

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 66.096.5

Андрей Васильевич Митрофанов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45; ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», научный сотрудник кафедры высшей и прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 32-72-26, e-mail: and2mit@mail.ru

Вадим Евгеньевич Мизонов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45; e-mail: mizonov46@mail.ru

Антон Николаевич Беляков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

Наталья Сергеевна Шпейнова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: shpejnova@mail.ru

Разработка вероятностно-статистической модели расширения и аксиальной структуры псевдооживленного слоя частиц антрацита¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. На многих стадиях приготовления и переработки дисперсного топлива частицы материала находятся в режиме псевдооживления. Для характеристики механического контакта между потоком воздуха и одиночной частицей используется эффективный коэффициент ее сопротивления C_d . Величина эффективного коэффициента зависит не только от силы гидравлического сопротивления, но и учитывает влияние некоторого набора других сил. Указанный набор сил достаточно условен, поэтому в литературе для расчета коэффициента эффективного сопротивления можно встретить множество эмпирических зависимостей. Выбор подходящей зависимости является часто затруднительным, кроме того, он требует решения задачи об учете стесненного обтекания частицы. В связи с этим сравнительное исследование использования наиболее известных зависимостей для коэффициента сопротивления на основе единого метода учета стесненности потока является актуальным.

Материалы и методы. В качестве математической основы моделирования стесненного движения материала в псевдооживленном слое используется теория цепей Маркова. Выполнена параметриче-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-08-00028.

The research is carried out with financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project №18-08-00028.

ская идентификация модели и переходные матрицы поставлены в соответствие с физическими параметрами массопотоков, что делает предлагаемую модель нелинейной. Результаты численных экспериментов получены с использованием двух эмпирических зависимостей для коэффициента сопротивления частиц.

Результаты. Предложена вероятностно-статистическая модель формирования объема и аксиальной структуры псевдооживленного слоя. Выполнен анализ двух сценариев формирования псевдооживленного слоя при использовании различных эмпирических зависимостей для коэффициента сопротивления частиц. На основе теории цепей Маркова разработана и апробирована модель для описания формирования объема и аксиальной структуры псевдооживленного слоя. Показана недостаточная однозначность физических моделей для определения коэффициента сопротивления частицы в стесненном потоке.

Выводы. Проведенные исследования подтвердили, что качественно непротиворечивое описание структурной неоднородности псевдооживленного слоя возможно с использованием нелинейных математических моделей, основанных на мезомасштабном уровне декомпозиции объекта. Прогностическая эффективность подобных моделей лимитируется малой надежностью зависимостей для расчета коэффициента сопротивления одиночной частицы. Можно констатировать высокую актуальность дальнейших сравнительных исследований в целях проверки различных зависимостей для расчета коэффициентов сопротивления газ-частица с точки зрения обеспечения ими надежного прогноза высоты псевдооживленных слоев.

Ключевые слова: кипящий слой, вектор состояния, переходная матрица, скорость витания частицы, твердое топливо

Andrey Vasilyevich Mitrofanov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45; Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Research Scientist of High and Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 32-72-26, e-mail: and2mit@mail.ru

Vadim Evgenievich Mizonov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: mizonov46@mail.ru

Anton Nikolaevich Belyakov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

Natalia Sergeevna Shpeynova

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate student of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: shpejnova@mail.ru

Development of stochastic model of particulate coal fluidized bed expansion and axial structure

Abstract

Background. Particulate solids are in the state of fluidization at many stages of preparation and treatment of solid fuels. An effective drag force coefficient C_d is used to describe a mechanical contact between gas stream and an individual particle. The evaluation of the effective drag force coefficient is not limited by the force of hydraulic resistance but also includes a set of different forces. This set of forces is rather indeterminate, and a lot of empirical equations for effective drag force coefficient calculations can be found in the scientific papers. Choosing the applicable formula for calculation is often difficult. In addition, it requires taking into account the flow patterns around an individual particle. Thus, a comparative study to examine the most well-known drag force models with a uniform approach to account the flow patterns around an individual particle is important.

Materials and methods. The Markov chain approach is used as a mathematical basis for modeling of the flow patterns in a fluidized bed. The identification of the model parameters is completed and the complementation of transition matrices with the current physical properties of substances involved into the flow makes the model non-linear. The comparative study of the results obtained with using of the two correlations for drag force coefficient is performed.

Results. The stochastic model of fluidized bed expansion and axial structure has been proposed. The comparative analysis of two different scenarios of fluidized bed expansion using different drag force models

has been performed. The authors developed and tested the model to describe fluidized bed expansion and axial structure on the basis of the Markov chain approach. The low certainty of physical drag coefficients models under conditions of flow patterns around an individual particle has been shown.

Conclusions. The conducted research proves that consistent description of structure inhomogeneity of fluidized bed is possible using the nonlinear mathematical models based on mesoscale level of the object decomposition. Predictive efficiency of similar models is limited by low reliability of formula for calculation of drag force coefficient. Thus, it is possible to state the importance of further comparative research to check different formulas for calculation of gas-particle drag force coefficient in order to provide a reliable forecast of the fluidized bed height.

Key words: fluidized bed, state vector, transition matrix, particle settling velocity, solid fuel

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.068-076

Введение. Выработка электроэнергии и тепла в Российской Федерации в значительной мере осуществляется за счет природного газа (его доля в топливно-энергетическом балансе (ТЭБ) сохраняется на уровне порядка 50 % [1–2]). Подобная ситуация не может быть названа удовлетворительной в связи с тем, что, во-первых, природный газ является ценным ресурсом для химической технологии, во-вторых, стратегически значимым ресурсом, влияющим на финансово-экономические параметры внешнеэкономической деятельности страны. Планируемое снижение объемов потребления природного газа для удовлетворения энергетических нужд на внутреннем рынке закреплено в государственной программе «Энергетическая стратегия России до 2035 года» и предполагает расширение ее твердотопливной ниши и диверсификацию энергетики [2]. Вместе с тем продолжительность эксплуатации большей части функционирующих твердотопливных котлов (порядка 90 %) превысила 30 лет [3], что свидетельствует об их физическом и моральном устаревании. Опыт освоения новых котельных установок, использующих активные гидродинамические режимы контактирования частиц топлива с несущей средой (газом), показывает, что трудности во многом сопряжены с непригодностью существующих методик расчета, которые имеют крайне низкую прогнозирующую эффективность [3–5]. Последняя проблема особенно актуальна для расчетов котлоагрегатов пылеугольных энергоблоков, использующих технику псевдооживления дисперсного топлива [4–5].

В то же время необходимо подчеркнуть, что подобная аппаратура представляет собой сложные открытые диссипативные системы с набором обратных связей, успех описания которых должен базиро-

ваться на построении адекватных физико-математических моделей входящих в них подсистем [5–7]. В отношении аппаратов с активными гидродинамическими режимами одной из базовых подсистем является гидромеханика реакционной зоны, без надлежащего описания которой невозможен переход к моделированию технологического преобразования дисперсного топлива.

Параметры полей скоростей и концентраций частиц в потоке несущей среды могут быть описаны с использованием различных методологических подходов. В наиболее простом случае объект моделирования представляется как единое целое, а затем ищется эмпирическое или полуэмпирическое его описание. Такой подход имеет низкую информативность, но быстрое время расчета. Получаемые результаты пригодны для описания конкретного объекта. Противоположный вариант анализа объекта подразумевает рассмотрение объекта как совокупности всех индивидуальных частиц, участвующих в процессе (например, метод дискретных элементов в сочетании с методами вычислительной гидродинамики). Использование такого подхода дает высокую информативность, но исключительно большое время расчета, что делает его практически неприемлемым для оптимизации, когда необходимо сравнивать расчетные варианты. Кроме того, использование такого подхода к расчету требует идентификации большого числа параметров моделей, количественная оценка части которых представляется невыполнимой. Описанные подходы реализуют некоторые предельные варианты декомпозиции объекта, достоинства и недостатки использования этих подходов рассмотрены в ряде обобщающих работ [5–7].

Необходимо отметить, что при численной реализации даже подходы, бази-

рующиеся на рассмотрении бесконечно малого объема, фактически оперируют с некоторыми малыми, но конечными размерами. В то же время многие исследователи указывают на необходимость перехода к промежуточным уровням моделирования [8–10]. Необходимость построения моделей на основе промежуточного (мезоскопического) масштаба декомпозиции системы продиктована не только соображениями экономии машинных ресурсов (эта трудность с развитием вычислительной техники может быть устранена), но и (в большей степени) невозможностью идентификации значительного числа параметров моделей, основанных на более детальном описании процесса. Кроме того, предельная степень декомпозиции часто противоречит качественному состоянию объекта (например, введение в рассмотрение представительного объема, который меньше размера частицы, противоречит физической природе взаимодействия газ–частица).

Для характеристики механического контакта между потоком воздуха и одиночной частицей используется эффективный коэффициент ее сопротивления C_d . Величина эффективного коэффициента зависит не только от силы гидравлического сопротивления, но и учитывает влияние некоторого набора других сил. Указанный набор сил достаточно условен, поэтому в литературе для расчета коэффициента эффективного сопротивления можно встретить множество эмпирических зависимостей. Выбор подходящей зависимости является часто затруднительным, кроме того, он требует решения задачи об учете стесненного обтекания частицы.

В связи с этим представляется актуальным анализ сценарных вариантов физического взаимодействия газового потока со слоем сыпучего материала в рамках единого мезоскопического подхода к построению модели.

Материалы и методы. Вычислительная база построения модели основана на использовании математического аппарата теории цепей Маркова для описания изменения (до достижения установившегося состояния) состояния ансамбля частиц и воздушного потока. Рабочее пространство подъемной колонны аппарата представляется набором из счетного числа n представительных объемов (ячеек) с идеальным смешением свойств. Указанные ячейки

жестко связаны друг с другом и формируют цепь, которая характеризуется вектором состояния системы \mathbf{S} . Процесс движения фаз слоя рассматривается в рамках одномерной задачи, и каждая ячейка характеризуется конечным размером Δx . Параметры векторов состояний фиксируются только в дискретные моменты времени $t_k = (k - 1)\Delta t$, где Δt – промежуток времени между соседними состояниями системы (шаг по времени); k – номер временного шага.

Вероятности всех возможных миграций фаз слоя из данной ячейки вдоль цепи записывают в стохастический вектор, который, таким образом, содержит вероятности для полной группы событий. Стохастический вектор, содержащий вероятности, относящиеся к j -й ячейке цепи, записывается в j -й столбец переходной матрицы, которая, таким образом, содержит вероятности всех событий, определяющих состояние системы через промежуток времени Δt , и является основным оператором модели.

С учетом этого продольное перемещение твердой и несущей фаз описывается рекуррентными матричными равенствами:

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

$$\mathbf{S}_g^{k+1} = \mathbf{P}_g^k \mathbf{S}_g^k + \mathbf{S}_{gf}, \quad (2)$$

где \mathbf{S}_p и \mathbf{S}_g – векторы-столбцы объемного содержания частиц и агента сушки в ячейках соответственно; \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 поступления газа (при подаче через решетку он имеет единственный ненулевой элемент в первой ячейке, равный объему воздуха, подаваемому в нее за один временной переход).

В рассматриваемой модели для газовой фазы вводятся только вероятности перехода вперед (принята модель идеального вытеснения), поэтому переходная матрица формируется обычным для подобных моделей [9–10] образом и не описывается далее.

Для придания модели движения частиц по цепи прогностических возможностей необходимо поставить в соответствие элементам переходной матрицы \mathbf{P}_p физические параметры взаимодействия газ–частица. Движение в подъемной колонне аппарата обусловлено действием на частицу в вертикальном направлении сил тяжести, Архиме-

да, силы гидродинамического сопротивления, а также силы механического взаимодействия от столкновений с другими частицами. Относительно легко может быть идентифицирована только сила тяжести, сила Архимеда часто полагается малозначимой в процессах газ–твердое, так как плотность твердых частиц оказывается на несколько порядков больше, чем плотность газовой фазы [9–11].

Попытки строгого учета ударных взаимодействий формируют отдельное направление исследований в механике взвешенных потоков и подробно описаны в [6–7], однако возникающие при этом задачи не позволяют проводить однозначную идентификацию всех параметров контактного взаимодействия. В связи с этим случайные по своей природе контактные силы определяются нами в терминах макроdiffузии. При этом значения диффузионных вероятностей определяются по расчетной схеме, используемой ранее [9–11]. Указанная схема предполагает, что в произвольной ячейке коэффициент макроdiffузии частиц зависит от их концентрации, которая, в свою очередь, определяется локальной скоростью движения несущей среды w (индекс-номер ячейки не приводится):

$$D = \frac{H_{fb}}{H_0} \frac{(w - W_0)}{K_D}, \quad (3)$$

где H_{fb} и H_0 – высота слоя в псевдооживленном и рыхлонасыпанном состоянии соответственно (значение H_0 рассчитывается при известной насыпной плотности материала, H_{fb} в начальный момент времени равна H_0 , а для каждого следующего момента времени наблюдения рассчитывается с точностью, не превышающей размера ячейки, в соответствии с распределением материала вдоль цепи); W_0 – фиктивная (в свободном сечении аппарата) скорость несущей среды; K_D – эмпирический параметр модели, принятый равным 0,01.

Сила гидродинамического сопротивления, действующая на одиночную частицу, связана с ее весом P через соотношение [6–12]

$$P = C_d f_p \rho_g \frac{V_{si}^2}{2}, \quad (4)$$

где C_d – коэффициент сопротивления одиночной частицы; f_p – площадь наибольшего поперечного сечения одиночной частицы, перпендикулярного вектору скорости; ρ_g –

плотность оживающей среды; V_s – скорость витания одиночной частицы.

Скорость витания V_s является одной из основных материальных констант в расчетах взвешенных потоков, фактически она представляет собой скорость несущей среды, при которой частица в потоке пребывает в равновесии. В предлагаемой модели доли частиц, которые за время наблюдения Δt покидают или не покидают ячейку, зависят от того, какова разница между скоростью потока в данной ячейке и скоростью витания частицы. Расчетные построения иллюстрирует рис. 1.

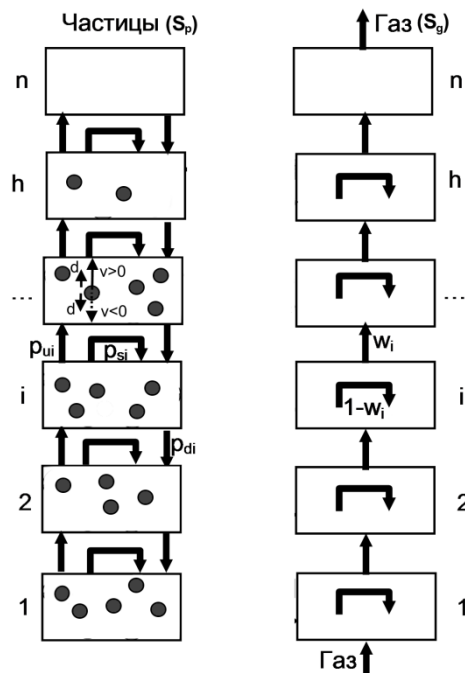


Рис. 1. Вычислительная схема модели периодического реактора с кипящим слоем

В рассмотрение введены вероятности перехода в соседнюю ячейку вниз (p_d), вверх (p_u) и вероятность остаться в наблюдаемой ячейке (p_s). Для i -й ячейки вероятности перемещения частиц p_{si} , p_{ui} и p_{di} , составляющие матрицу переходных вероятностей, связаны с параметрами процесса следующими соотношениями [9–11]:

$$p_{si} = 1 - p_{ui} - p_{di}; \quad (5)$$

$$p_{di} = d_i \text{ при } (w_i - V_{si}) > 0; \quad (6)$$

$$p_{di} = v_i + d_i \text{ при } (w_i - V_{si}) < 0; \quad (7)$$

$$p_{ui} = v_i + d_i \text{ при } (w_i - V_{si}) > 0; \quad (8)$$

$$p_{ui} = d_i \text{ при } (w_i - V_{si}) < 0, \quad (9)$$

где d – вероятность симметричных миграций из ячейки (диффузионная вероят-

ность), вводимая для учета влияния случайных факторов, обусловленных столкновениями частиц [9–11], связанная с коэффициентом макроdiffузии D через соотношение

$$d = D\Delta t/\Delta x^2; \quad (10)$$

v – вероятность несимметричных миграций частиц из ячейки (конвективная вероятность), связанная с параметрами процесса как:

$$v = (w_i - V_{si})\Delta t/\Delta x, \quad (11)$$

Δx – высота ячейки.

Для идентификации V_s в настоящем исследовании использованы две зависимости, которые позволяют рассчитывать коэффициент сопротивления C_d как функцию числа Рейнольдса:

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0,173 \cdot Re^{0,657}) + \frac{0,413}{16300 \cdot Re^{-1,09}}; \quad (12)$$

$$C_d = (2,25 \cdot Re^{-0,31} + 0,36 \cdot Re^{0,06})^{0,45}, \quad (13)$$

где Re – число Рейнольдса по диаметру частицы и относительной скорости ее обтекания. Зависимость (12) предложена в [12] для диапазона $Re < 2,6 \cdot 10^5$, зависимость (13) предложена в [13] для диапазона $Re < 3 \cdot 10^5$.

Зависимости (12)–(13) определяют параметры конвективного переноса твердой фазы вдоль цепи, при этом аэродинамические параметры частиц зависят не только от характерного размера зерен (диаметра), но и от режима фильтрации несжимаемой несущей среды, локальная скорость которой рассчитывается с учетом уменьшения живого сечения потока в ячейке в результате присутствия там частиц [9–11]:

$$w = \frac{W_0}{1 - \pi \left(\frac{C}{8 \cdot C_{\max}} \right)^{2/3}}, \quad (14)$$

где C и C_{\max} – текущее и максимальное (в плотном слое) значения объемной концентрации частиц в ячейке (индекс не приводится).

Зависимости (1)–(14) можно рассматривать как замкнутую в параметрическом отношении модель псевдооживления в холодном реакторе псевдооживленного слоя периодического принципа действия. В качестве модельного материала была использована навеска (5 кг) отсева антрацита (монофракция) с диаметром зерен $d_p = 6$ мм, истинной плотностью материала 1650 кг/м^3

и порозностью в рыхлонасыпанном состоянии 0,5. Численному анализу подвергнут сценарий оживления навески материала в цилиндрической колонне высотой 2 м с внутренним диаметром 0,1 м.

Результаты. На рис. 2, 3 показаны базовые сценарии формирования объема и распределения концентрации частиц по высоте колонны. В процессе псевдооживления свободная поверхность слоя испытывает колебания, характер которых зависит от режима движения несущей среды и свойств сыпучих частиц [6, 10]. В [9–11] показано, что расширение слоя, определяемое как среднее между максимальным и минимальным положениями свободной поверхности, может быть рассчитано с использованием чисто конвективной модели (без учета диффузионных вероятностей). При проведении численного эксперимента с использованием единого подхода к решению задачи описания обтекания одиночной частицы высота слоя зависит только от значения коэффициента сопротивления. Анализ результатов (рис. 2) показывает, что использование для идентификации предложенной ячейной модели полуэмпирических зависимостей (12) и (13) приводит к получению сильно разнящихся результатов. Расчетные значения высоты псевдооживленного слоя отличаются на 43 %.

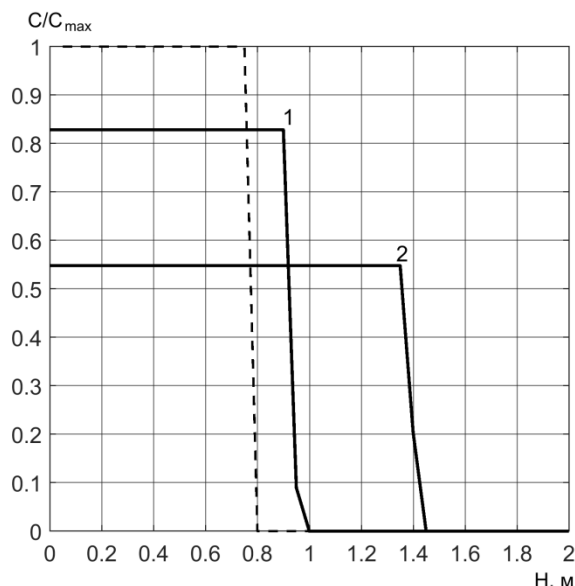


Рис. 2. Распределения относительного содержания твердой фазы по высоте аппарата, полученные при расчете по конвективной модели (при $d = 0$): пунктирная линия – плотный слой; сплошная линия – псевдооживленный слой (1 – при использовании зависимости (12); 2 – при использовании зависимости (13))

Графики относительного содержания твердой фазы по высоте слоя, представленные на рис. 1, в качественном отношении не соответствуют современным представлениям о структуре псевдооживленного слоя. Принято выделять нижнюю зону с относительно равномерной и высокой концентрацией частиц (плотная фаза слоя) и разбавленную фазу, в которой средняя концентрация ниже, а ее распределение характеризуется монотонным убыванием [6–7, 9].

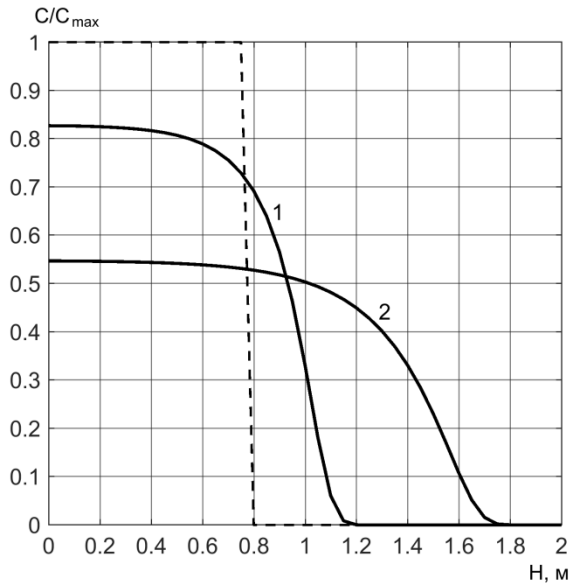


Рис. 3. Распределения относительного содержания твердой фазы по высоте аппарата, полученные при расчете по конвективно-диффузионной модели: пунктирная линия – плотный слой; сплошная линия – псевдооживленный слой (1 – при использовании зависимости (12); 2 – при использовании зависимости (13))

Параметром модели, который отвечает за формирование более качественно-непротиворечивого распределения, а также учитывает наличие колебаний свободной поверхности, является коэффициент макродиффузии. Распределения, полученные при $D > 0$, показаны на рис 2. В качественном отношении результаты становятся лучше при любой используемой зависимости для коэффициентов сопротивления. Однако расхождение по высоте, занимаемой слоем, увеличивается еще больше (до 48 %), что вполне закономерно, так как коэффициент макродиффузии в конечном счете пропорционален относительной высоте слоя (зависимость (3)).

На рис. 4, 5 показаны расчетные данные, детализирующие результаты рис. 2, 3, а также характеризующие предложенный ячеечный подход в целом.

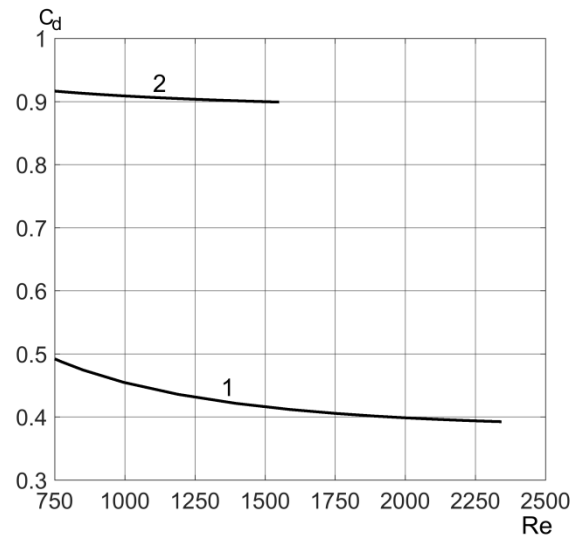


Рис. 4. Вид расчетных зависимостей $C_d(Re)$ для полученных численно сценариев псевдооживления: 1 – при использовании полупырического соотношения (12); 2 – при использовании полупырического соотношения (13)

На рис. 4 представлены значения коэффициентов сопротивления для исследованного гидродинамического режима. Следует отметить, что, несмотря на то, что расход воздуха имеет постоянное значение, скорости обтекания (и диапазон чисел Рейнольдса) оказываются разными, так как при использовании разных полупырических зависимостей $C_d(Re)$ слой занимает разный объем и внутри него формируются различные условия обтекания частиц.

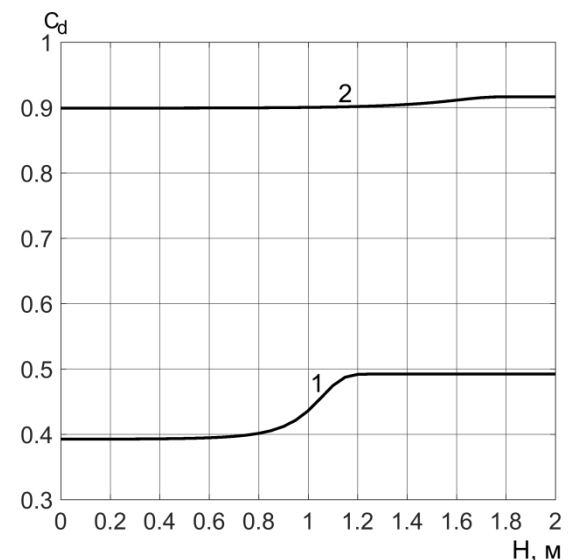


Рис. 5. Изменение значения C_d по высоте псевдооживленного слоя для полученных численно сценариев псевдооживления: 1 – при использовании полупырического соотношения (12); 2 – при использовании полупырического соотношения (13)

На рис. 5 показано распределение значений коэффициентов сопротивления по высоте колонны. Очевидно, что та гидромеханическая ситуация в слое, которая формируется при использовании зависимости (13), объясняется слабым (в сравнении с формулой (12)) влиянием значения аргумента Re на величину функции отклика C_d .

Выводы. Проведенные исследования подтвердили, что качественно непротиворечивое описание структурной неоднородности псевдооживленного слоя возможно с использованием нелинейных математических моделей, основанных на мезомасштабном уровне декомпозиции объекта. В то же время показано, что прогнозная эффективность подобных моделей в основном лимитируется малой надежностью зависимостей для расчета коэффициента сопротивления одиночной частицы, так как коэффициент макроdiffузии, который традиционно относится к трудно идентифицируемым параметрам движения дисперсных сред, имеет сравнительно малое влияние на расширение псевдооживленного слоя. Кроме того, величина коэффициента макроdiffузии зависит от концентрации частиц слоя, которая определяется, в свою очередь, принятой физической моделью трения газ–частица.

Таким образом, можно констатировать высокую актуальность дальнейших сравнительных исследований в целях проверки различных зависимостей для расчета коэффициентов сопротивления газ–частица с точки зрения обеспечения ими надежного прогноза высоты псевдооживленных слоев.

Список литературы

1. Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Заворин А.С. Твердое композитное топливо из низкосортного сырья // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 56–64.
2. Бушуев В.В., Безруких П.П. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года и ее приоритеты // Кабели и провода. – 2010. – № 3(322). – С. 10–13.
3. Опыт освоения современных котельных установок Российского производства / А.Н. Тугов, Г.А. Рябов, А.В. Штегман, М.Н. Майданик // Проблемы энергетике. – 2018. – Т. 20, № 7–8. – С. 87–98.
4. Инженерная методика и численные результаты расчетов топки котлоагрегата с циркулирующим кипящим слоем / А.Ю. Майст-

ренко, Б.Б. Рохамн, А.И. Топал и др. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 5. – С. 6–13.

5. **Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges** / S. De, A.K. Agarwal, V.S. Moholkar, T. Bhaskar. – Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018. – 521 p.

6. **Gidaspow D.** Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. – San Diego: Academic Press, 1994. – 467 p.

7. **Multiscale modeling of gas-fluidized beds** / M.A. van der Hoef, M. Ye, M. van Sint Annaland, et. al. // Advances in chemical engineering. – 2006. – Vol. 31. – P. 65–149.

8. **From Multiscale Modeling to Meso-Science** / J. Li, W. Ge, W. Wang, et. al. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – 484 p.

9. **Митрофанов А.В.** Математическая модель эволюции состояния слоя дисперсного топлива при нагреве и сушке в плотном и псевдооживленном слое // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 2. – С. 67–70.

10. **A Markov chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties** / A.V. Mitrofanov, V.E. Mizonov, K. Tannous, L.N. Ovchinnikov // Particulate Science and Technology. – 2018. – Vol. 36, No. 2. – P. 244–253.

11. **Митрофанов А.В., Касаткина Н.К., Рыжакова Я.С.** Расчетно-экспериментальное исследование влияния усадки материала на процесс его тепловой обработки в кипящем слое // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 5. – С. 49–54.

12. **Turton R., Levenspiel O.** A short note on the drag correlation for spheres // Powder Technol. – 1986. – Vol. 47. – P. 83–86.

13. **Khan A.R., Richardson J.F.** The Resistance to Motion of a Solid Sphere in a Fluid // Chem. Eng. Commun. – 1987. – Vol. 62. – P. 135–150.

References

1. Tabakaev, R.B., Kazakov, A.V., Zavorin, A.S. Tverdoe kompozitnoe toplivo iz nizkosortnogo syr'ya [Solid composite fuel of low-grade raw (technological aspect)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii v energetike*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 56–64. (in Russian)
2. Bushuev, V.V., Bezrukikh, P.P. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda i ee prioritety [The Energy Strategy of Russia until 2030 and its priority]. *Kabeli i provoda*, 2010, no. 3(322), pp. 10–13. (in Russian)
3. Tugov, A.N., Ryabov, G.A., Shtegman, A.V., Majdanik, M.N. Opyt osvoeniya sovremennykh kotel'nykh ustanovok Rossiyskogo proizvodstva [Development experience of modern boiler installations made in Russia]. *Problemy energetiki*, 2018, vol. 20, no. 7–8, pp. 87–98. (in Russian)
4. Maystrenko, A.Yu., Rokhamn, B.B., Topal, A.I., Vyfatnyuk, V.G., Chernyavskiy, N.V. In-

zhenernaya metodika i chislennye rezul'taty raschetov topki kotloagregata s tsirkuliruyushchim kipyashchim sloem [The Engineering Calculation Method and Numerical Results of Calculation of Circulating Fluidized Bed Boiler]. *Energo-tekhnologii i resursosberezhenie*, 2010, no. 5, pp. 6–13. (in Russian)

5. De, S., Agarwal, A.K., Moholkar, V.S., Bhaskar, T. Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018. 521 p.

6. Gidaspow, D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. San Diego: Academic Press, 1994. 467 p.

7. Van der Hoef, M.A., Ye, M., Annaland, M. van Sint, Andrews IV, A.T., Sundaresan, S., Kuipers, J.A.M. Multiscale modeling of gas-fluidized beds. *Advances in chemical engineering*, 2006, vol. 31, pp. 65–149.

8. Li, J., Ge, W., Wang, W., Yang, N., Liu, X., Wang, L., He, X., Wang, X., Wang, J., Kwauk, M. From Multiscale Modeling to Meso-Science. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 484 p.

9. Mitrofanov, A.V. Matematicheskaya model' evolyutsii sostoyaniya sloya dispersnogo

topliva pri nagreve i sushke v plotnom i psevdoozhizhennom sloe [Mathematical model of state evolution of dispersed fuel bed under heating and drying in a dense fluidized bed]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 2, pp. 67–70. (in Russian)

10. Mitrofanov, A.V., Mizonov, V.E., Tan-nous, K., Ovchinnikov, L.N. A Markov chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties. *Particulate Science and Technology*, 2018, vol. 36, no. 2, pp. 244–253.

11. Mitrofanov, A.V., Kasatkina, N.K., Ryzhakova, Ya.S. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie vliyaniya usadki materiala na protsess ego teplovoy obrabotki v kipyashchem sloe [Theoretical and experimental study of the influence of particle shrinkage on the thermal treatment of particulate solids in fluidized bed]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 5, pp. 49–54.

12. Turton, R., Levenspiel, O. A short note on the drag correlation for spheres. *Powder Technol*, 1986, vol. 47, pp. 83–86.

13. Khan, A.R., Richardson, J.F. The Resistance to Motion of a Solid Sphere in a Fluid. *Chem. Eng. Commun*, 1987, vol. 62, pp. 135–150.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 6

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ N 77-13527 от 20.09.02 г.

Подписано в печать 8.12.2020. Выход в свет 28.12.2020. Формат 60x84 ¹/₈.

Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 9,62. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Ивановский государственный энергетический университет, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Типография ООО «ПресСто», 153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, оф. 307.