

УДК 621.928

Расчетно-экспериментальное исследование сегрегационного механизма миграции ансамбля частиц в слое сыпучего материала при виброгрохочении

А.П. Алешина¹, В.А. Огурцов¹, М.А. Гриценко¹, А.В. Огурцов²

¹ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет», г. Иваново, Российская Федерация

²ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: При подготовке углей для сжигания на тепловых электростанциях в замкнутых системах измельчения вибрационные грохоты предназначены для отделения крупных фракций от мелких. Повышение эффективности грохочения способствует уменьшению возврата крупных частиц на повторное измельчение в мельницу, что позволяет повысить производительность процесса и снизить энергозатраты систем пылеприготовления. Практически все работы по моделированию грохочения цепями Маркова базируются на гипотезе о линейности процесса, когда скорость сегрегации мелкой фракции к поверхности сита считается постоянной и не зависящей от фракционного состава окружающего ее материала. Это приводит к физическому противоречию, когда в примыкающих к сити ячейках оказывается больше материала, чем они могут вместить. Особенно это касается случая грохочения сыпучих материалов с высоким содержанием мелких фракций в исходном сырье. В связи с этим актуальным является создание модели, которая разрешает это физическое противоречие.

Материалы и методы: Полученная модель основана на теории цепей Маркова, в которой матрица переходных вероятностей зависит от текущего вектора состояния.

Результаты: Предложена ячейечная модель процесса миграции мелких частиц по виброожиженному слою и доказана ее адекватность. Дан сравнительный анализ результатов расчетов и экспериментов.

Выводы: Расчетно-экспериментальные исследования миграции ансамбля частиц в слое сыпучего материала при виброгрохочении позволили положить нелинейную модель в основу более адекватного метода расчета процессов промышленного грохочения, в отличие от метода, базирующегося на линейной модели, в которой перенос мелкой фракции в сторону сита ничем не ограничен.

Ключевые слова: вибрационный грохот, цепь Маркова, высота слоя, сегрегация, вектор состояния, матрица переходных вероятностей.

Computational and experimental investigation of segregation mechanism of particle ensemble migration in granular solids at screening

A.P. Aleshina¹, V.A. Ogurtzov¹, M.A. Gritsenko¹, A.V. Ogurtzov²

¹ Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

² Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Abstract

Background: Vibration screens are used to separate coarse and fine fractions in closed milling circuits for coal preparation for combustion at thermal power plants. Improvement of screening efficiency leads to the decrease in product return to the mill that allows increasing the process throughput and decreasing power consumption in coal preparation systems. Practically all the works devoted to modeling screening by the theory of Markov chains are based on the hypothesis of the process linearity when the rate of fine fraction segregation to the screen surface is assumed to be constant and does not depend on surrounding fractions content. It leads to the physical contradiction as bottom cells contain more material than they can hold. Particularly, this concerns screening of granular materials with a high content of fine fraction. Therefore, it is urgent to develop a model that can resolve this contradiction.

Materials and methods: The model is based on the theory of Markov chains in which the matrix of transition probabilities depends on the current state.

Results: The proposed cell model of fine particles migration in a vibro-fluidized bed has been proved to be adequate. The calculated and experimental data have been compared.

Conclusions: Computational and experimental investigation of particle ensemble migration in a layer of granular material under vibration screening allowed us to make the non-linear model the basis of a more adequate industrial screening calculation technique than the linear model which does not include limitations for fine fractions transfer to the screen surface.

Key words: vibration screen, Markov chain, layer height, segregation, state vector, matrix of transition probabilities.

Разделение сыпучего материала по фракциям на виброгрохотах является распространенным технологическим процессом в энергетической, строительной, химической и

других отраслях промышленности. В замкнутых системах измельчения на тепловых электростанциях повышение эффективности процесса грохочения способствует снижению возврата

крупных частиц на повторное измельчение в мельницу, что позволяет снизить энергозатраты систем пылеприготовления [1]. Широкий спектр конструкций грохотов определил многообразие моделей процесса грохочения. Если задачи моделирования грохочения тонким слоем в основном решены [2–4], то совершенно иначе обстоит дело с моделированием миграции частиц в толстом слое материала, подверженного вибровоздействию со стороны сита грохота. Прогресс в этой области наметился с началом применения теории цепей Маркова к моделированию процессов в дисперсных средах [5, 6] и к моделированию процессов грохочения [7, 8]. Однако практически все работы по моделированию грохочения цепями Маркова базируются на гипотезе о линейности процесса, когда скорость сегрегации мелкой фракции к поверхности сита считается постоянной и не зависящей от фракционного состава окружающего ее материала. Это приводит к физическому противоречию, когда при грохочении сыпучих материалов с высоким содержанием мелких фракций в исходном сырье в примыкающих к сити ячейках оказывается больше материала, чем они могут вместить. Ниже исследуется нелинейная модель сегрегации мелких частиц в виброоживленном слое сыпучего материала, свободная от этого противоречия.

Расчетная схема процесса показана на рис. 1,а. Сыпучий материал расположен слоем высотой h на вибрирующем сите. Мелкая фракция сегрегирует вниз к поверхности сита, причем этот процесс сопровождается диффузионным перемешиванием всех частиц. Достигнув поверхности сита, частицы мелкой фракции выводятся в подрешетный продукт.

На рис. 1,б показана ячеечная модель процесса, в которой высота слоя разбита на m ячеек идеального перемешивания высотой $\Delta x = h/m$. Рассматриваем процесс в дискретные моменты времени $t_k = (k - 1) \Delta t$, где Δt – продолжительность, а k – номер временного перехода (дискретный аналог времени). В течение времени перехода частицы могут перейти в соседние ячейки, т. е. вверх или вниз, либо остаться в ячейке. Направления возможных переходов показаны на рис. 1,б стрелками. Из нижней ячейки частицы мелкой фракции могут уйти в подрешетный продукт и навсегда покинуть процесс. Очевидно, что благодаря сегрегации доля частиц мелкой фракции, перемещающихся в течение временного перехода вниз, будет больше, чем доля частиц, перемещающихся вверх. Из этих долей можно выделить симметричную (чисто диффузионную) составляющую d и несимметричную составляющую v , обусловленную сегрегацией (рис. 1,в). Эти составляющие связаны с натуральными характеристиками процесса соотношениями $d = D\Delta t / \Delta x^2$ и $v = V\Delta t / \Delta x$, где D – коэффициент макродиффузии, а V – размерная скорость сегрегации.

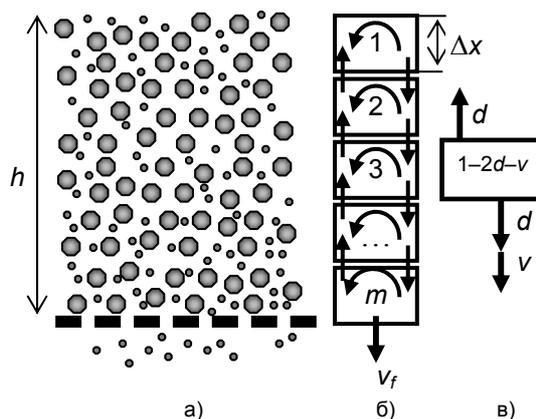


Рис. 1. Расчетная схема процесса грохочения (а), его ячеечная модель (б) и доли переноса фракции из ячейки (в)

В каждый момент времени распределение мелкой фракции по ячейкам характеризуется вектором-столбцом S^k размера $m \times 1$. Эволюция этого вектора описывается рекуррентным матричным равенством

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

где P – матрица переходных вероятностей для закрытого сита, имеющая вид [5]

$$P = \begin{bmatrix} 1-d-v_1^k & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ d+v_1^k & 1-2d-v_2^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d+v_2^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1-2d-v_{m-1}^k & d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d+v_{m-1}^k & 1-d \end{bmatrix}, \quad (2)$$

особенностью которой является то, что скорость сегрегации не считается постоянной, а меняется от ячейки к ячейке и от перехода к переходу.

Скорость сегрегации зависит от содержания мелкой фракции в ячейке:

$$v_{jk} = v_0(1 - S_{j+1}^k), \quad (3)$$

где v_0 – максимальная скорость сегрегации мелкой фракции сквозь чистую крупную.

Выход мелкой фракции в подрешетный продукт опишем следующим образом. Пусть на каждом временном переходе после воздействия на вектор состояния S^k матрицей P из нижней ячейки цепи выводится доля v_f содержащейся в ней мелкой фракции, т. е. ее выход составляет

$$q^{k+1} = S_m^{k+1} v_f, \quad (4)$$

а оставшаяся в ней доля мелкой фракции равна

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

где $:=$ – оператор присваивания.

Доля частиц мелкой фракции v_f , выводимая из нижней ячейки, зависит от соотношения размеров ячейки сита и частицы, прони-

кающей в подситовое пространство, а также параметров колебаний грохота. Описание механизма проникновения частиц через отверстия сита и метод определения величины v_f приведены в [7, 8].

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

$$Q^{k+1} = \sum_0^{k+1} q^{k+1}. \quad (6)$$

Равенства (1)–(6) полностью описывают нелинейный процесс грохочения.

Принципиальное значение имеет характер движения частиц внутри слоя. Естественно, что меняющаяся скорость сегрегации отразится на эволюции распределения частиц по слою сыпучего материала. Для исследования динамики движения мелких частиц по виброожиженному слою была создана лабораторная установка, представляющая собой плоский экран из прозрачных пластин, имеющий жесткий кинематический вибропривод (рис. 2). Внутри экрана помещалась бинарная смесь шайб, которые свободно перемещались между пластинами. Для исключения влияния механизма проникновения мелких частиц через отверстия сита на процесс их миграции нижняя граница слоя была закрыта. Таким образом, реализовывался процесс перемешивания смеси частиц. Этот процесс моделируется равенствами (1)–(3), чему соответствует закрытый вид матрицы (2).

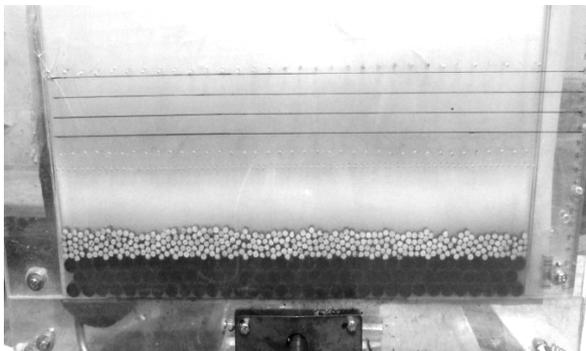


Рис. 2. Лабораторная установка

На рис. 3 приведены расчетные и опытные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя. Размер мелких частиц – 5 мм, крупных – 11 мм. Полное время процесса – 60 с. Амплитуда колебаний – 10 мм, частота – 100 с^{-1} . Количество опытов, проводимых при одинаковых условиях, – 4. Контрольные моменты времени фотофиксации процесса – 10, 20, 30, 40 с. Средняя высота слоя – 55 мм. Число временных переходов – 300 ($\Delta t = 0,2 \text{ с}$).

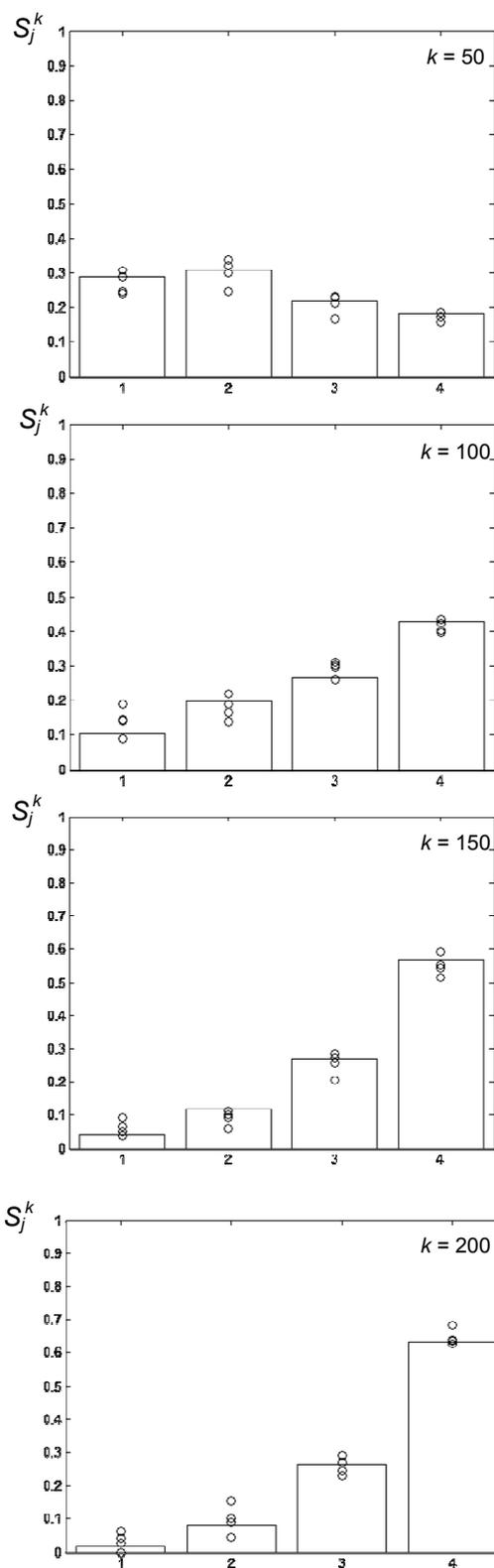


Рис. 3. Опытные и расчетные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя

Идентификация расчетных и осредненных опытных данных эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя позволила определить стохастические коэффициенты модели: $v_0 = 0,026$, $d = 0,005$.

Удовлетворительное совпадение расчетных и опытных данных (среднее отклонение по всем опытам составило 3 %) подтвердило правомерность применения предлагаемой нелинейной ячеечной модели к описанию процесса движения мелких частиц по виброожиженному слою. Очевидно, что модель с постоянной скоростью сегрегации не может описать процесс миграции смеси частиц с высоким содержанием мелочи. Нелинейная модель обеспечивает адекватное описание этого процесса. Последнее позволяет положить эту модель в основу инженерного метода расчета процесса грохочения.

Список литературы

1. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г., Барочкин Е.В. Аэродинамическая классификация порошков / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Иваново: ПресСто, 2014. – 260 с.
2. Вайсберг Л.А., Рубисов Д.Г. Вибрационное грохочение сыпучих материалов: моделирование процесса и технологический расчет грохотов. – СПб.: Институт «Механобр», 1994. – 47 с.
3. Вайсберг Л.А. Теоретические основы грохочения: учеб. пособие. – СПб.: СПбГИ (технический университет), 2003. – 61 с.
4. Vaisberg L.A., Rubisov D.G. Mathematische Beschreibung der Vibrationssiebung // *Aufbereitungs Technik*. – 1990. – № 3. – S. 378–386.
5. Berthiaux H., Mizonov V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. – 2004. – V. 85, no. 6. – P. 1143–1168.
6. Berthiaux H. Analysis of Grinding Processes by Markov Chains // *Chemical Engineering Science*, 55. – 2000. – P. 4117–4127.

Алешина Анна Павловна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
аспирант кафедры технологии строительного производства,
e-mail: annaricci89@mail.ru

Огурцов Валерий Альбертович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
доктор технических наук, зав. кафедрой технологии строительного производства,
e-mail:ogurtzovvavork@mail.ru

Гриценко Михаил Алексеевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
аспирант кафедры технологии строительного производства,
e-mail: assasin-sunn@mail.ru

Огурцов Антон Валерьевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики,
e-mail: ogurtsovav@mail.ru

7. Огурцов В.А., Федосов С.В., Мизонов В.Е. Моделирование кинетики виброгрохочения на основе теории цепей Маркова // *Строительные материалы*. – 2008. – № 5. – С. 33–35.

8. Процессы сепарации частиц в виброожиженном слое: моделирование, оптимизация, расчет / В.Е. Мизонов, В.А. Огурцов, С.В. Федосов, А.В. Огурцов; Иван. гос. энерг. ун-т; Иван. гос. арх.-строит. ун-т. – Иваново, 2010. – 192 с.

References

1. Mizonov, V.E., Ushakov, S.G., Barochkin, E.V. *Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov* [Powder aerodynamic classification]. Ivanovo, PresSto, 2014. 260 p.
2. Vaysberg, L.A., Rubisov, D.G. *Vibratsionnoe grokhochenie syuchikh materialov: modelirovanie protsessa i tekhnologicheskii raschet grokhotov* [Vibration screening of granular materials: process modeling and screen process design]. Saint-Petersburg, 1994. 47 p.
3. Vaysberg, L.A. *Teoreticheskie osnovy grokocheniya* [Fundamentals of screening theory]. Saint-Petersburg, SPbGGI (tehnicheskii universitet), 2003. 61 p.
4. Vaisberg, L.A., Rubisov, D.N. *Mathematische Beschreibung der Vibrationsiebung. Aufbereitungs Technik*, 1990, no. 3, pp. 378–386.
5. Berthiaux, H., Mizonov, V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2004, vol. 85, no. 6, pp. 1143–1168.
6. Berthiaux, H. Analysis of Grinding Processes by Markov Chains. *Chemical Engineering Science*, 55. 2000, pp. 4117–4127.
7. Ogurtsov, V.A., Fedosov, S.V., Mizonov, V.E. Modelirovanie kinetiki vibrogrokhocheniya na osnove teorii tsepey Markova [Modelling of vibration screening kinetics based on Markov chain theory]. *Stroitel'nye materialy*, 2008, no. 5, pp. 33–35.
8. Mizonov, V.E., Ogurtsov, V.A., Fedosov, S.V., Ogurtsov, A.V. *Protsessy separatsii chastits v vibroozhizhenom sloe: modelirovanie, optimizatsiya, raschet* [Particle separation processes in vibrofluidized bed: modeling, optimization, calculation]. Ivanovo, 2010. 192 p.