

Математическая модель эволюции состояния слоя дисперсного топлива при нагреве и сушке в плотном и псевдоожигенном слое¹

А.В. Митрофанов

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: and2mit@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: На сегодняшний день конвективная сушка твердого топлива проводится в плотном слое или в псевдоожигенном. Выбор между этими двумя вариантами не очевиден, так как обе эти технологии обладают определенными достоинствами и недостатками. По этой причине развитие обобщенной методологии для описания процесса в обеих этих формах в настоящее время является актуальным.

Материалы и методы: Теория цепей Маркова использована как математическая основа для построения модели эволюции распределения содержания влаги и теплоты в зернистом слое. Программно-алгоритмическое обеспечение модели разработано в пакете MatLab.

Результаты: Предложена модель кинетики процесса сушки системы «газ–твердая фаза». Плотное и псевдоожигенное состояния системы «газ–твердая фаза» рассмотрены на основе общей методологии, позволяющей объяснять механизм псевдоожигения плотного слоя в процессе сушки. Приведены результаты численного моделирования процесса.

Выводы: Разработанная модель устанавливает качественную связь между гидродинамической ситуацией в слое и процессами тепло- и массопереноса в нем. В дальнейших исследованиях необходимо провести количественное определение коэффициентов теплообмена и массообмена.

Ключевые слова: псевдоожигенный слой, вектор состояния, матрица переходных вероятностей, скорость витания частицы, теплоотдача, массоотдача, содержание влаги, твердое топливо.

Mathematical model of evolution of particulate fuel bed state under heating and drying in a dense and fluidized bed²

A. Mitrofanov

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: and2mit@mail.ru

Abstract

Background: Nowadays convective drying of solid fuels is done in a dense or fluidized bed. It is not easy to make choice between these two possible variants because both of the technologies have certain advantages and disadvantages. For this reason, the development of a common approach to description of the process in both forms is now among urgent tasks.

Materials and methods: The Markov chains approach is used as a mathematical basis to build the model of evolution of moisture content and heat distribution in a particulate bed. The algorithms and the software of the model are implemented in MatLab.

Results: A kinetic model of drying process in a gas-solid system is proposed. The dense and fluidized states of the gas-solid system are studied based on the common approach allowing the explanation of the dense bed fluidization mechanism during the drying process. Some results of numerical modeling the process are presented.

Conclusions: The proposed model establishes the qualitative relationship between hydrodynamic state of the bed and heat and mass transfers inside it. In further researches, it is necessary to make the quantitative determination of the heat and mass transfer coefficients.

Key words: fluidized bed, state vector, matrix of transition probabilities, particle settling velocity, heat transfer, mass transfer, moisture content, solid fuel.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.2.067-070

Развитие топливной энергетики неразрывно связано с разработкой новых и совершенствованием существующих технологий термической обработки твердых видов топлива. Указанная обработка может производиться для

достижения различных целей (сушки, сжигания, пиролиза и др.), однако, независимо от конечной цели, процесс происходит при прохождении потока окислителя (воздуха) через слой сыпучего материала и сопровождается обменом по-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-01-31177 мол_а.

токамаи теплоты и массы между частицами и движущимся газом.

В процессе обработки слой частиц может находиться в плотном, псевдооживленном состоянии или в состоянии пневмотранспорта [1, 2, 3]. Выбор режима обработки частиц обосновывается исходя из технологических соображений, при этом максимальная движущая сила процесса часто достигается в режимах работы, близких к переходным из одного состояния слоя в другое. Вместе с тем в процессе обработки свойства частиц материала изменяются, что может приводить к нарушению выбранного режима проведения процесса вплоть до полного его прекращения (например, выноса частиц из аппарата и др.).

Таким образом, организация тепловой обработки различных видов топлива в широком диапазоне его характеристик и режимов взаимодействия слоя частиц с воздушным потоком требует разработки на единой основе надежных и доступных в инженерной практике моделей процесса, пригодных для быстрого пересчета его характеристик и регулирования в режиме реального времени.

Предлагаемые модели далеко не всегда отвечают указанным требованиям [1, 4], детально описывая отдельные явления в слое, они не продвигают модель к инженерному методу расчета, так как требуют значительного машинного времени даже для одного режимно-конструктивного варианта, а также идентификации большого числа параметров.

Таким образом, остается актуальной разработка моделей, сочетающих быстроту вычислительных операций с расчетом характеристик слоя по локальным состояниям. В связи с этим необходимо развитие предложенной нами ранее [5, 6] подобной модели, основанной на теории цепей Маркова.

В основу модели положена ячеечная схема: аппарат представлен как совокупность из n ячеек, вероятности миграций частиц между которыми содержатся в переходной матрице \mathbf{P}_p . Эволюция состояния системы рассматривается через малые конечные промежутки времени Δt .

Особенностью разрабатываемой модели является то, что, в отличие от подобных линейных моделей [7, 8, 9], локальные скорости движения оживающего агента в ячейках и пропорциональные этим скоростям вероятности миграций частиц рассчитываются с учётом локальной объемной концентрации этих частиц и ее влияния на уменьшение живого сечения потока.

Методика расчета скорости витания частиц на основе выполненного нами обобщения экспериментальных данных описана в [5, 6]. Используя эти данные, можно найти фактическую скорость движения частиц в ячейке, а по ней – вероятности конвективного переноса

$$v_i = (W_i - V_{si}) \Delta t / \Delta x, \quad (1)$$

где W_i – скорость обтекания частиц в i -й ячейке; V_{si} – скорость витания частиц в i -й ячейке; Δx – высота ячейки.

Скорость обтекания частиц в i -й ячейке W_i при известной расходной скорости в ней W_{0i} рассчитывается по следующей зависимости:

$$W_i = \frac{W_{0i}}{1 - \pi \left(\frac{C_i^k}{8C_{\max}} \right)^{2/3}}, \quad (2)$$

где C_{\max} – максимально возможная объемная концентрация частиц, соответствующая плотному слою; C_i^k – текущая объемная концентрация частиц в i -й ячейке, соответствующая k -му временному переходу.

Аэродинамическая крупность зерен представлена через скорость витания одиночной частицы V_{si} , которая для установившегося состояния псевдооживления должна быть равна локальной скорости воздуха в ячейке W_i .

Скорость витания одиночной частицы связана с ее весом через соотношение

$$P = C_d f_p \rho_g \frac{V_{si}^2}{2}, \quad (3)$$

где C_d – коэффициент сопротивления одиночной частицы, функциональная зависимость $C_d = f(\text{Re})$ для расчета которого приведена в [6]; f_p – площадь поверхности одиночной частицы; ρ_g – плотность газа.

Переходные вероятности p_{si} , p_{ui} и p_{di} связаны с параметрами процесса и крупностью фракции следующими зависимостями [3, 4, 6]:

$$p_{si} = 1 - p_{ui} - p_{di}, \quad (4)$$

$$p_{di} = d \text{ при } (W_i - V_{si}) > 0, \quad (5)$$

$$p_{di} = v_i + d \text{ при } (W_i - V_{si}) < 0, \quad (6)$$

$$p_{ui} = v_i + d \text{ при } (W_i - V_{si}) > 0, \quad (7)$$

$$p_{ui} = d \text{ при } (W_i - V_{si}) < 0, \quad (8)$$

$$d = D \Delta t / \Delta x^2, \quad (9)$$

где D – коэффициент макродиффузии.

На уровне верхней ячейки, где v_h становится равной нулю, расширение слоя прекращается и вся дальнейшая эволюция его состояния происходит внутри него. В [5, 6] показано, что модель позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью прогнозировать переход слоя во взвешенное состояние и его расширение в режиме псевдооживления.

Расчетная схема процесса псевдооживления показана на рис. 1. Цепь ячеек слева отвечает за миграции частиц и сопряженной с ними влаги, справа показана цепь ячеек, отвечающая за вертикальное перемещение газа.

Продольное перемещение частиц и оживающего агента вдоль цепей описывается рекуррентными матричными равенствами:

$$\mathbf{S}_p^{k+1} = \mathbf{P}_p^k \mathbf{S}_p^k, \quad (10)$$

$$\mathbf{S}_g^{k+1} = \mathbf{P}_g^k \mathbf{S}_g^k + \mathbf{S}_{gf}, \quad (11)$$

где \mathbf{S}_p и \mathbf{S}_g – векторы-столбцы объемного содержания частиц и газа в ячейках; \mathbf{P}_p^k и \mathbf{P}_g^k – матрицы переходных вероятностей для частиц и газа, зависящие от векторов состояния и меняющиеся на каждом переходе; \mathbf{S}_{gf} – вектор подачи газа (при подаче через решетку он имеет единственный ненулевой элемент в первой ячейке, равный объему газа, подаваемому в нее за один переход).

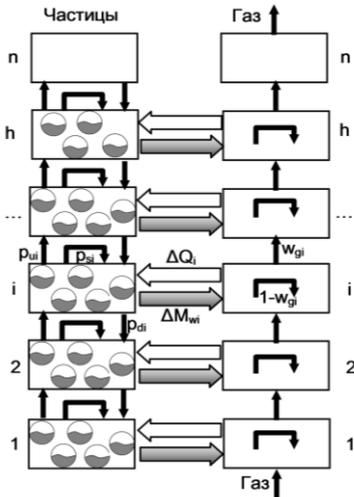


Рис. 1. Расчетная схема модели псевдооживления

Очевидно, что матрицы \mathbf{P}_p^k и \mathbf{P}_g^k будут контролировать перенос вдоль цепей любого аддитивного свойства, связанного с частицами и газом, в частности, содержащейся в частицах теплоты и влаги. Поперечный же перенос теплоты и влаги может быть описан обычными соотношениями тепло- и массоотдачи. В этом случае кинетика распределенного тепло- и массообмена в слое будет описываться рекуррентными матричными равенствами:

$$\mathbf{M}_{wp}^{k+1} = \mathbf{P}_p^k (\mathbf{M}_{wp}^k - \mathbf{k}_w \cdot \mathbf{F}^k \cdot (\mathbf{p}_{ws}^k - \mathbf{p}_{wg}^k) \Delta t), \quad (12)$$

$$\mathbf{M}_{wg}^{k+1} = \mathbf{P}_g^k (\mathbf{M}_{wg}^k + \mathbf{k}_w \cdot \mathbf{F}^k \cdot (\mathbf{p}_{ws}^k - \mathbf{p}_{wg}^k) \Delta t + \mathbf{M}_{wgi}), \quad (13)$$

$$\mathbf{Q}_p^{k+1} = \mathbf{P}_p^k (\mathbf{Q}_p^k + \alpha \cdot \mathbf{F}^k \cdot (\mathbf{T}_g^k - \mathbf{T}_p^k) \Delta t - \mathbf{r} \mathbf{k}_w \cdot \mathbf{F}^k \cdot (\mathbf{M}_{ws}^k - \mathbf{M}_{wg}^k) \Delta t), \quad (14)$$

$$\mathbf{Q}_g^{k+1} = \mathbf{P}_g^k (\mathbf{Q}_g^k - \alpha \cdot \mathbf{F}^k \cdot (\mathbf{T}_g^k - \mathbf{T}_p^k) \Delta t + \mathbf{Q}_{gi}), \quad (15)$$

где \mathbf{Q} – вектор количеств теплоты в ячейках; \mathbf{T} – вектор температур; \mathbf{M}_w – вектор масс влаги; \mathbf{p}_{ws} и \mathbf{p}_{wg}^k – векторы парциальных давлений влаги на поверхности частиц и в газе; \mathbf{k}_w и α – векторы коэффициентов массоотдачи и теплоотдачи; \mathbf{F}^k – вектор поверхностей обмена в ячейках, зависящий от концентрации частиц в них; оператор \cdot означает поэлементное умножение векторов. Векторы \mathbf{Q} и \mathbf{T} связаны соотношением $\mathbf{Q} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{c} \cdot \rho$, где \mathbf{c} – вектор

теплоемкостей влажных частиц и ρ – вектор их плотностей.

Плотность частиц, меняющаяся в процессе массообмена, рассчитывается по соотношению

$$\rho^k = (\mathbf{M}_w^k + \rho_p \mathbf{S}_p^k) / \mathbf{S}_p^k, \quad (16)$$

где ρ_p – плотность сухих частиц.

Распределение влагосодержания по ячейкам цепей рассчитывается по следующим формулам:

$$\mathbf{m}_{wp}^k = \mathbf{M}_{wp}^k / (\rho_p \mathbf{S}_p^k), \quad (17)$$

$$\mathbf{m}_{wg}^k = \mathbf{M}_{wg}^k / (\rho_g \mathbf{S}_g^k), \quad (18)$$

где ρ_g – плотность газа, которая определяется по уравнению состояния.

При высокой пористости частиц и влагосодержании может происходить значительное изменение их плотности при практически постоянном диаметре, что приводит к уменьшению их скорости витания, вследствие чего вероятности переноса частиц вверх увеличиваются, что может приводить к дальнейшему расширению уже псевдооживленного слоя или переходу плотного слоя во взвешенное состояние.

Таким образом, гидромеханическое состояние системы не является установившимся до полного высыхания всех частиц. При этом, во-первых, изменяются локальные параметры проведения процессов тепло- и массообмена и матрицы переходных вероятностей \mathbf{P} должны пересчитываться на каждом временном переходе из-за изменения физико-механических свойств частиц. Во-вторых, переходы системы «газ–твердое» из одного состояния в другое (из плотного слоя в псевдооживленное состояние, из псевдооживленного в режим пневмотранспорта) сопровождаются изменением структуры самой модели.

На рис. 2 приведена расчетная схема для сушки в плотном слое. В левой цепи ячеек, отвечающей за эволюцию состояния твердой фазы, отсутствуют переходы частиц между ячейками.

Отсутствие перемешивания частиц в слое, очевидно, должно приводить к более неравномерному изменению физико-механических свойств частиц в цепи в процессе сушки. В то же время более высокая концентрация твердой фазы в ячейках (по сравнению с псевдооживленным состоянием) обеспечит более высокие значения локальных скоростей и коэффициентов тепло- и массоотдачи. На рис. 3, 4 представлены результаты вычислительного эксперимента, в ходе которого слой частиц ($d_p = 1$ мм) переходит в процессе сушки из плотного во взвешенное состояние.

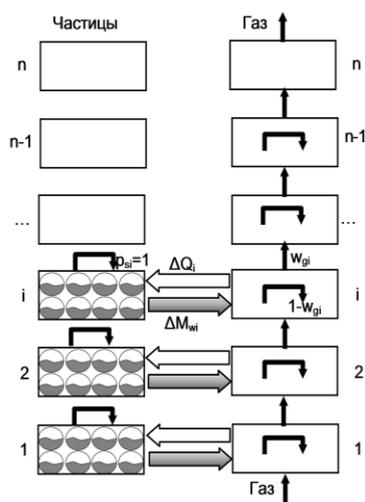


Рис. 2. Расчетная схема модели плотного слоя

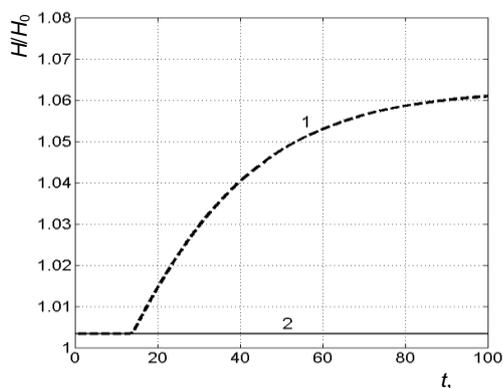


Рис. 3. Изменение относительной высоты слоя (цилиндрический аппарат с внутренним диаметром $D = 0,085$ м; размер частиц $d_p = 0,001$ м; плотность частиц $\rho_p = 1100$ кг/м³): 1 – псевдооживленное состояние ($W_0 = 0,55$ м/с); 2 – плотный слой ($W_0 = 0,48$ м/с)

Рис. 3 показывает изменение высоты слоя в процессе сушки. Рис. 4 иллюстрирует кинетику изменения влагосодержания в нижней и десятой ячейках слоя. В плотном слое влагосодержание в нижней и верхней (десятой) ячейках цепи заметно различается, после перехода во взвешенное состояние его значения выравниваются.

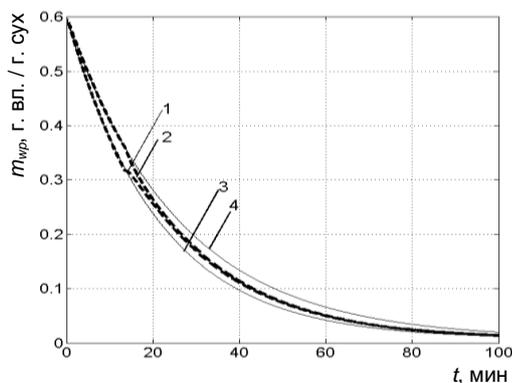


Рис. 4. Кинетика изменения влагосодержания частиц: 1 – нижняя ячейка псевдооживленного слоя; 2 – десятая ячейка ($i = 10$) псевдооживленного слоя; 3 – нижняя ячейка плотного слоя; 4 – десятая ячейка ($i = 10$) плотного слоя

Кроме того, на рис. 4 приведены расчетные значения изменения влагосодержания частиц при сушке в плотном слое (при более низкой расходной скорости сушильного агента).

Таким образом, предлагаемая модель качественно непротиворечиво описывает процессы тепло- и массопереноса в слое, а также изменение гидродинамической ситуации, вызываемой этими процессами.

Список литературы

1. **Расчеты** аппаратов кипящего слоя: справочник / под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
2. **Пицуха Е.А., Теплицкий Ю.С., Бородуля В.А.** Некоторые закономерности закрученных двухфазных течений в надслоевом пространстве кипящего слоя мелкодисперсных частиц // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, №1. – С. 3–10.
3. **Исследование** процессов нагрева и сушки слоя органосодержащих отходов в термическом реакторе / О.Б. Колибаба, О.И. Горинов, Р.Н. Габитов, О.В. Самышина // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 6. – С. 17–21.
4. **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.
5. **Modeling** of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains / V. Mizonov, A. Mitrofanov, A. Ogurtzov, K. Tannous // Particulate Science and Technology: An International Journal. – 2014. – Vol. 32 (2). – P. 171–178.
6. **Митрофанов А.В., Tannous K., Мизонов В.Е.** Экспериментальное исследование гидродинамики частиц биотоплива в топке с кипящим слоем // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 3. – С. 65–67.
7. **Dehling H.G., Hoffman A.C., Stuet H.W.** Stochastic Models for Transport in a Fluidised Bed // SIAM Journal of Applied Mathematics. – 1999. – 60, 1. – P. 337–358.
8. **A stochastic** model for mixing and segregation in slugging fluidized beds / H.G. Dehling, C. Dechsiri, T. Gottschalk, Ph.C. Wright, A.C. Hoffmann // Powder Technology. – 2007. – 171. – P. 118–125.
9. **Dehling H.G., Gottschalk T., Hoffmann. A.C.** Stochastic Modeling in Process Technology. – London, Elsevier Science, 2007. – 279 p.

References

1. Mukhlenov, I.P., Sazhin, B.S., Frolov, V.F. *Raschetnyy apparatov kipyashchego sloya* [Calculation of boiling bed apparatus: reference book]. Leningrad, Khimiya, 1986. 352 p.
2. Pitsukha, E.A., Teplitkiy, Yu.S., Borodulya, V.A. *Nekotorye zakonornosti zakruchennykh dvukhfaznykh techeniy v nadsloevom prostranstve kipyashchego sloya melkodispersnykh chastits* [Some regulations of whirling two-phase flows in the freeboard of boiling bed of fine particles]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2015, vol. 88, no. 1, pp. 3–10.
3. Kolibaba, O.B., Gorinov, O.I., Gabitov, R.N., Samyshina, O.V. *Issledovanie protsessov nagreva i sushki sloya organosoderzhashchikh otkhodov v termicheskom reaktore* [Research into heating and drying processes of thermal reactor organic waste layer]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 6, pp. 17–21.
4. 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.
5. Mizonov, V., Mitrofanov, A., Ogurtzov, 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 (2), pp. 171–178.
6. Mitrofanov, A.V., Tannous, K., Mizonov, V.E. *Eksperimental'noe issledovanie gidrodinamiki chastits biotopliva v*

topke s kipyashchim sloem [Experimental study of particle hydrodynamics of biofuel in a fluidized-bed furnace]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 3, pp. 65–67.

7. Dehling, H.G., Hoffman, A.C., Stuu, H.W. Stochastic Models for Transport in a Fluidised Bed. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 1999, 60, 1, pp. 337–358.

8. Dehling, H.G., Dechsiri, C., Gottschalk, T., Wright, Ph.C., Hoffmann, A.C. A stochastic model for mixing and segregation in slugging fluidized beds. *Powder Technology*, 2007, 171, pp. 118–125.

9. Dehling, H.G., Gottschalk, T., Hoffmann, A.C. *Stochastic Modeling in Process Technology*. London, Elsevier Science, 2007. 279 p.

Митрофанов Андрей Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики,
e-mail: and2mit@mail.ru