

МЕХАНИКА И ТЕПЛОБМЕН АНСАМБЛЯ ЧАСТИЦ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

В.Е. МИЗОНОВ, Л.Н. ОВЧИННИКОВ, доктора техн. наук, А.В. ОГУРЦОВ, канд. техн. наук,
А.В. МИТРОФАНОВ, асп., К. TANNOUS, Dr.-Eng.

Предложена математическая модель и выполнено экспериментальное исследование механики и теплообмена ансамбля частиц в псевдоожигенном слое. Модель основана на теории цепей Маркова, для которой подобраны эмпирические зависимости для расчета коэффициентов переноса. Во всех случаях достигается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных, это позволяет сделать вывод, что предложенная математическая модель может быть использована как метод расчета параметров псевдоожигения.

Ключевые слова: ансамбль частиц, псевдоожигение, вектор состояния, переходная матрица, теплообмен, экспериментальное распределение температуры.

MECHANICS AND HEAT EXCHANGE OF PARTICLE ENSEMBLE IN FLUIDIZED BED

V.E. MIZONOV, Doctor of Engineering, L.N. OVCHINNIKOV, Doctor of Engineering,
A.V. OGURTSOV, Candidate of Engineering, A.V. MITROFANOV, Post Graduate Student,
K. TANNOUS, Doctor of Engineering,

The article presents a new mathematical model and experimental study of mechanics heat transfer in a particle ensemble in fluidized bed. The model is based on the theory of Markov's chains, for which appropriate correlations to calculate transfer coefficients are selected. In all cases comparison of model predictions with experimental results is made, it allows us to conclude that the model can be used as a computational method to calculate fluidization.

Key words: particle ensemble, fluidization, state vector, transition matrix, heat exchange, experimental temperature distribution.

Технологические процессы, реализуемые в псевдоожигенном слое, часто сопровождаются теплообменом между твердыми частицами и ожигающим агентом. И хотя только в ряде случаев назначение самого процесса сводится к теплообмену (например, охлаждение твердого материала после выхода из реакционной камеры), проблема отвода или подвода теплоты к твердым частицам имеет большое значение для осуществления всех типов процесса [1].

Феноменологически теплообмен между ожигающим газом и частицами твердого материала описывается уравнением [1]

$$q = \alpha \cdot F \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от ожигающего агента к твердой частице (или наоборот); F – поверхность теплообмена (поверхность твердых частиц); ΔT – разность температур ожигающего агента и твердых частиц; q – количество теплоты, переданное в единицу времени от ожигающего агента к твердым частицам (или наоборот).

На практике же использовать уравнение (1) оказывается затруднительным. Если при расчете простейших поверхностных теплообменников трудность представляет лишь определение коэффициента теплообмена, то в псевдоожигенном слое из-за неравномерности распределения потока ожигающей среды между частицами возникают затруднения и с определением величины температурного напора, а в ряде случаев и поверхности

теплообмена. Это связано с тем, что поверхность теплообмена, величина коэффициента теплоотдачи и разность температур ожигающего агента и твердых частиц определяются локальными характеристиками движения твердой фазы.

Псевдоожигенный слой зачастую является структурно неоднородным, поэтому в каждом малом его объеме в общем случае содержится разное количество частиц и создается свой режим обтекания этих частиц потоком ожигающего агента (причем эти явления взаимно определяют друг друга). Коэффициент теплоотдачи тоже нельзя считать константой для всего слоя, так как он определяется режимом движения жидкости в каждом микрообъеме слоя. В общем случае с уменьшением объемной концентрации частиц твердой фазы коэффициент теплообмена снижается до величины, характерной для чистого потока ожигающей среды.

Однако, в связи с недостаточной изученностью гидромеханических параметров псевдоожигения, при инженерных расчетах делается далеко идущее допущение, что по высоте слоя объемная концентрация твердой фазы постоянна, а значит, постоянна и интенсивность теплоотдачи.

Ранее нами была предложена математическая модель, описывающая поведение твердых частиц в восходящем потоке газа с учетом стесненности обтекания частиц в слое и их взаимодействия друг с другом [2]. 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. Результаты численного и натурального экспериментов показали неравномерность распределения концентраций и скоростей частиц по высоте аппарата в установившемся режиме работы. Учет этой неравномерности необходим для более высокой степени достоверности расчетов тепломассообменных процессов в псевдооживленном слое.

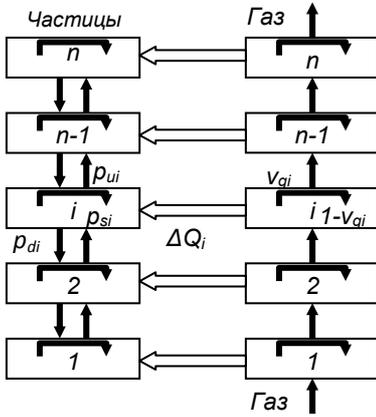


Рис. 1. Расчетная схема процесса

Предлагаемая схема расчета процесса теплообмена между потоком оживающего агента и частицами твердой фазы показана на рис. 1.

Она состоит из двух параллельных цепей ячеек: одна – для частиц, а другая – для газа. Перемещение частиц рассматривается через малые конечные промежутки времени Δt .

Текущее состояние процесса представлено вектором-столбцом S_p , состоящим из содержания материала в каждой ячейке. В течение N -го перехода состояние S_p^N переходит в состояние S_p^{N+1} , причем эволюция состояния описывается рекуррентным матричным равенством

$$S_p^{N+1} = P_p^N S_p^N, \quad (2)$$

где N – номер перехода; P_p^N – матрица переходных вероятностей для частиц материала, механизм формирования которой подробно изложен в работе [2].

При наличии теплообмена между газом и частицами происходит поперечная теплопередача между сходственными ячейками цепей и продольный перенос теплоты вместе с частицами и газом вдоль соответствующих цепей. Распределение температуры вдоль цепей может быть описано векторами температур T_p и T_g , а векторы текущих запасов теплоты в ячейках рассчитаны 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, связывающими последовательные состояния цепей через промежутки времени Δt :

$$Q_p^{N+1} = P_p^N (Q_p^N + \alpha \cdot F \cdot (T_g^N - T_p^N)), \quad (3)$$

$$Q_g^{N+1} = P_g^N (Q_g^N - \alpha \cdot F \cdot (T_g^N - T_p^N) + Q_{gf}), \quad (4)$$

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 и газа и их теплоты вдоль цепей. В матрице P_p^N содержатся вероятности переходов в течение Δt из данной ячейки во все другие ячейки цепи, в матрице P_g^N – доли газа, переносимого в течение этого времени в соседние по ходу ячейки.

Поскольку равенства (3), (4) отражают очевидные уравнения баланса, то получаемые по ним решения всегда будут правдоподобными. Количественная же достоверность расчетных прогнозов напрямую зависит от достоверности определения коэффициентов теплоотдачи в ячейках, которые меняются по высоте слоя.

Для выбора подходящей расчетной зависимости необходимы экспериментальные данные, представляющие именно локальную кинетику прогрева частиц в псевдооживленном слое. В этой связи нами были выполнены экспериментальные исследования на лабораторной установке (рис. 2), состоящей из воздухоудвки (1), подававшей воздух через калорифер 2 в цилиндрический аппарат с псевдооживленным слоем 3. Предварительно аппарат путем подачи нагретого воздуха прогревался до установившейся температуры. Затем на решетку мгновенно засыпалась навеска карбамида 300 г с фракциями 2–3 мм и начиналось измерение температуры газа с интервалом 20 с термопарами, расположенными на высоте 10, 50 и 75 мм над решеткой.

Высота слоя материала при отсутствии по-

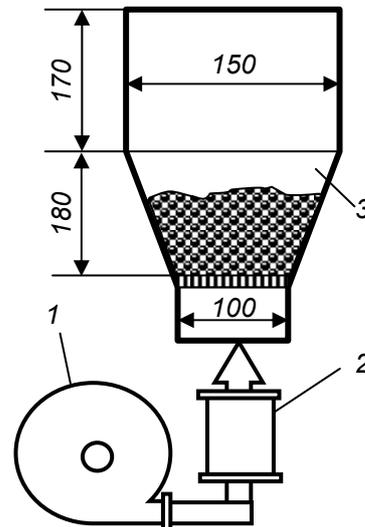


Рис. 2. Схема и основные размеры экспериментальной установки

дачи воздуха составляла 45 мм, а во взвешенном состоянии – 75 мм, то есть последняя термопара находилась фактически на верхней границе слоя в его рабочем состоянии. Замеры температуры продолжались до полной стабилизации температуры слоя, равной температуре подаваемого подогретого до 95°C воздуха.

Результаты расчетного и экспериментального исследований переходного процесса прогрева слоя при различных зависимостях для расчета коэффициента теплообмена показаны на рис. 3–5, где линии соответствуют расчетной кинетике прогрева, а точки – экспериментальным данным.

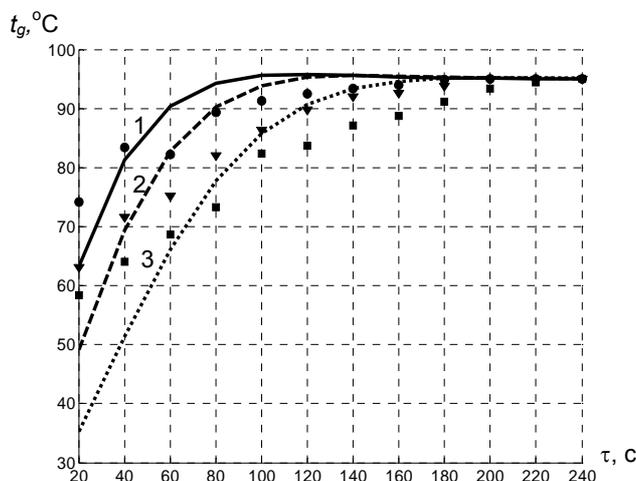


Рис. 3. Изменение температуры воздуха в различных сечениях слоя: 1 – 10 мм; 2 – 50 мм; 3 – 75 мм ($Nu = 0,4 \cdot (Re/\varepsilon)^{2/3} Pr^{1/3}$ [3])

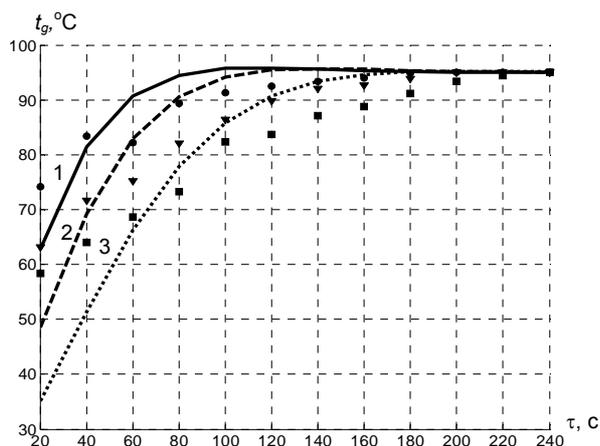


Рис. 4. Изменение температуры воздуха в различных сечениях слоя: 1 – 10 мм; 2 – 50 мм; 3 – 75 мм (формула А.В. Четчина $Nu=0,123 \cdot Re^{0,83}$ [3])

После засыпки навески в нагретый газ его температура из-за теплоотдачи к материалу резко снижается, причем снижение выше в верхней части слоя, так как туда поступает уже охлажденный в нижней части слоя газ. Постепенно все температуры повышаются, стремясь к температуре подаваемого нагретого газа, что естественно при имевшейся хорошей теплоизоляции аппарата.

Ключевым вопросом согласования расчетных и экспериментальных данных является выбор эмпирической зависимости для вычисления критерия Нуссельта ($Nu = \alpha \delta / \lambda$; δ – средний диаметр ожижаемой фракции; λ – коэффициент теплопроводности), который необходим для расчета коэффициента теплоотдачи от газа к частицам α . Принципиально важно, что эти зависимости были взяты из независимых от модели экспериментальных результатов.

При этом критерий Рейнольдса $Re = w\delta/\nu$ рассчитывался не для всего слоя, как это принято при традиционных расчетах [3], а для каждой ячейки отдельно (w – локальная скорость обтекания частиц ожижающим газом, разная в разных ячейках слоя; ν – коэффициент кинематической вязкости газа).

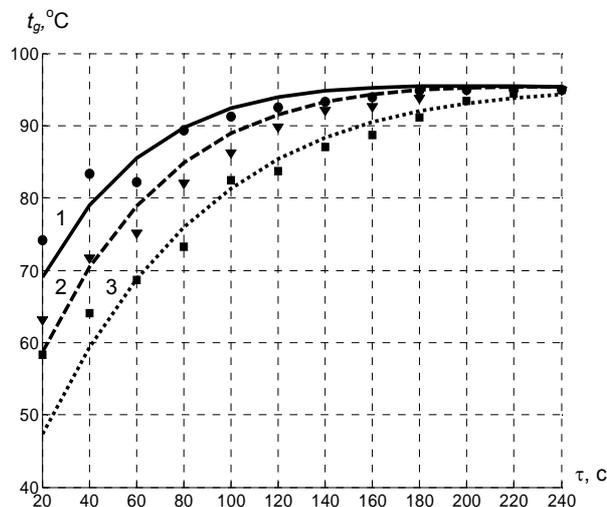


Рис. 5. Изменение температуры воздуха в различных сечениях слоя: 1 – 10 мм; 2 – 50 мм; 3 – 75 мм ($Nu = 0,018 Re^{0,991}$ [4])

Согласно полученным результатам (рис. 3–5), все используемые эмпирические зависимости для расчета критерия Нуссельта позволили в количественном отношении довольно точно смоделировать кинетику теплообмена частиц с ожижающим агентом.

Однако наибольшее соответствие расчетных и экспериментальных данных достигается при использовании эмпирической зависимости, полученной в работе [4].

Таким образом, предложенная нами ранее математическая модель [2] и эмпирическая зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи [4], с одной стороны, являются независимыми, а с другой – обеспечивают хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных, а поэтому может быть рассмотрена как достоверная научная основа компьютерного метода расчета псевдооживленного слоя.

Список литературы

1. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
2. Митрофанов, А.В., Мизонов В.Е., Огурцов А.В., Tannous К. Расчетно-экспериментальное исследование аппарата с двумерным псевдооживленным слоем // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 3. – С. 20–22.
3. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник / под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
4. Овчинников Л.Н. Моделирование процесса сушки минеральных удобрений во взвешенном слое // Изв. вузов «Химия и химич. технология». – 2009. – Т. 52. – Вып. 7. – С. 122–124.

Мизонов Вадим Евгеньевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-06.

Овчинников Лев Николаевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,
доктор технических наук, профессор кафедры процессов и аппаратов химической технологии,
телефон (4932) 38-22-18.

Огурцов Антон Валерьевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-06.

Митрофанов Андрей Васильевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-06.

Katia Tannous,
Университет г. Кампинас,
профессор кафедры химической инженерии, доктор технических наук,
katia@feq.unicamp.br