

УДК 621.928

Влияние поперечной неоднородности потока газа на кривую разделения гравитационного классификатора¹

Е.А. Шуина¹, В.Е. Мизонов¹, Р.Ш. Мисбахов²

¹ ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

² ФГБОУВПО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Российская Федерация
E-mail: mizonov46@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Гравитационные классификаторы широко используются в теплоэнергетике, химической, строительной и других отраслях промышленности для разделения дисперсных материалов по границе 0,5–3 мм. Однако достоверный расчет их показателей в настоящее время базируется на чисто эмпирических методах, то есть применим только к тем аппаратам, которые уже созданы и исследованы. Погрешности существующих моделей отчасти объясняются тем, что в их основу кладется однородный в поперечном сечении поток газа, в то время как в реальном аппарате эта неоднородность может быть значительной и сильно влиять на эффективность разделения. В связи с этим актуально построение моделей, которые учитывают поперечную неоднородность потока.

Материалы и методы: Для построения математического описания процесса применен метод ячеечного моделирования, использующий математический аппарат теории цепей Маркова. Рабочий объем аппарата представлен двумерной цепью ячеек, в каждом столбце которой газ движется с разной скоростью, а перенос частиц между столбцами обусловлен их поперечной диффузией.

Результаты: Построена двумерная ячеечная модель гравитационной классификации частиц по крупности, исследовано влияние степени неоднородности потока и коэффициента поперечной диффузии частиц на кривую разделения. Установлено, что увеличение поперечной неоднородности потока газа приводит к значительному ухудшению кривой разделения и эффективности разделения, отрицательное влияние неоднородности частично может быть компенсировано увеличением коэффициента поперечной диффузии частиц.

Выводы: Разработанная модель позволяет более достоверно прогнозировать кривые разделения гравитационных классификаторов при их проектировании.

Ключевые слова: гравитационный классификатор, неоднородность потока, ячеечная модель, вектор состояния, матрица переходных вероятностей, плотность источников, кривая разделения.

Influence of gas flow non-homogeneity on the grade efficiency curve of gravity classifier

Elena Shuina¹, Vadim Mizonov¹, Rinat Misbakhov²

¹ Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

² Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation
E-mail: mizonov46@mail.ru

Abstract

Background: Gravity classifiers are widely used in heat-power engineering, chemical, construction and other industries to separate a dispersed material by the cut size in the range of 0,5–3 mm. However, the reliable calculation of their parameters is now based on purely empirical methods. This means that the results can be only applied to those apparatuses which are already built and investigated. The errors of the existing models can be partly explained by the fact that they are based on the gas flow, homogeneous in cross-wise direction, while this non-homogeneity in real apparatuses may be considerable and may strongly influence the separation efficiency. That is why it is urgent to build a model that would take into account the cross-wise non-homogeneity of gas flow.

Materials and methods: The method of cell modeling was used to build a mathematical description of the process. The method employs mathematical tools of the Markov chains theory. The operating volume of the apparatus is represented as a two-dimensional array of cells. The gas flow velocity is different in different columns of the array. The transition of particles between the columns is conditioned by their cross-wise diffusion.

Results: A two-dimensional cell model of particle size gravity classification has been built. The influence of the flow non-homogeneity degree and cross-wise diffusion coefficient on the grade efficiency curve has been investigated. It was found that an increase in the flow cross-wise non-homogeneity leads to considerable worsening of the grade efficiency curve and separation efficiency. The negative influence of the non-homogeneity can be partly compensated by the increase in the cross-wise diffusion coefficient.

Conclusions: The developed model allows a more precise forecast of gravity classifier grade efficiency curves at the design stage.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №15-08-01684

Key words: gravity classifier, flow non-homogeneity, cell model, state vector, matrix of transition probabilities, source density, grade efficiency curve.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.060-063

В энергетической, химической, строительной, горнорудной и других отраслях промышленности часто возникает необходимость разделить полидисперсный ансамбль частиц на крупную и мелкую фракции. Если граница разделения находится в диапазоне 0,5–3 мм, то наиболее удобным для этой цели аппаратом является гравитационный классификатор, в котором разделение осуществляется в восходящем потоке воздуха. Характеристикой крупности частиц может быть их скорость витания – скорость осаждения частиц в неподвижном воздухе. Если скорость витания частицы меньше скорости восходящего потока, то она выносится в мелкий продукт классификации; если больше – осаждается в крупный. Подробный анализ конструкций гравитационных классификаторов, областей их применения и методов расчета приведен в [1–4]. Однако описанные в них методы расчета в основном базируются на обобщении экспериментальных данных по уже имеющимся классификаторам. Несмотря на принципиальную простоту описанного выше процесса гравитационной классификации, реальный процесс оказывается достаточно сложным для теоретического описания из-за действия многочисленных сопутствующих факторов, снижающих четкость разделения. В первую очередь к ним относятся турбулентные пульсации в потоке газа, взаимные столкновения частиц и неравномерное распределение скорости газа в поперечном сечении аппарата. Впервые попытка построить теоретическую модель процесса на основе теории Марковских процессов была предпринята в [5, 6]. Позднее этот подход был развит и обобщен в [5–7], однако во всех случаях рассматривались одномерные модели процесса, которые, в принципе, не могут учесть влияние на его характеристики поперечной неоднородности потока несущего газа. Постараемся восполнить этот пробел.

Основной характеристикой любого классификатора является его кривая разделения, связывающая долю фракции в исходном для разделения продукте φ , вынесенную в мелкий продукт. Далее крупность частицы будет характеризоваться скоростью ее витания V_s , связь которой с размером частицы может быть определена по приведенным в [3] формулам. Таким образом, целью описания является выявление влияния поперечной неоднородности скорости газа W на кривую разделения $\varphi(V_s)$.

Расчетная схема процесса и его ячейечное представление показаны на рис. 1. Рабочее пространство классификатора представлено двумерной сеткой квадратных $n \times m$ ячеек со стороной Δx . Считается, что в каждый мо-

мент времени все параметры равномерно распределены внутри каждой ячейки. Содержание частиц в ячейках характеризуется матрицей состояния \mathbf{S}^m размера $n \times m$ или вектором состояния \mathbf{S} размера $nm \times 1$, в котором столбцы матрицы \mathbf{S}^m расположены последовательно друг под другом.

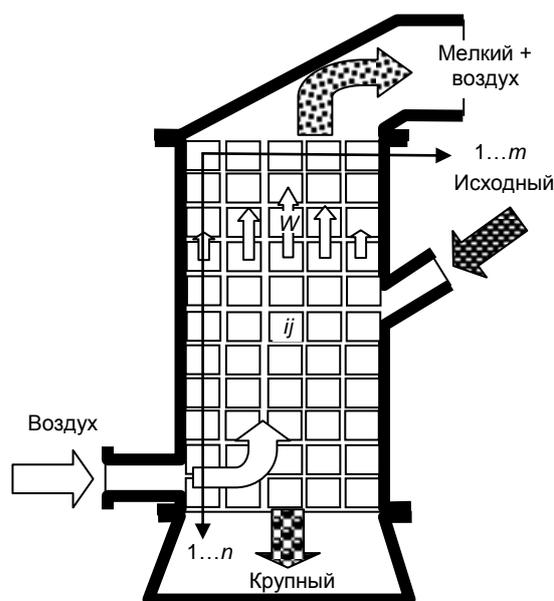


Рис. 1. Расчетная схема гравитационного классификатора и ячейечное представление зоны разделения

Для построения модели примем следующую физическую картину процесса. Вдоль каждого столбца ячеек скорость газа W_j одинакова, но отличается от столбца к столбцу в силу неоднородности потока. Пусть процесс наблюдается в дискретные моменты времени $t_k = (k-1)\Delta t$, где k – номер временного перехода, а Δt – его продолжительность (здесь k может рассматриваться как целочисленный аналог времени). За время Δt возможны следующие переходы частиц между ячейками: стохастический перенос вправо и влево, характеризуемый коэффициентом поперечной диффузии D_x ; стохастический перенос вверх и вниз, характеризуемый коэффициентом продольной диффузии D_y ; конвективный перенос вверх или вниз, характеризуемый скоростью квазистационарного движения частиц $V_j = V_s - W_j$. Расчет соответствующих долей частиц, переходящих из ячейки в ячейку, осуществляется по формулам $d_x = D_x \Delta t / \Delta x^2$, $d_x = D_x \Delta t / \Delta x^2$, $v_j = V_j \Delta t / \Delta x$, $v_s = V_s \Delta t / \Delta x$, $w_j = W_j \Delta t / \Delta x$.

Эволюция состояния процесса, т. е. вектора \mathbf{S} , описывается рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P}\mathbf{S}^k - \Delta\mathbf{S}_f^k - \Delta\mathbf{S}_c^k, \quad (1)$$

где \mathbf{P} – матрица переходных вероятностей, которая является пятидиагональной матрицей размера $(nm) \times (nm)$. Ее ненулевые элементы определяются по формулам, вытекающим из структуры возможных переходов из ячеек:

- переходы вправо

$$P(n(j-1) + i - 1, n(j-1) + i) = d_x, j = 1:m, i = 2:n; \quad (2)$$

- переходы влево

$$P(n(j-1) + i + 1, n(j-1) + i) = d_x, j = 1:m, i = 1:n-1; \quad (3)$$

- переходы вверх

$$P(n(j-2) + i, n(j-1) + i) = d_y + e|v_j|, j = 2:m, i = 1:n; \quad (4)$$

- переходы вниз

$$P(nj + i, n(j-1) + i) = d_y + (e-1)|v_j|, j = 1:m-1, i = 1:n; \quad (5)$$

где $e = 1$, если $v_j > 0$, и $e = 0$, если $v_j < 0$.

Доли оставшихся в ячейках частиц рассчитываются как единица минус сумма всех остальных элементов матрицы в каждом столбце.

Векторы $\Delta \mathbf{S}_f^k$ и $\Delta \mathbf{S}_c^k$ описывают исчезновение (вывод) частиц из верхнего (для мелкого продукта) и нижнего (для крупного продукта) рядов ячеек. Вектор выхода мелких частиц на каждом временном переходе рассчитывается следующим образом:

$$\Delta \mathbf{S}_f^k = \mathbf{S}(1,:) \cdot \mathbf{w}, \quad (6)$$

где $\mathbf{S}^k(1,:)$ – вектор текущего содержания частиц в верхней строке ячеек; \mathbf{w} – вектор величин скоростей потока газа в столбцах ячеек сетки (следуя [1, 3], считается, что частицы выносятся с локальной скоростью газа в выходном сечении); оператор \cdot означает поэлементное умножение векторов. Полный выход частиц в мелкий продукт на k -м переходе q_f^k рассчитывается как сумма элементов вектора $\Delta \mathbf{S}_f^k$.

По аналогичной процедуре рассчитывается выход частиц из нижней строки ячеек сетки в крупный продукт:

$$\Delta \mathbf{S}_c^k = \mathbf{S}(n,:) \cdot \mathbf{v}_s, \quad (7)$$

где, следуя [1, 3], считается, что частицы выносятся в крупный продукт со скоростью витания.

После вычисления ненулевых элементов этих векторов по (6) и (7) они должны быть трансформированы в размерность вектора \mathbf{S} .

Для запуска расчетной процедуры необходимо задать начальный вектор состояния, в котором все элементы равны нулю, кроме элемента, соответствующего номеру ячейки, куда подается исходная фракция, и который удобно принять равным единице. Тогда доля этой фракции, характеризуемой скоростью V_s , вышедшая в мелкий продукт (одна точка кривой разделения) определится следующим образом:

$$\varphi(V_s) = \sum_{k=1}^{\infty} q_f^k. \quad (8)$$

Задавая последовательность величин V_s , можно рассчитать всю кривую разделения.

Численные эксперименты с разработанной моделью были выполнены для сетки ячеек размера 20×11 при подаче материала в ячейку (10,11). Сравнивались кривые разделения при различных параболических профилях скорости газа (рис. 2), причем профили подбирались таким образом, чтобы средняя расходная скорость была одинаковой и составляла W_0 .

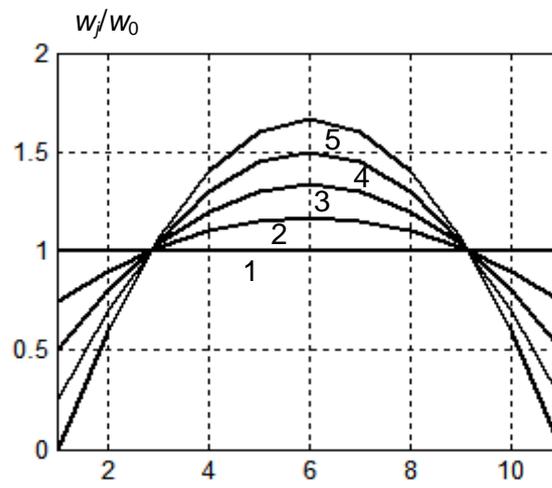


Рис. 2. Профили относительной скорости несущего газа в численных экспериментах

Сами кривые разделения, соответствующие этим профилям скорости, показаны на рис. 3. Анализ полученных графиков показывает, что увеличение неоднородности потока приводит к значительной деформации кривых разделения и снижению остроты разделения. При этом одновременно снижается граничный размер классификации – размер фракции, которая на 50 % выносятся в мелкий продукт.

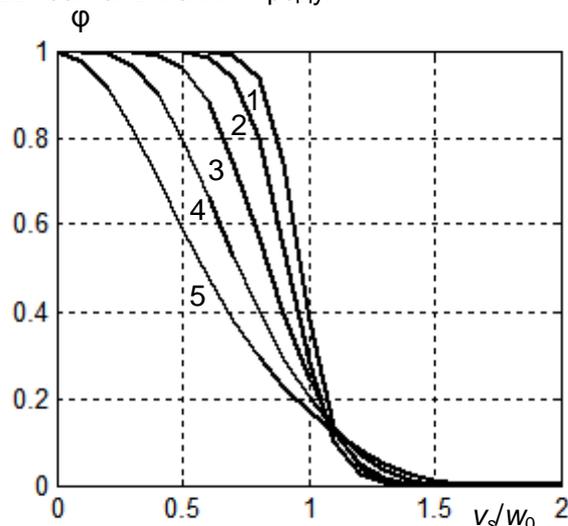


Рис. 3. Кривые разделения при различных профилях скорости несущего газа (цифры соответствуют профилям на рис. 2), $d_f = 0,05$; $d_c = 0,0125$

Очевидно, что интенсивное поперечное перемешивание должно снижать негативное влияние неоднородности потока. Расчетная

оценка этого влияния показана на рис. 4, где построены кривые разделения для наиболее неоднородного профиля 5 при различной интенсивности поперечного перемешивания, характеризуемого коэффициентом поперечной диффузии d_x . При переходе от $d_x = 0,0125$ к $d_x = 0,2$ кривая разделения почти приближается к таковой для однородного потока.

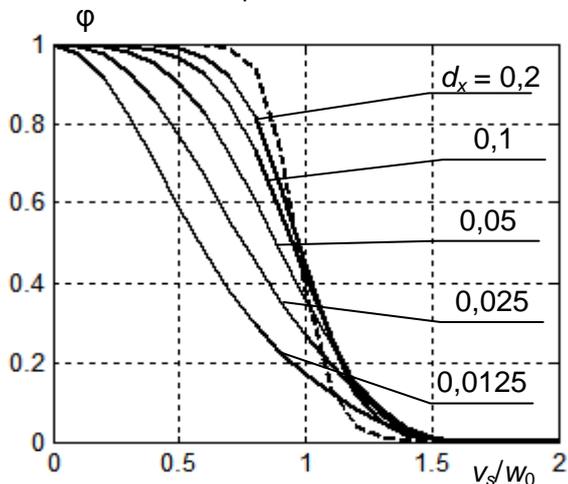


Рис. 4. Влияние интенсивности поперечного перемешивания на кривые разделения при профиле скорости 5 (см. рис. 2). Штриховая линия относится к однородному потоку ($d_y = 0,05$)

Таким образом, повышение интенсивности поперечного перемешивания частиц в гравитационном классификаторе, которое может быть достигнуто путем использования специальных вставок в рабочий объем, является заметным резервом повышения эффективности процесса разделения.

Список литературы

1. Барский М.Д., Ревнивцев В.И., Соколкин Ю.В. Гравитационная классификация зернистых материалов. — М.: Недра, 1974. — 232 с.
2. Барский М.Д. Фракционирование порошков. — М.: Недра, 1980. — 327 с.
3. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. — М.: Химия, 1989. — 160 с.
4. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация тонкодисперсных сыпучих материалов и

Шуина Елена Александровна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
e-mail: barantseva77@mail.ru

Мизонов Вадим Евгеньевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
e-mail: mizonov46@mail.ru

Мисбахов Ринат Шаукатович,
ФГБОУВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
кандидат технических наук, доцент кафедры котельных установок и парогазогенераторов,
e-mail: zerdex84@mail.ru

оборудование для ее реализации // Химическое и нефтяное машиностроение. — 1992. — №1. — С. 7–12.

5. Molerus O. Stochastisches Modell der Gleichgewichtssichtung // Chemie Ing. Technik. — 1967. — Bd. 39, № 13. — S. 792–796.

6. Molerus O., Hoffmann H. Darstellung von Windsichtertrennkurven durch ein stochastisches Model // Chem.-Ing.-Tech. — 1969. — Bd. 41, № 5–6. — S. 340–344.

7. Berthiaux H., Dodds J.A. Modelling Classifier Networks by Markov Chains // Powder Technology. — 1999. — 105. — P. 266–273.

8. Кутепов А.М., Непомнящий Е.А. Центробежная сепарация гидрожидкостных систем как случайный процесс // Теоретические основы химической технологии. — 1973. — Т. 7, № 6. — С. 892–896.

9. Математическая модель гравитационной классификации на основе теории цепей Маркова / В.П. Жуков, В.Е. Мизонов, Н. Berthiaux и др. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. — 2004. — Т. 47, вып. 1. — С. 125–127.

References

1. Barskiy, M.D., Revnitsev, V.I., Sokolkin, Yu.V. Gravitatsionnaya klassifikatsiya zernistykh materialov [Gravity classification of graded materials]. Moscow, Nedra, 1974. 232 p.
2. Barskiy, M.D. Fraktsionirovanie poroshkov [Powder fractionation]. Moscow, Nedra, 1980. 327 p.
3. Mizonov, V.E., Ushakov, S.G. Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov [Aerodynamic powder classification]. Moscow, Khimiya, 1989. 160 p.
4. Mizonov, V.E., Ushakov, S.G. Aerodinamicheskaya klassifikatsiya tonkodispersnykh syuchikh materialov i oborudovanie dlya ee realizatsii [Aerodynamic classification of finely-dispersed granular materials and equipment for its realization]. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie*, 1992, no. 1, pp. 7–12.
5. Molerus, O. Stochastisches Modell der Gleichgewichtssichtung. *Chemie Ing. Technik*, 1967, Bd. 39, no. 13, pp. 792–796.
6. Molerus, O., Hoffmann, H. Darstellung von Windsichtertrennkurven durch ein stochastisches Model. *Chem.-Ing.-Tech.*, 1969, Bd. 41, no. 5–6, pp. 340–344.
7. Berthiaux, H., Dodds, J.A. Modelling Classifier Networks by Markov Chains. *Powder Technology*, 1999, 105, pp. 266–273.
8. Kutepov, A.M., Nepomnyashchiy, E.A. Tsentrobezhnaya separatsiya gidrozhidkostnykh sistem kak sluchaynyy protsess [The centrifugal separation of hydrofluid systems as a random process]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 1973, vol. 7, no. 6, pp. 892–896.
9. Zhukov, V.P., Mizonov, V.E., Berthiaux, H., Otwinowski, H., Urbaniak, D., Zbronski, D. Matematicheskaya model' gravitatsionnoy klassifikatsii na osnove teorii tsepey Markova [Mathematical model of gravity classification based on the Markov chains theory]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2004, vol. 47, issue 1, pp. 125–127.