

Моделирование теплообмена в реакторах с полидисперсным кипящим слоем

А.В. Митрофанов¹, А.В. Огурцов¹, В.А. Магницкий¹, В.Е. Мизонов¹, Н. Berthiaux²
¹ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
²Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, France
E-mail: mizonov46@mail.ru, berthiau@enstima.fr

Авторское резюме

Состояние вопроса: Расчет теплообмена в котлах с кипящим слоем требует информации о распределении частиц топлива и наполнителя по высоте слоя. Инженерный расчет псевдооживленного слоя должен базироваться на математических моделях процесса, учитывающих все основные факторы псевдооживления, с одной стороны, и обладающих достаточной простотой, чтобы выполнять эти расчеты за разумное время, с другой. Этим требованиям отвечают модели, построенные на основе теории цепей Маркова, в которых переходные вероятности должны быть согласованы с физикой процесса. Построение такой модели и является нашей задачей.

Материалы и методы: Предлагаемая математическая модель процесса основана на теории цепей Маркова. Слой представлен в виде двух параллельных цепей ячеек. Одна из цепей служит для описания движения частиц, вторая цепь описывает восходящее движение газа.

Результаты: Предложена математическая модель псевдооживления бинарной смеси частиц, позволяющая рассчитывать межфазный теплообмен в слое. Установлены закономерности межфазного теплообмена при псевдооживлении, учитывающие неоднородность распределения содержания частиц разных фракций по высоте аппарата.

Выводы: Расчетная картина изменения температуры оживающего агента находится в хорошем качественном соответствии с физическими представлениями о теплообмене в кипящем слое, а возможность прогнозирования распределения твердой фазы по высоте слоя определяет эвристическую эффективность предлагаемой модели.

Ключевые слова: псевдооживленный слой, бинарная смесь частиц, межфазный теплообмен, цепь Маркова, конвективный перенос, диффузионный перенос, распределение концентрации.

Modeling of heat exchange in reactors with polydispersed fluidized bed

A.V. Mitrofanov¹, A.V. Ogurtsov¹, V.A. Magnitskiy¹, V.E. Mizonov¹, H. Berthiaux²
¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
²Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, France
E-mail: mizonov46@mail.ru, berthiau@enstima.fr

Abstract

Background: Calculation of fluidized bed boilers requires information of fuel particles and filling distribution over the bed height. Engineering calculation of fluidized bed must be based on mathematical models of the process that takes into account all basic features of fluidization on the one hand, and are simple enough to have a reasonable computational time, on the other hand. These requirements can be met by the models based on the theory of Markov chains, in which transitions probabilities must be agreed with the process physics. The objective of the study is to build such a model.

Materials and methods: The proposed mathematical model is based on the theory of Markov chains. A bed is presented as two parallel chains of cells. One chain is for description of particle motion, another one describes the upstream gas flow. If interphase heat exchange occurs, portions of heat are transferred between corresponding cells of the chains. This process is accompanied by longitudinal heat transitions along the chains.

Results: A mathematical model of fluidization of binary mixture of particles is proposed. The model allows calculating interphase heat exchange in the bed.

Conclusions: Regularities of interphase heat exchange in a fluidized bed that take into account non-homogeneity of different size fractions distribution over the bed height are found.

Key words: fluidized bed, binary mixture of particles, Markov chain, interphase heat exchange, convection transition, diffusion transition, concentration distribution, temperature distribution.

При выборе технологии сжигания твердого топлива необходимо стремиться к выполнению двух требований: сжигание должно быть по возможности полным и не должно сопровождаться большими выбросами вредных веществ (например, оксидов серы и азота).

Характерной особенностью сжигания зернистых материалов в псевдооживленном слое является развитая поверхность межфаз-

ного взаимодействия, что в результате приводит к высокой степени выгорания углерода и повышению КПД котлов. Другим преимуществом котлов с псевдооживленным слоем является то, что температура сжигания топлива в слое оказывается невысокой (820–900 °С) из-за крупного размера частиц сжигаемых материалов, образование оксидов азота при таких температурах происходит очень медленно [1].

Технология псевдооживления пришла в энергетику из химической инженерии, где, с одной стороны, имеется обширный опыт ее применения, но, с другой стороны, накоплен большой объем проблем, связанных с организацией технологических процессов с псевдооживленным слоем. Так, важными являются вопросы о том, насколько быстро протекает процесс межфазного теплообмена и на какой высоте над газораспределительной решеткой температура потока становится практически равной температуре частиц твердой фазы. Для описания межфазного теплообмена необходимы зависимости для расчета сомножителей в правой части уравнения Фурье: коэффициента теплообмена, поверхности межфазного взаимодействия и среднего температурного напора. В то же время надежные зависимости для расчета температурного напора отсутствуют, ввиду экспериментальных трудностей по измерению температур частиц и оживающего агента в слое. Для расчета же коэффициента теплообмена предложено большое количество эмпирических зависимостей, из числа которых довольно сложно выбрать наиболее достоверную [2].

Кроме того, имеются принципиальные сомнения в возможности описания межфазного теплообмена при помощи единого для всего объема слоя коэффициента теплообмена. Действительно, общепринято деление слоя на три основные зоны по высоте, отличающиеся значениями порозности [2, 3]. Однако такое деление условно и является упрощением действительной картины, так как и внутри этих зон условия теплообмена также неоднородны.

Преодоление указанных затруднений может быть достигнуто при математическом моделировании псевдооживления, если модель будет описывать процесс теплообмена в слое по локальным состояниям и учитывать неоднородность распределения твердой фазы по его высоте. Такая модель, на наш взгляд, может быть построена на основе теории цепей Маркова, которые хорошо зарекомендовали себя при моделировании многих смежных процессов переработки сыпучих материалов (воздушной классификации и др.) [4].

Ранее нами была предложена ячеечная модель монофракционного псевдооживленного слоя, где движение частиц описывалось с учетом стесненности их обтекания в слое и взаимодействия друг с другом [5]. Эта математическая модель позволила рассчитывать распределение концентраций частиц и локальных скоростей газа по высоте аппарата в установившемся режиме и показала удовлетворительную точность прогноза этих характеристик. В практике псевдооживления чаще работают с полидисперсным материалом. При обработке многофракционной смеси ситуация сложнее, чем при оживлении монофракции. Частицы всех фракций загромождают сечение аппарата и

влияют на скорость оживающего агента в данном сечении, в то же время распределение содержания зерен разной крупности по высоте аппарата определяется уже не только расходом оживающего агента, но также гранулометрическим составом и процентным соотношением компонентов смеси. В таких условиях особенно возрастает роль математических моделей, позволяющих прогнозировать распределение концентрации фракций по высоте с учетом их взаимного влияния и находить режимы псевдооживления, обеспечивающие устойчивую работу аппарата. Построение такой модели и предлагается ниже.

При построении ячеечной модели слой разбивается по высоте на n секций высотой $\Delta x = H/n$, где H – высота рабочей части аппарата. Считается, что в каждой ячейке все параметры состояния равномерно распределены по ее объему. Содержание частиц j -й фракции в ячейках представлено вектором-столбцом $S_j = \{S_{ji}\}$, где S_{ji} – содержание частиц фракции j в i -й ячейке. Эволюция состояния процесса рассматривается в фиксированные моменты времени $t_k = (k-1) \Delta t$, где Δt – продолжительность, а k – номер временного перехода. В течение k -го перехода вектор состояния S_j^k меняется и переходит в S_j^{k+1} . Оба вектора связаны рекуррентным матричным равенством

$$S_j^{k+1} = P_j(S_j^k)S_j^k, \quad (1)$$

где P_j – матрица переходных вероятностей для j -й фракции, контролирующая переходы между ячейками и являющаяся основным оператором модели. В рассматриваемом процессе она зависит от текущих векторов состояния для всех фракций, т. е. модель является нелинейной. Конвективные переходы связаны с детерминированным переносом частиц восходящим потоком воздуха, скорость которого в каждой ячейке зависит от содержания в ней частиц, загромождающих проходное сечение реактора. Более подробно процедура построения матриц переходных вероятностей была рассмотрена в [5]. При наличии межфазного теплообмена между газом и частицам необходимо усложнить расчетную схему процесса, введя еще одну параллельную цепь ячеек – для описания восходящего движения газа. Таким образом, предлагаемая схема расчета межфазного теплообмена в псевдооживленном слое будет выглядеть, как на рис. 1. Она состоит из двух параллельных цепей ячеек: одна – для частиц, а другая – для газа. При наличии межфазного теплообмена между сходственными ячейками цепей происходит поперечная передача порции теплоты ΔQ_j . Вместе с тем вдоль каждой цепи происходит продольный перенос теплоты: частицами (цепь ячеек слева) и газом (цепь справа).

Распределение температуры в цепях описывается векторами температур T_p и T_g , векторы текущих запасов теплоты в ячейках рассчитываются как $Q_p = c_p S_p \cdot T_p$; $Q_g = c_g S_g \cdot T_g$, где c_p и c_g –

теплоемкости частиц и газа; S_p и S_g – содержания частиц и газа в ячейках, в общем случае переменные по высоте слоя; символ «*» означает поэлементное умножение векторов. Эволюция теплового состояния цепей описывается рекуррентными матричными равенствами:

$$Q_p^{N+1} = P_p^N(Q_p^N + \alpha_* \cdot F_* \cdot (T_g^N - T_p^N)); \quad (2)$$

$$Q_g^{N+1} = P_g^N(Q_g^N - \alpha_* \cdot F_* \cdot (T_g^N - T_p^N) + Q_{gf}), \quad (3)$$

где Q_{gf} – вектор подачи теплоты с входящим газом при его температуре T_{g0} , имеющий один ненулевой элемент $G_g T_{g0} c_g \Delta t$ для первой ячейки. Матрицы P_p^N и P_g^N описывают продольное перемещение частиц, газа и их теплоты вдоль цепей.

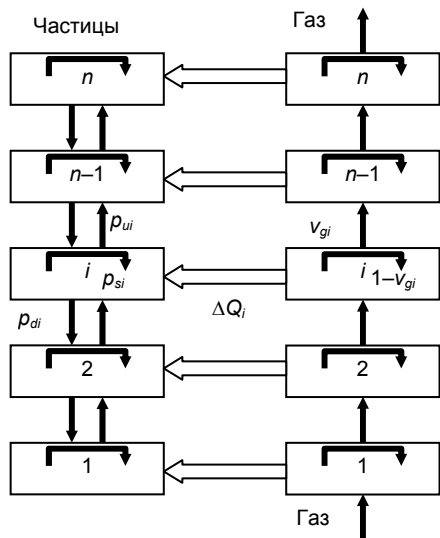


Рис. 1. Расчетная схема процесса

Рис. 2–4 иллюстрируют пример моделирования прогрева бинарной смеси частиц в цилиндрическом псевдооживленном слое. На рис. 2 показано распределение содержания зернистого материала по высоте аппарата (коническая часть – 10 ячеек, цилиндрическая – 5 ячеек, высота ячейки $\Delta x = 5$ мм). Ожижаемая смесь (1/1 по массе) собрана из частиц с одинаковыми физическими свойствами, но разной крупности. Распределение содержания частиц по высоте слоя обнаруживает значительную неоднородность: крупные частицы преимущественно располагаются в нижней конической части слоя, а мелкая фракция – в верхней. Традиционные марковские модели предполагают диффузионные переходы частиц только в соседние ячейки. В предлагаемой модели разрешены переходы в любые ячейки слоя, но вероятность миграций частиц в более удаленные ячейки убывает по нормальному закону в зависимости от дальности заброса.

Такое допущение, как было показано в [5], лучше соответствует ситуации в псевдооживленном слое и объясняет наличие некоторого количества частиц любой фракции на произвольной высоте.

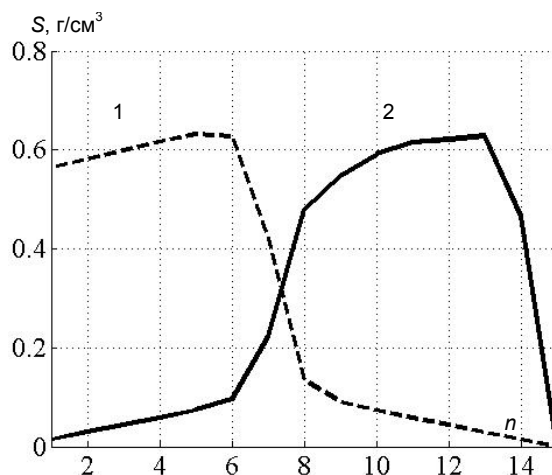


Рис. 2. Распределение содержания твердой фазы по высоте кипящего слоя: 1 – $d_1 = 5$ мм; 2 – $d_2 = 2$ мм

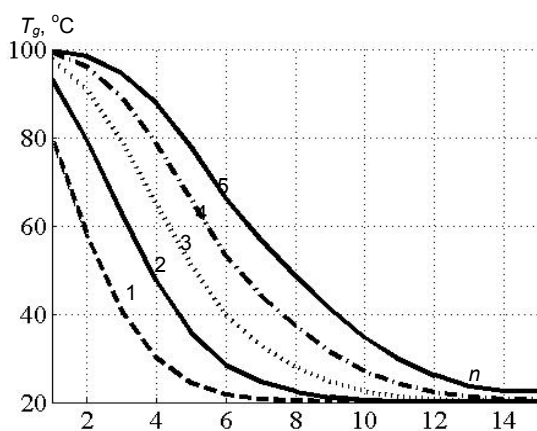


Рис. 3. Температурный профиль для газа в различные моменты времени: 1 – через 3 с; 2 – через 6 с; 3 – через 9 с; 4 – через 12 с; 5 – через 15 с

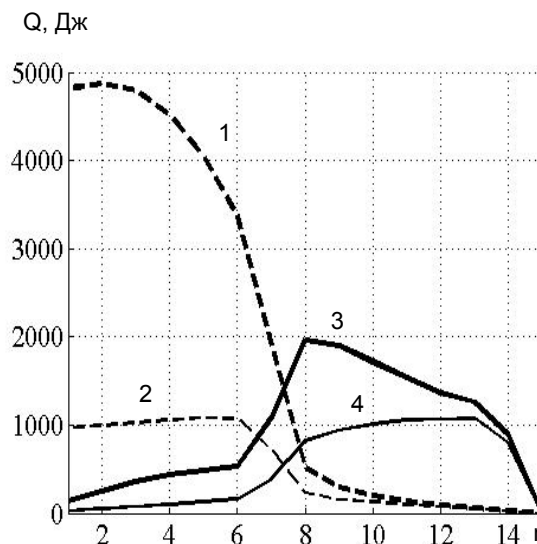


Рис. 4. Теплосодержание частиц твердой фазы через 15 с после начала нагрева: 1 и 2 – текущее и начальное теплосодержание для частиц первой фракции; 3 и 4 – текущее и начальное теплосодержание для частиц второй фракции

На рис. 3 показан профиль температуры оживающего агента в разные моменты времени после начала нагрева. Заметно быстрое выравни-

вание температуры газа и появление характерного крутого температурного профиля (линия 1), который со временем сдвигается вправо, так как растет высота активной зоны теплообмена. При этом (рис. 2, 3) в активной зоне теплообмена преимущественно содержатся крупные частицы, поэтому их теплосодержание изменяется намного быстрее (рис. 4). В то время как теплообмен между газом и частицами тяжелой фракции закончился в первой ячейке, легкая фракция только начала прогреться.

Таким образом, расчетная картина изменения температуры оживающего агента находится в хорошем качественном соответствии с физическими представлениями о теплообмене в кипящем слое, а возможность прогнозирования распределения твердой фазы по высоте слоя определяет эвристическую эффективность предлагаемой модели.

Список литературы

1. **Конструкция** и расчет котлов и котельных установок: учеб. для техникумов по специальности «Котлостроение» / В.А. Двойнишников, Л.В. Деев, М.А. Изюмов. – М.: Машиностроение, 1988. – 264 с.

2. **Расчеты** аппаратов кипящего слоя: справочник / под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.

Митрофанов Андрей Васильевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
ассистент кафедры прикладной математики,
e-mail: and2mit@mail.ru

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

Магницкий Валерий Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доцент кафедры математики,
e-mail: magnus.val@mail.ru

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

Berthiaux Henri,
Ecole des Mines d'Albi-Carmaux
Prof., Dr.-Eng.
e-mail: berthiau@enstimac.fr

3. **Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б.** Основы техники псевдооживления. – М.: Химия, 1967. – 664 с.

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. **Расчетно-экспериментальное исследование** распределения твердых частиц в аппарате с двухмерным псевдооживленным слоем / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов и др. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52. – Вып. 11. – С. 131–134.

References

1. Dvoynishnikov, V.A., Deev, L.V., Izyumov, M.A. *Konstruktsiya i raschet kotlov i kotel'nykh ustanovok* [Construction and calculation of boilers and boiler plants]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 264 p.

2. Mukhlenova, I.P., Sazhina, B.S., Frolova, V.F. *Raschetnyy apparatov kipyashchego sloya* [Calculation of boiling bed apparatus]. Leningrad, Khimiya, 1986. 352 p.

3. Gel'perin, N.I., Aynshteyn, V.G., Kvasha, V.B. *Osnovy tekhniki psevdoozhivleniya* [Fluidization technique basis]. Moscow, Khimiya, 1967. 664 p.

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. Ogurtsov, A.V., Mitrofanov, A.V., Mizonov, V.E. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2009, vol. 52, issue 11, pp. 13