

**К РАСЧЕТУ ПРОЦЕССА ВИБРОСЕПАРАЦИИ  
НА СИТОВЫХ ТКАНЯХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ  
С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЧАСТИЦ МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ**

**TO THE CALCULATION OF THE VIBRATION SEPARATION PROCESS  
ON SIEVE FABRICS OF BULK MATERIALS  
WITH A HIGH CONTENT OF FINE PARTICLES**

*В.А. ОГУРЦОВ, Ю.В. ХОХЛОВА, А.П. АЛЕШИНА, А.В. ОГУРЦОВ*

*V.A. OGURTZOV, Yu.V. KHOKHLOVA, A.P. ALESHINA, A.V. OGURTZOV*

*(Ивановский государственный политехнический университет)*

*(Ivanovo State Polytechnical University)*

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru, hohjul@mail.ru, annaricci89@mail.ru, shishok85@mail.ru

*Рассматривается нелинейная математическая модель отсева сыпучего материала с высоким содержанием частиц мелких фракций на вибрирующих ситовых тканях. Модель использует математический аппарат теории цепей Маркова. Учитываются механические свойства и конструктивные параметры просеивающей поверхности, размер и форма отверстий ситового полотна, способ переплетения нитей. В отличие от линейных моделей матрица переходных вероятностей учитывает зависимость скорости сегрегации мелкой фракции к поверхности тканого полотна сита от фракционного состава окружающего ее материала. Показано, что линейные модели дают завышенный результат степени извлечения частиц мелких фракций от времени отсева. Кинетика вибросепарации, рассчитанная по предлагаемой нелинейной модели, соответствует реальному процессу.*

*A nonlinear mathematical model of sieving of bulk material with a high content of fine particles on vibrating sieve fabrics is considered. The model uses the mathematical apparatus of Markov chain theory. The mechanical properties and design parameters of the sifting surface, the size and shape of the holes of the screen cloth, the method of interweaving the threads are taken into account. In contrast to linear models, the transition probability matrix takes into account the dependence of the rate of segregation of a fine fraction to the surface of a woven screen cloth on the fractional composition of the surrounding material. It is shown that linear models give an overestimated result of the degree of extraction of particles of small fractions from the sieving time. The kinetics of vibration separation calculated according to the proposed nonlinear model corresponds to the real process.*

**Ключевые слова:** фракционирование, ситовое тканое полотно, мелкодисперсный сыпучий материал, сегрегация, диффузия.

**Keywords:** fractionation, screen woven fabric, fine bulk material, segregation, diffusion.

Процесс вибрационного разделения по крупности тонкоизмельченных сыпучих продуктов на тканых сетках из эластичных синтетических моноплетей является одним из наиболее часто используемых способов выделения фракций определенных размеров [1-3]. Этот метод рассева материалов широко применяется в строительстве, химико-фармацевтической промышленности и сельском хозяйстве для фракционирования строительных материалов, отсева посторонних крупных включений из фармацевтических субстанций, сортировки кормовых культур.

С целью повышения эффективности работы вибрационных сепараторов и выбора рациональных режимов их работы предлагается построение математической модели процесса, позволяющей без трудоемких экспериментальных изысканий получать информацию о его важных характеристиках.

Линейные модели исследуемого процесса на основе теории цепей Маркова предложены в работах [2, 4]. Однако эти модели адекватно описывают кинетику промышленного пофракционного разделения мелкодисперсных сыпучих материалов, когда содержание частиц, размер которых меньше размеров отверстий ситовой ткани, не превышает 50% [2]. В данном исследовании рассматривается марковская нелинейная модель процесса вибросепарации сыпучих материалов с высоким содержанием частиц мелких фракций, когда их содержание может достигать 95%. Модель учитывает зависимость скорости сегрегации мелочи к поверхности тканого полотна сита от фракционного состава окружающего ее материала.

Схематично процесс вибросепарации и его ячейечная модель с возможными вариантами переходов материала из ячейки представлены на рис. 1.

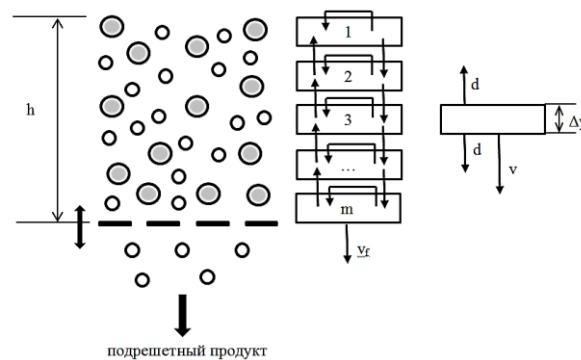


Рис. 1

Слой материала по высоте разбит на  $m$  ячеек идеального перемешивания высотой  $\Delta y = h/m$ . Считается, что максимальное содержание фракции в ячейке равно единице. Процесс наблюдается в дискретные моменты времени  $t_k = (k-1)\Delta t$ , где  $k$  – номер перехода,  $\Delta t$  – продолжительность перехода. В течение времени перехода частицы могут перейти в соседние ячейки (вверх или вниз) или остаться в ячейке. Направления возможных переходов из ячейки показаны на рис. 1 стрелками. Под воздействием вибрации мелкая фракция сегрегирует к поверхности сита с одновременным диффузионным перемешиванием частиц. Очевидно, что вероятность перемещения частиц вниз к поверхности сита будет больше, чем вероятность перемещения частиц вверх. Из этих вероятностей можно выделить диффузионную составляющую  $d$  и конвективную составляющую  $v$  (безразмерная скорость сегрегации), которые связаны с реальными характеристиками процесса соотношениями  $d = D\Delta t / \Delta y^2$  и  $v = V\Delta t / \Delta y$ , где  $D$  – коэффициент макродиффузии, а  $V$  – размерная скорость сегрегации [2].

В произвольный момент времени распределение содержания мелкой фракции по ячейкам характеризуется вектором-столбцом  $S^k$ :

$$S^k = \begin{pmatrix} S_1^k \\ S_2^k \\ \dots \\ S_{m-1}^k \\ S_m^k \end{pmatrix}. \quad (1)$$

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

С течением времени состояние этого вектора меняется в соответствии с равенством

$$P = \begin{pmatrix} 1-d-v_1^k & d & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ d+v_1^k & 1-2d-v_2^k & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d+v_2^k & 1-2d-v_3^k & d & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1-2d-v_m^k & d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & d+v_m^k & 1-d \end{pmatrix} \quad (3)$$

Пусть скорость сегрегации мелкой фракции в ячейку без мелкой фракции максимальна и равна  $v_0$ . При этом скорость сегрегации мелкой фракции в ячейку линейно зависит от содержания этой фракции в этой ячейке, то есть

$$v_i^k = v_0(1 - S_{i+1}^k). \quad (4)$$

Переходная матрица, элементы которой содержат скорости сегрегации, не являющиеся постоянными от ячейки к ячейке, становится зависящей от текущего вектора состояния. Таким образом, модель, описывающая процесс вибросепарации, является нелинейной.

Выход мелкой фракции в подрешетный продукт может быть описан за пределами матрицы  $P$  следующим образом. Пусть на каждом временном переходе после воздействия на вектор состояния  $S^k$  матрицей  $P$  из нижней ячейки цепи выводится доля  $v_{fk}$  содержащейся в ней мелкой фракции, то есть ее выход составляет

$$q^{k+1} = S_m^{k+1} v_f^k, \quad (5)$$

а оставшаяся в ней доля мелкой фракции равна

$$S_m^{k+1} := S_m^{k+1}(1 - v_f^k), \quad (6)$$

где  $:=$  – оператор присваивания.

где  $P$  – матрица переходных вероятностей, которая для закрытого сита имеет вид:

Вероятность выхода частиц из последней ячейки в подситовое пространство представляет собой безразмерную скорость проникновения частиц через отверстия ситовой ткани и определяется ее физико-механическими свойствами и конструктивными параметрами [4-8].

Полный выход мелкой фракции за  $(k+1)$  переход определяется по формуле

$$Q^{k+1} = \sum_0^{k+1} q^{k+1}, \quad (7)$$

а его относительное значение по отношению к первоначальному содержанию этой фракции, являющееся искомой степенью извлечения  $\varepsilon$ , вычисляется как

$$\varepsilon^{k+1} = \frac{Q^{k+1}}{C_0 m}, \quad (8)$$

где  $C_0$  – относительное содержание мелкой фракции в сырье.

Результаты вычислительных экспериментов с моделью представлены на рис. 2, где показано различие эволюции распределения содержания проходовой фракции по высоте слоя для двух случаев – линейной и нелинейной модели ( $d = 0,05$ ;  $v_0 = 0,02$ ;  $v_f = 0,05$ ,  $C_0 = 0,85$ ). В начальный момент времени частицы этой фракции равномерно распределены в ячейках слоя. Весь слой разбит по высоте на десять ячеек. При неограниченном переносе

частиц мелкой фракции в направлении сита (линейная модель) выявляется физическое противоречие – в примыкающих к ситам ячейках оказывается материала больше, чем предельное значение емкости ячеек. На рис. 2, а видно, что содержание проходимых частиц в ячейке, находящейся над ситом,

значительно превышает единицу. Этого не происходит в нелинейной модели. В нижних ячейках может скопиться материала больше, чем было ранее, но никогда его содержание не превзойдет предельной емкости ячеек.

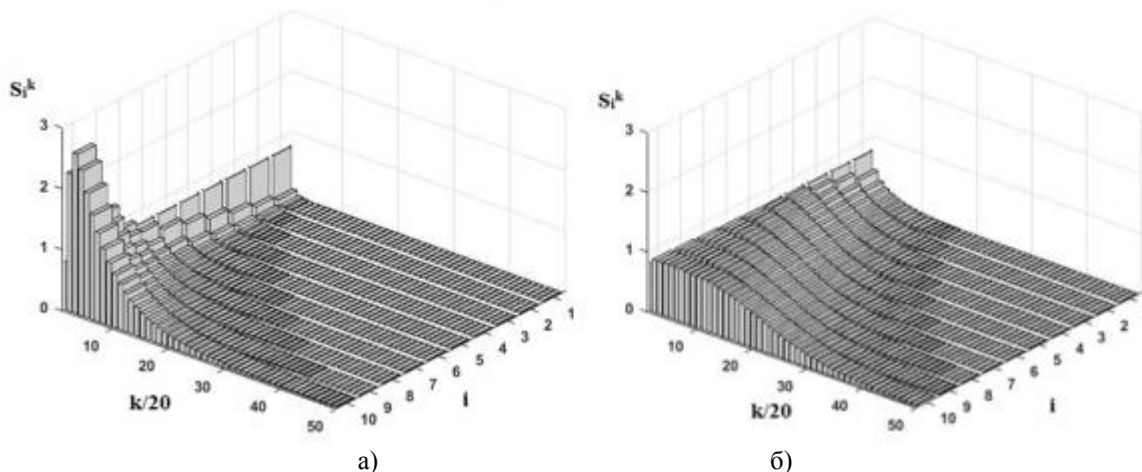


Рис. 2

Кинетика извлечения, рассчитанная при тех же значениях параметров модели, что и для рис. 2, представлена на рис 3.

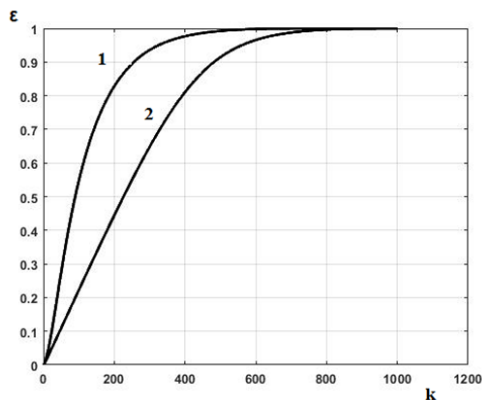


Рис. 3

Изменение поведения движения материала в слое оказывает влияние на выход мелкой фракции в подрешетный продукт. Сравнивая кривые кинетики 1, рассчитанной по линейной модели, и кинетики 2, рассчитанной по нелинейной модели, следует отметить, что в случае линейной модели результаты извлечения значительно завышены в сравнении с нелинейной.

Предложенная марковская нелинейная модель вибросепарации и ее программные приложения, реализованные в среде MATLAB, с помощью стохастических коэффициентов позволяют учитывать как многообразие физико-механических свойств мелкодисперсных материалов, так и различные параметры вибрации тканых сеток при расчете кинетики процесса. При этом могут меняться варианты подачи сыпучего материала на просеивающую поверхность классификатора.

## ВЫВОДЫ

Предлагаемая нелинейная модель кинетики виброфракционирования сыпучих материалов на вибрирующей тканевой сетке позволяет учитывать высокое содержание мелких частиц в исходном сырье. Модель рассматривает конвективный перенос мелких частиц к ситам, который зависит от содержания этих частиц в ячейках цепи. Учитываются механические свойства и конструктивные параметры ситовой ткани из эластичных синтетических мономеров – материал, упругие свойства и диаметр нити, размер ячейки сита в свету,

размер и форма отверстий ситового полотна, живое сечение сита, способ переплетения нитей. Учет уменьшения скорости сегрегации мелких частиц к ситам повышает прогностические возможности модели и позволяет определять реальные показатели процесса для различных режимов вибрации тканых сит.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Мизонов В.Е., Огурцов В.А. и др. Процессы сепарации частиц в виброоживленном слое: моделирование, оптимизация, расчет. Иваново: ИГЭУ, 2010.

3. Ferrara G. Modelling of screening operations. Intern // J. of Mineral Processing. 1988. V. 22. № 1. P. 193...222.

4. Огурцов В.А., Алешина А.П., Гриценко М.А., Огурцов А.В. Определение вероятности проникновения частиц мелкодисперсного материала через отверстия ситового тканого полотна при вибросепарации // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2017. № 1. С. 262...265.

5. Mizonov V., Mitrofanov A., Ogurtsov A., Tannous K. Modeling of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains // Particulate Science and Technology: An International Journal. 2014. Vol. 32. Issue 2. P. 171...178.

6. Богданов В.С., Ильин А.С. Семикопенко И.А. Процессы в производстве строительных материалов. Белгород: Везелица, 2007.

7. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986.

8. Vaisberg L.A., Rubisov D.N. Mathematische Beschreibung der Vibrationssiebung // Aufbereitungs Technik. 1990. № 3. S. 378...386.

#### REFERENCES

1. Vaisberg L.A., Kartavy A.N., Korovnikov A.N. Screening surfaces of screens. Structures, materials, application experience / Ed. By L.A. Vaisberg. St. Petersburg: VSEGEI Press, 2005. 252 s.

2. Mizonov V.E., Ogurtsov V.A. et al. Particle separation processes in a vibro-liquefied layer: modeling, optimization, calculation. Ivanovo: IGEU, 2010. 192 s.

3. Ferrara G. Modelling of screening operations. Intern // J. of Mineral Processing. 1988. V. 22. № 1. P. 193...222.

4. Ogurtsov V.A., Aleshina A.P., Gritzenko M.A., Ogurtsov A.V. Determination of probability of fine-particle materials penetration through openings of cloth sieve during vibratory separation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2017. № 1. S. 262...265.

5. Mizonov V., Mitrofanov A., Ogurtsov A., Tannous K. Modeling of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains // Particulate Science and Technology: An International Journal. Vol. 32. Issue 2. 2014. P. 171...178.

6. Bogdanov V.S., Il'in A.S., Semikopenko I.A. Processes in the production of construction materials. Belgorod: Vezelitsa, 2007.

7. Vaisberg L.A. Design and calculation of vibration screens. Moscow: Nedra, 1986.

8. Vaisberg L.A., Rubisov D.N. Mathematische Beschreibung der Vibrationssiebung // Aufbereitungs Technik. 1990. № 3. S. 378...386.

Рекомендована кафедрой архитектуры и строительных материалов ИВГПУ. Поступила 14.06.23.