надрешетном продукте.

ВЫВОДЫ

Предложенная модель позволяет рассчитывать технологические показатели процесса фракционирования, отталкиваясь от его локальных состояний. Расчетные характеристики процесса и их изменение с изменением условий виброклассификации находятся в качественном соответствии с основными представлениями о его кинетике. Предлагаемая модель может описывать состояние и кинетику изменения состояния сыпучего материала на ситовой ткани, а также его массопотоки в подрешетный и надрешетный продукты отсева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огурцов В.А., Алешина А.П., Огурцов А.В., Брик Е.Р. Кинетика фракционирования мелкодисперсных сыпучих материалов с применением ситовых тканых полотен // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 1. С.201...204.
2. Мизонов В.Е., Огурцов В.А. и др. Процессы сепарации частиц в виброожиженном слое: моделирование, оптимизация, расчет. – Иваново: ИГЭУ, ИВГПУ, 2010.
3. Вайсберг Л.А., Картавый А.Н., Коровников А.Н. Просеивающие поверхности грохотов. Конструкции, материалы, опыт применения / Под ред. Л.А. Вайсберга. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2005.
4. Богданов В.С., Ильин А.С., Семикопенко И.А. Процессы в производстве строительных материалов. – Белгород: "Везелица", 2007.
5. Пелевин А. Е. Вероятность прохождения частиц через сито и процесс сегрегации на вибрационном грохоте // Изв. вузов. Горный журнал. – 2011, №1. С. 119...129.

REFERENCES

1. Ogurtsov V.A., Aleshina A.P., Ogurtsov A.V., Brik E.R. Kinetika fraktcionirovaniya melkodispersnykh sypuchikh materialov s primeneniem sitovykh

tkanykh poloten // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2016, № 1. S.201...204.

2. Mizonov V.E., Ogurtsov V.A. i dr. Protsessy separatsii chastits v vibroozhizhenном sloe: modelirovanie, optimizatsiya, raschet. – Ivanovo: IGEU, IVGPU, 2010.

3. Vaysberg L.A., Kartavyy A.N., Korovnikov A.N. Proseivayushchie poverkhnosti grokhotov. Konstruktsii, materialy, opyt primeneniya / Pod red. L.A. Vaysberga. – SPb.: Izd-vo VSEGEI. 2005.

4. Bogdanov V.S., Il'in A.S., Semikopenko I.A. Protsessy v proizvodstve stroitel'nykh materialov. – Belgorod: "Vezelitsa", 2007.

5. Pelevin A. E. Veroyatnost' prokhozhdeniya chastits cherez sito i protsess segregatsii na vibratsionnom grokhote // *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal.* – 2011, №1. S. 119...129.

Рекомендована кафедрой архитектуры и строительства. Поступила 20.10.20.
