

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВИБРОСЕПАРАЦИИ
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЧЕРЕЗ СИТОВЫЕ ТКАНЫЕ ПОЛОТНА
ПРИ ИХ МНОГОЭТАЖНОЙ КОМПОНОВКЕ**

**VIBROSEPARATION OF FINE-PARTICLE MATERIALS
THROUGH SIEVE WOVEN CLOTHS
UNDER THEIR MULTI-LAYERED ARRANGEMENT**

В.А. ОГУРЦОВ, А.П. АЛЕШИНА, Ю.В. ХОХЛОВА, А.В. ОГУРЦОВ, А.Н. АРТЕМЬЕВ

V.A. OGURTZOV, A.P. ALESHINA, YU.V. KHOKHLOVA, A.V. OGURTZOV, A.N. ARTEMYEV

(Ивановский государственный политехнический университет)

(Ivanovo State Polytechnical University)

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru; annaricci89@mail.ru; hohjul@mail.ru;
shishok85@mail.ru; antonites37@mail.ru

В работе предлагается математическая модель сепарации мелкодисперсных сыпучих материалов на вибрирующих верхних и нижних ситовых тканых полотнах, выполненных переплетением шелковых или синтетических тонких нитей. Рассматривается аппарат периодического действия, который позволяет получить сыпучий материал (готовый товарный продукт) заданного фракционного состава, отделяя некондиционные крупные и мелкие частицы. В основу модели положен математический аппарат теории цепей Маркова. Учитывается многоэтажная компоновка сит, что позволяет исследовать особенности формирования слоя сыпучего материала на нижнем сите. Показано влияние процесса разделения на классы крупности на верхнем сите на процесс отсева некондиционных мелких частиц от товарного продукта на нижнем сите. Выполнены численные эксперименты по расчету кинетики сепарации частиц товарного продукта и мелких некондиционных частиц на двухситовом сепараторе. Определена зависимость общей эффективности работы сепаратора и степень засоренности готового продукта мелкими частицами от продолжительности отсева.

The mathematical model of fine bulk materials separation on vibrating upper and lower sieve woven fabrics made by weaving silk or synthetic thin thread was proposed. An apparatus of periodic action which makes it possible to obtain bulk material (finished commercial product) of a given fractional composition, separating substandard large and small particles, is considered. The model is based on the mathematical apparatus of Markov chains theory. A multistory arrangement of sieves is taken into account, which makes it possible to investigate the features of the bulk material layer formation on the lower sieve. The influence of the separation process into size classes on the upper sieve on the process of screening out substandard fine particles from the commercial product on the lower sieve is shown. Numerical experiments were performed to calculate the kinetics of separation of commercial product particles and small substandard particles on a two-sieve separator. The dependence of the overall efficiency of the separator and the degree of the finished product clogging with small particles on the duration of the sieving was determined.

Ключевые слова: диффузия, сегрегация, цепи Маркова, вибрационный сепаратор, мелкодисперсный сыпучий материал, ситовые тканые полотна, эффективность отсева, засоренность товарных фракций.

Keywords: diffusion, segregation, Markov chains, vibrating separator, fine dispersed bulk material, sieve woven fabrics, screening efficiency, contamination of commodity fractions.

Введение

Вибросепарация мелкодисперсных сыпучих материалов – это процесс разделения их на классы крупности путем просеивания через ситовые тканые полотна, изготовленные из шелковых или синтетических (полиэфирных, капроновых, полиамидных) нитей. Вибросепараторы с многоярусной компоновкой сит позволяют получить сыпучий материал заданного фракционного состава, отсекая из исходной сыпучей среды некондиционные крупные и мелкие частицы. Чаще всего предметом исследования является процесс, происходящий только на одном верхнем сите [1...6]. Существующие модели и методы расчета процесса вибросепарации не учитывают то обстоятельство, что слой сыпучего материала на нижних ситах формируется в течение всего времени процесса отсева [1], [3], [5].

Методы исследования

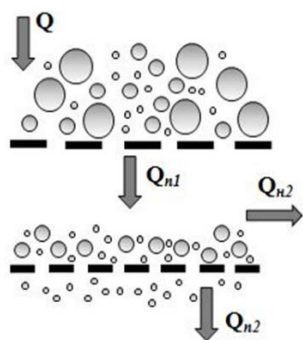


Рис. 1

Предлагается модель процесса вибросепарации мелкодисперсного материала на двухситовом классификаторе периодического способа действия, основанная на математическом аппарате теории цепей Маркова [1], [2], [7], [8]. Моделируются процессы классификации сыпучего материала на верхнем и нижнем сите. Учитывается влияние кинетики вибросепарации на верхнем сите на процесс отсева сыпучего

материала на нижнем сите. Схема распределения потоков мелкодисперсных материалов в вибросепараторе с двумя ситами с их поэтажным расположением показана на рис. 1.

Исходным сырьем, подаваемым на верхнее сито вибросепаратора, является смесь, состоящая из частиц трех классов крупности: некондиционных крупных, товарного продукта и некондиционных мелких. Их доли в исходном материале c_0 , c_1 , c_2 соответственно. Масса M исходного материала размещается на верхнем сите. Под действием вибрации начинается процесс сепарации. Товарные и мелкие частицы выходят в подситовое пространство и попадают на нижнее сито. Их масса $M_{п1}$ рассчитывается как

$$\begin{aligned} M_{п1} &= M_{п11} + M_{п21} = \\ &= M c_1 \varepsilon_{11} + M c_2 \varepsilon_{21}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $M_{п11}$ – массовый выход частиц товарной фракции на верхнем сите; ε_{11} – извлечение частиц товарной фракции на верхнем сите; $M_{п21}$ – массовый выход мелких частиц на верхнем сите; ε_{21} – извлечение мелких частиц на верхнем сите. На нижнем сите в подситовой продукт выходят частицы мелкой фракции. Уравнение массового баланса на нижнем сите имеет вид:

$$M_{п1} = M_{н2} + M_{п2}, \quad (2)$$

где $M_{н2}$ – масса полученного товарного продукта; $M_{п2}$ – масса некондиционных частиц, выведенных в подситовое пространство.

Масса товарного продукта рассчитывается как

$$\begin{aligned} M_{н2} &= M c_1 \varepsilon_{11} + \\ &+ M c_2 \varepsilon_{21} (1 - \varepsilon_{22}), \end{aligned} \quad (3)$$

где ε_{22} – извлечение мелких частиц на нижнем сите.

Эффективность сепарации всего аппарата рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \frac{c_1 \varepsilon_{11} + c_2 \varepsilon_{21} (1 - \varepsilon_{22})}{c_1 + c_2}. \quad (4)$$

Рассчитать засоренность готового товарного продукта мелкими частицами можно по формуле:

$$\gamma = \frac{c_2 \varepsilon_{21} (1 - \varepsilon_{22})}{c_1 \varepsilon_{11} + c_2 \varepsilon_{21} (1 - \varepsilon_{22})}. \quad (5)$$

На верхнем сите слой сыпучего материала разделен на m подслоев высотой Δx . На нижнем сите слой материала разделен на n подслоев (рис.2).

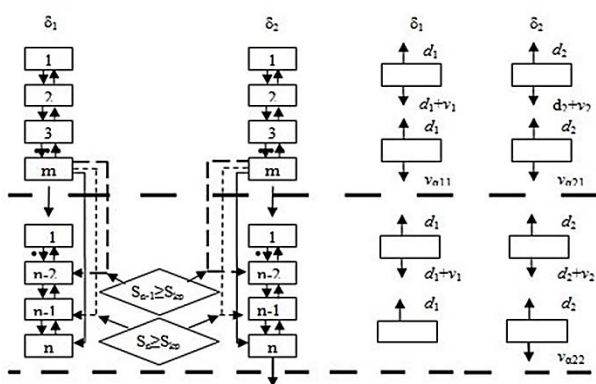


Рис.2

Число подслоев n определится как

$$n = m(c_1 + c_2). \quad (6)$$

Полный набор вероятностей S_i нахождения частиц в i -й ячейке образует вектор-

столбцы состояния для частиц товарного продукта и мелких частиц, которые определяются как

$$S_1 = \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{12} \\ \dots \\ S_{1m} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} S_{21} \\ S_{22} \\ \dots \\ S_{2n} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Продолжительность рассева $t_k = (k-1)\Delta t$, где k – номер перехода, Δt – время одного перехода.

Рекуррентные матричные равенства, описывающие изменение состояния ячеек цепи на верхнем и нижнем сите для частиц товарной фракции, представляют собой выражения:

$$S_{11}^{k+1} = P_{11} S_{11}^k, \quad (9)$$

$$S_{12}^{k+1} = P_{12} S_{12}^k, \quad (10)$$

где P_{11} и P_{12} – матрицы переходных вероятностей для частиц товарного продукта на верхнем и нижнем сите.

Примем число ячеек верхнего слоя $m=5$, а нижнего слоя $n=4$. Тогда матрицы переходных вероятностей примут вид:

$$P_{11} = \begin{bmatrix} 1 - v_1 - d_1 & d_1 & 0 & 0 & 0 \\ v_1 + d_1 & 1 - v_1 - 2d_1 & d_1 & 0 & 0 \\ 0 & v_1 + d_1 & 1 - v_1 - 2d_1 & d_1 & 0 \\ 0 & 0 & v_1 + d_1 & 1 - v_1 - 2d_1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & v_1 + d_1 & 1 - d_1 - v_{a11} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$P_{12} = \begin{bmatrix} 1 - v_1 - d_1 & d_1 & 0 & 0 \\ v_1 + d_1 & 1 - v_1 - 2d_1 & d_1 & 0 \\ 0 & v_1 + d_1 & 1 - v_1 - 2d_1 & d_1 \\ 0 & 0 & v_1 + d_1 & 1 - d_1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Изменение состояния ячеек цепи на верхнем и нижнем сите для мелких частиц описывается матричными равенствами:

$$S_{21}^{k+1} = P_{21} S_{21}^k, \quad (13)$$

$$P_{21} = \begin{bmatrix} 1 - v_2 - d_2 & d_2 & 0 & 0 & 0 \\ v_2 + d_2 & 1 - v_2 - 2d_2 & d_2 & 0 & 0 \\ 0 & v_2 + d_2 & 1 - v_2 - 2d_2 & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & v_2 + d_2 & 1 - v_2 - 2d_2 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & v_2 + d_2 & 1 - d_2 - v_{\alpha 21} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$P_{22} = \begin{bmatrix} 1 - v_2 - d_2 & d_2 & 0 & 0 \\ v_2 + d_2 & 1 - v_2 - 2d_2 & d_2 & 0 \\ 0 & v_2 + d_2 & 1 - v_1 - 2d_2 & d_2 \\ 0 & 0 & v_2 + d_2 & 1 - d_2 - v_{\alpha 22} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Безразмерные диффузионные вероятности d_1 и d_2 , сегрегационные составляющие v_1 и v_2 для товарных и мелких частиц на верхнем и нижнем сите связаны с параметрами классического дисперсионного уравнения соотношениями:

$$d_i = \frac{D_i \Delta t}{\Delta x^2}, \quad (17)$$

$$v_i = \frac{V_i \Delta t}{\Delta x}, \quad (18)$$

где D_i – размерный диффузионный коэффициент; V_i – размерный сегрегационный коэффициент, которые считаем для каждой фракции постоянными величинами процесса сепарации конкретного сыпучего материала при определенных режимах вибрации сепаратора.

Вероятности выхода товарных и мелких частиц через верхнее и нижнее сито $v_{\alpha 11}$, $v_{\alpha 21}$ и $v_{\alpha 22}$ зависят от параметров вибрации сепаратора, соотношения размеров проходных частиц и отверстия сита, характеристик ситовых полотен, материалов нитей и способов их переплетения и могут быть определены расчетным путем [2].

Выход товарных и мелких частиц в подситовое пространство на каждом временном переходе определяется как:

$$q_{11}(k) = S_{m11}^k v_{\alpha 11}, \quad (19)$$

$$S_{22}^{k+1} = P_{22} S_{22}^k, \quad (14)$$

где P_{21} и P_{22} – матрицы переходных вероятностей для мелких частиц на верхнем и нижнем сите, которые примут вид:

$$q_{21}(k) = S_{m21}^k v_{\alpha 21}, \quad (20)$$

$$q_{22}(k) = S_{n22}^k v_{\alpha 22}. \quad (21)$$

Кинетика сепарации товарных и мелких частиц на верхнем и нижнем сите рассчитывается по формулам:

$$\varepsilon_{11}(k) = \sum_{k=1}^k q_{11}(k), \quad (22)$$

$$\varepsilon_{21}(k) = \sum_{k=1}^k q_{21}(k), \quad (23)$$

$$\varepsilon_{22}(k) = \sum_{k=1}^k q_{22}(k). \quad (24)$$

Переходы частиц из верхнего слоя в нижний описываются соотношениями:

$$S_{n12}^k = S_{m11}^k v_{\alpha 11}, \quad (25)$$

$$S_{n22}^k = S_{m21}^k v_{\alpha 21}. \quad (26)$$

Товарные и мелкие частицы попадают в нижнюю ячейку, которая находится на нижнем сите. Частицы могут переполнить ячейку. Выполняется неравенство $S_n^k = S_{n12}^k + S_{n22}^k \geq S_{кр}$. Тогда модель предусматривает перенос подачи частиц в предпоследнюю ячейку нижнего слоя. Если она тоже переполняется, то частицы пере-

носятся в ячейку, находящуюся выше предпоследней.

Результаты и обсуждение

На рис. 3-а,б,в приведены результаты численных экспериментов с моделью, которые иллюстрируют кинетику сепарации мелких и товарных частиц на верхнем и нижнем сите. На рис. 3-г показаны общая эффективность работы двухситового сепаратора периодического действия и засоренность товарной фракции мелкими некондиционными частицами.

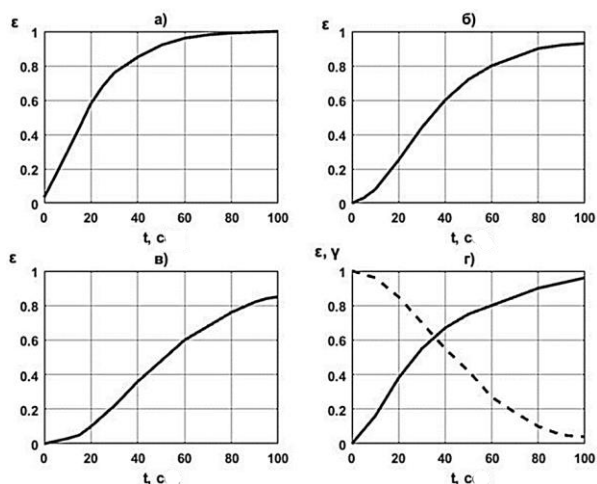


Рис. 3

Различные значения стохастических параметров модели, которые определяются согласно [1], [2], соответствуют различным режимам вибровоздействия сепаратора на сыпучую среду.

ВЫВОДЫ

Модели и методики расчета процесса вибросепарации на одном сите не могут использоваться для расчета процессов многоситового классификатора. Технологические и конструктивные параметры, выбранные по этим моделям, могут быть неэффективными для процесса отсева на нижних ситах. Предложенная модель с помощью вероятностных коэффициентов учитывает влияние кинетики сепарации на верхнем сите на процесс извлечения мелких некондиционных частиц из товарного продукта на нижнем сите, свойства сыпучего материала, параметры вибрации сепаратора. Особую роль играет вероятность выхода час-

тиц в подситовое пространство, которая зависит от материала ситового полотна, изготовлено ли оно из шелковых или капроновых, полиэфирных, полиамидных мононитей. На процесс проникновения частиц через сито влияет способ переплетения нитей ситового полотна (саржевое, ажурное, полужелтое ажурное, полотняное и комбинированное), а также толщина нити и расстояния между нитями основы и утка. Учет многообразия факторов, влияющих на вибросепарацию мелкодисперсных материалов, повышает точность прогностических расчетов параметров процесса для аппаратов с поэтажной компоновкой сит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мизонов В.Е., Огурцов В.А. и др. Процессы сепарации частиц в виброоживленном слое: моделирование, оптимизация, расчет // Ивановский государственный энергетический университет, Ивановский государственный архитектурно-строительный университет. – Иваново, 2010.
2. 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.
3. Вайсберг Л.А., Картавий А.Н., Коровников А.Н. Просеивающие поверхности грохотов. Конструкции, материалы, опыт применения / Под ред. Л.А. Вайсберга. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005.
4. Алоян Р.М., Федосов С.В., Мизонов В.Е. Теоретические основы математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов. – Иваново: "ПресСто", 2011.
5. Богданов В.С., Ильин А.С., Семикопенко И.А. Процессы в производстве строительных материалов. – Белгород: "Везелица", 2007.
6. Ferrara G. Modelling of screening operations. Intern // J. of Mineral Processsing. – 1988. V. 22. № 1. P. 193...222.
7. Berthiaux H., Mizonov V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – V.85, №6, 2004. P.1143...1168;
8. 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.

REFERENCES

1. Mizonov V.E., Ogurtsov V.A. et al. Particle separation processes in a vibro-liquefied layer: modeling,

optimization, calculation // GOU VPO IGEU”, IGASU. – Ivanovo, 2010. – 192 s.

2. 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.

3. 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.

4. .Alojan R.M., Fedosov S.V., Mizonov V.E. Theoretical foundations of mathematical modeling of mechanical and thermal processes in the production of building materials. – Ivanovo: “PresSto”, 2011.

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

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

7. Berthiaux H., Mizonov V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – V.85, No.6, 2004. P.1143...1168;

8. 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, –Volume 32, Issue 2, 2014. P.171...178.

Рекомендована кафедрой архитектуры и строительных материалов. Поступила 08.11.22.