

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-524-535>

УДК 676.056.521.3+662.818

Расчетно-экспериментальное исследование локальных характеристик процесса псевдооживления топливных гранул

А. Е. Карманов¹⁾, А. В. Митрофанов¹⁾, Е. В. Приходько¹⁾, С. В. Василевич²⁾,
Н. С. Шпейнова³⁾

¹⁾Торайгыров университет (Павлодар, Казахстан),

²⁾Белорусская государственная академия авиации (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Ивановский государственный энергетический университет (Иваново, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В настоящее время наблюдается тенденция к диверсификации генерации тепловой и электрической энергии и к совершенствованию твердотопливных технологий. Указанные тенденции актуализируют поиск математических инструментов для описания и прогнозирования работы аппаратов с псевдооживленным слоем дисперсных топливных материалов. Однако, поскольку механика гетерогенных сред (и дисперсных сред, в частности) в известной мере находится в стадии становления в отношении математических основ моделирования, прогнозирование работы аппаратуры часто затруднительно. В частности, низкое качество математического обеспечения не позволяет прогнозировать поля концентраций и скоростей фаз псевдооживленного слоя, хотя эти знания служат первоосновой для расчета тепло- и массообменных и химических процессов. В настоящей работе выполнено расчетное и экспериментальное исследование локальных гидромеханических характеристик монодисперсного псевдооживленного слоя. В качестве основы моделирования используется математический аппарат теории цепей Маркова. Задачи решаются в одномерной постановке, подразумевающей разбиение слоя по высоте на ячейки малых, но конечных размеров. Распределения фаз слоя описываются векторами состояний, эволюцию которых контролируют матрицы переходных вероятностей. Элементы этих матриц были поставлены в соответствие физическим параметрам процессов. Верификация модели выполнена путем сопоставления расчетных прогнозов с данными проведенного в рамках исследования натурального эксперимента, направленного на измерение локальных скоростей газовой фазы внутри псевдооживленного слоя. Данные эксперимента с хорошей для инженерных расчетов точностью были описаны предложенной физико-математической моделью, что позволяет рассматривать ее как достоверную научную основу компьютерного метода расчета котлоагрегатов, использующих технику псевдооживления.

Ключевые слова: псевдооживленный слой, твердое топливо, теория цепей Маркова, вектор состояния, переходная матрица, скорость витания частицы

Для цитирования: Расчетно-экспериментальное исследование локальных характеристик процесса псевдооживления топливных гранул / А. Е. Карманов [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 6. С. 524–535. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-524-535>

Адрес для переписки

Василевич Сергей Владимирович
Белорусская государственная академия авиации
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Address for correspondence

Vasilevich Siarhei V.
Belarusian State Academy of Aviation
77, Uborevich st.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Computational and Experimental Study of Local Characteristics of the Fluidization Process of Fuel Pellets

A. E. Karmanov¹⁾, A. V. Mitrofanov¹⁾, E. V. Prikhodko¹⁾, S. V. Vasilevich²⁾,
N. S. Shpeynova³⁾

¹⁾Toraighyrov University (Pavlodar, Kazakhstan),

²⁾Belarusian State Academy of Aviation (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Ivanovo State Power Engineering University (Ivanovo, Russian Federation)

Abstract. Currently, there is a tendency to diversify the generation of heat and electricity and to improve solid fuel technologies. These trends actualize the search for mathematical tools for describing and predicting the operation of apparatuses with a fluidized bed of dispersed fuel materials. However, since the mechanics of heterogeneous media (and dispersed media in particular) is to a certain extent in its infancy in relation to the mathematical foundations of modeling, it is often difficult to predict the operation of equipment. In particular, the poor quality of mathematical basis does not allow predicting the fields of concentrations and velocities of the phases of the fluidized bed, although this knowledge serves as the fundamental basis for calculating heat and mass transfer and chemical processes. In the present work, a computational and experimental study of the local hydromechanical characteristics of a monodisperse fluidized bed has been carried out. The mathematical apparatus of the theory of Markov chains was used as a basis for modeling. The tasks were solved in a one-dimensional formulation, which implied the division of the bed in height into cells of small but finite sizes. Fluidized bed phase distributions were described by state vectors whose evolution was controlled by transition probability matrices. The elements of these matrices were matched to the physical parameters of the processes. The model was verified by comparing the calculated predictions with the data of a full-scale experiment conducted as part of the study, aimed at measuring the local velocities of the gas phase inside the fluidized bed. The experimental data with a good accuracy for engineering calculations were described by the proposed model, which makes it possible to consider it as a reliable scientific basis for the computer method for calculating installations using the fluidization technique.

Keywords: fluidized bed, solid fuel, Markov chain theory, state vector, transition matrix, particle settling velocity

For citation: Karmanov A. E., Mitrofanov A. V., Prikhodko E. V., Vasilevich S. V., Shpeynova N. S. (2023) Computational and Experimental Study of Local Characteristics of the Fluidization Process of Fuel Pellets. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (6), 524–535. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-524-535> (in Russian)

Введение

На протяжении длительного времени топливно-энергетический баланс многих стран составлялся с учетом относительно низкой стоимости и высокой доступности жидкого и газообразного топлива, которым соответственно отдавалось предпочтение. С одной стороны, это обстоятельство выглядело логичным и способствовало технологическому росту, а с другой – значительно затормозило развитие твердотопливных технологий [1]. В настоящее время наблюдается тенденция к диверсификации производства энергии, поэтому во многих странах, в том числе России, Беларуси и Казахстане, четко обозначается интерес к развитию и совершенствованию твердотопливных технологий [2–4]. Указанные тенденции инициировали широкий спектр исследований, направленных на поиск рациональных форм термохимической переработки твердого топлива, ко-

которые регулярно обобщаются на уровне монографий [5–7]. Однако указанные работы в основном обобщают некоторый инженерный и конструкторский опыт, а методы расчета оборудования часто продолжают оставаться на стадии становления. В частности, в инженерных методиках определения параметров работы аппаратов с псевдооживленным слоем используются различные эмпирические зависимости для одного и того же параметра (критических скоростей псевдооживления, расширения слоя и его структуры) [5–6]. Таким образом, очевидна высокая неопределенность в отношении методов расчета работы котлоагрегатов с активными гидродинамическими режимами, которая делает актуальным поиск математических инструментов для описания и прогнозирования работы аппаратов с псевдооживленным слоем.

Достаточно традиционно расчетные методики параметров псевдооживленного слоя основываются на феноменологическом подходе, в рамках которого слой рассматривается как единое целое, а реальное распределение характеристик компенсируется введением различных эмпирических коэффициентов [8–9]. Такой вариант рассмотрения отличается низкой информативностью, а главное, не формирует единого подхода к описанию разнообразных форм псевдооживленного слоя, которые возникают из-за различия геометрии аппаратуры, режимов движения несущей среды, свойств сыпучих материалов [10]. Известно [11], что при воздействии волновых полей в сложных средах возрастают значения коэффициентов переноса. Физический механизм этого явления достаточно сложен, и до настоящего времени нет полной теории этого явления. Одним из механизмов, объясняющих явление возрастания коэффициентов переноса, является трансциляторный механизм [12]. Его суть заключается в увеличении потока за счет относительного смещения частиц среды, вызванного волновым полем. Трансциляторный теплоперенос относится к диффузионно-конвективным переносам, возникающим при колебательном относительном перемещении участков или частей среды. Теория явления трансциляторного переноса приводит к уравнениям в частных производных второго порядка с переменными коэффициентами [12].

Поиски достаточно универсальных математических инструментов для формирования единой стратегии описания в основном связаны с развитием методов вычислительной гидродинамики, которые позволяют рассматривать слой как двухфазную жидкость, одна из которых может существовать в виде дискретных элементов в другой [13–14]. Такой математический аппарат отличается высокой информативностью, однако требует оценки большого числа параметров модели, которые в условиях инженерной практики не могут быть идентифицированы. На переход к некоторым промежуточным степеням детализации при моделировании указывают многие авторы [15–17], поэтому в настоящей работе в качестве единой основы для моделирования состояния псевдооживленного слоя принят математический аппарат теории цепей Маркова, который достаточно широко внедряется для моделирования процессов в дисперсных средах [18–21].

Методы и результаты исследования

Методы теоретического исследования. Использование математического аппарата теории цепей Маркова подразумевает декомпозицию описываемой области на репрезентативные объемы (ячейки) малого, но конечного размера Δx . Рабочее пространство аппарата описывается как набор из счетного числа n ячеек идеального смешения, организованных в цепь. Расчетная схема предложенной модели представлена на рис. 1а и в целом основана на результатах предыдущих исследований [20–21].

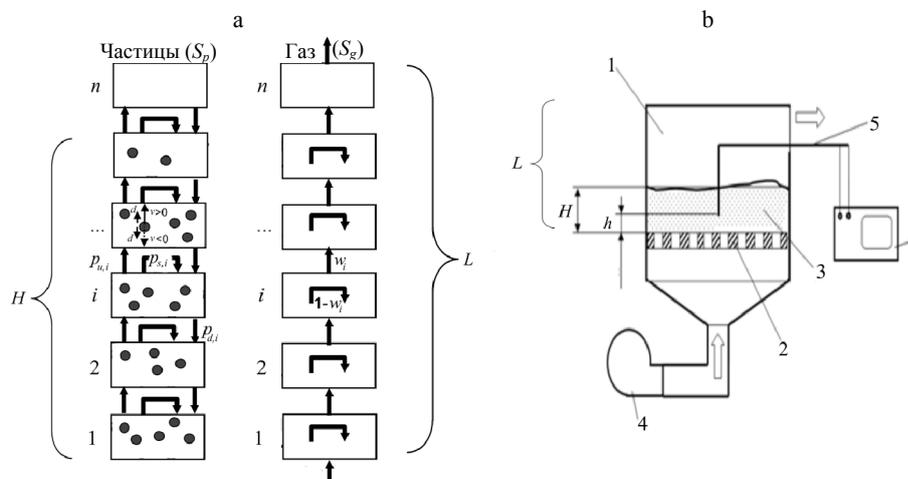


Рис. 1. а – расчетная схема моделирования движения фаз псевдоожиженного слоя; б – схема экспериментальной установки: 1 – корпус; 2 – распределительная решетка; 3 – сыпучий материал; 4 – воздуходувка; 5 – трубка Пито; 6 – дифференциальный манометр

Fig. 1. a – calculation scheme for modeling phases movement of a fluidized bed; б – scheme of the experimental setup: 1 – apparatus chamber; 2 – distribution grid; 3 – bulk material; 4 – blower; 5 – Pitot tube; 6 – differential pressure gauge

Движение фаз слоя (и связанных экстенсивных свойств) между отдельными ячейками цепи, которая описывает пространство аппарата, исследуется в рамках вероятностного подхода, математической базой которого является теория цепей марковских процессов с дискретным временем. Параметры векторов, характеризующих состояние псевдоожиженного слоя, рассчитываются для дискретных моментов времени $t_k = (k - 1)\Delta t$, с, где k – номер временного шага; Δt – шаг по времени, с.

Движение вдоль цепи твердой и газовой фаз описывается следующими рекуррентными матричными соотношениями, определяющими переход системы из одного состояния в другое вплоть до наступления асимптотических распределений [20–21]:

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

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

где $\mathbf{S}_p^k, \mathbf{S}_g^k$ – векторы-столбцы, характеризующие распределение массы твердой и газовой фаз в ячейках на k -й расчетной итерации, кг; $\mathbf{P}_p^k, \mathbf{P}_g^k$ – переходные матрицы для твердой и газовой фаз; \mathbf{S}_{gf} – вектор подачи оживающего агента (при поступлении несущей среды под газораспределительную решетку этот вектор содержит один ненулевой элемент, равный массе оживающего агента, поступающего в первую ячейку на каждом временном интервале Δt), кг.

Вероятности всех возможных миграций частиц и газа из рассматриваемой ячейки организованы в столбец переходной матрицы с соответствующим значениям индексом (первый столбец содержит вероятности переходов из первой ячейки и т. д.). Структура предлагаемой модели предполагает переходы только в соседние ячейки, поэтому в рассмотрение вводятся следующие вероятности перехода из данной ячейки: вниз (p_d); вверх (p_u); остаться в наблюдаемой ячейке (p_s). Указанные вероятности переходов из i -й ячейки поставлены в соответствие физическим параметрам процесса [20–21]:

$$p_{si} = 1 - p_{ui} - p_{di}; \quad (3)$$

$$p_{di} = d_i \text{ при } W_i - V_{si} \geq 0; \quad (4)$$

$$p_{di} = v_i + d_i \text{ при } W_i - V_{si} < 0; \quad (5)$$

$$p_{ui} = v_i + d_i \text{ при } W_i - V_{si} \geq 0; \quad (6)$$

$$p_{ui} = d_i \text{ при } W_i - V_{si} < 0, \quad (7)$$

где d_i – симметричная часть вероятности переноса для i -й ячейки; W_i – локальная скорость обтекания частиц потоком несущей среды в i -й ячейке, м/с; V_{si} – скорость витания изолированной частицы, м/с; v_i – несимметричная часть вероятности переноса [20–21].

Принципиально важным положением предложенной расчетной схемы является оценка скорости фильтрации газа в стесненном пространстве между частицами. Для оценки скорости стесненного движения оживающего агента в работе [21] было предложено следующее соотношение:

$$W_i = \frac{W_0}{1 - \pi \left(\frac{S_{p,i}}{8S_{\max}} \right)^{\frac{2}{3}}}, \quad (8)$$

где W_0 – скорость оживающего агента в свободном сечении, м/с; S_{\max} – максимально возможное значение массы материала в ячейке (соответствует плотному слою), кг.

Вероятности w_i продвижения оживающего агента (элементы матрицы \mathbf{P}_g) сквозь слой связаны с локальной скоростью газа в ячейке [20]:

$$w_i = W_i \frac{\Delta t}{\Delta x}. \quad (9)$$

Несимметричная часть вероятности миграции частиц из ячейки v_i считается пропорционально относительной скорости движения частицы в стесненном потоке оживающей среды ($W_i - V_{s,i}$) [20–21]

$$v_i = (W_i - V_{s,i}) \frac{\Delta t}{\Delta x}. \quad (10)$$

Для расчета скорости витания V_s использовались следующие соотношения [20–21]:

$$P = C_{d,i} f_p \rho_g \frac{V_{s,i}^2}{2}, \quad (11)$$

где P – вес частицы, Н; f_p – наибольшая площадь поперечного сечения зерна, перпендикулярного вектору скорости, м²; ρ_g – плотность оживающей среды, кг/м³; C_d – коэффициент сопротивления частицы [22],

$$C_{d,i} = \left(2,25 \text{Re}_i^{-0,31} + 0,36 \text{Re}_i^{0,06} \right)^{0,45}, \quad (12)$$

где Re_i – число Рейнольдса, рассчитанное с использованием локальной скорости обтекания частицы в i -й ячейке.

На характер миграций частиц в псевдооживленном слое влияют также случайные воздействия, традиционно представляемые через макродиффузионную составляющую [20–22]. Симметричные компоненты вероятностей переноса d , которые в матрице переходных вероятностей прибавляются ко всем элементам, расположенным на соседних с главной диагоналях, рассчитываются как [20–22]

$$d = D \frac{\Delta t}{\Delta x^2}, \quad (13)$$

где D – коэффициент макродиффузии частиц, м²/с [20–23], который в настоящей работе определяется по эмпирическому соотношению [24],

$$D_i = 0,051 (W_i / W_f) (W_i - W_f)^{1,471}, \quad (14)$$

где W_f – скорость начала псевдооживления, м/с.

Методы экспериментального исследования. Для верификации теоретической модели проведены исследования локальных параметров аэродинамических процессов в псевдооживленном слое на натурной лабораторной

установке, схема которой приведена на рис. 1б. Установка включает в себя корпус в форме прямоугольного параллелепипеда с газораспределительной решеткой в нижней части. Размеры рабочего пространства аппарата: ширина – 210 мм, глубина – 210 мм, высота – 420 мм. Газораспределительная решетка предназначена для удержания материала в определенном объеме, а также равномерного распределения воздушного потока по сечению аппарата, создаваемого воздуходувкой.

Измерения давления и скорости потока производились в толще псевдооживленного слоя посредством введения в него трубки Пито (рис. 2).

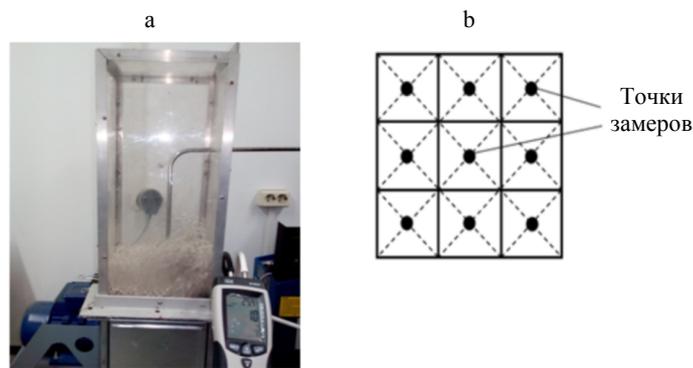


Рис. 2. а – фотография проведения измерений; б – схема расположения точек измерения по сечению измерительной установки

Fig. 2. a – a photo of the measurements; b – a diagram of the location of the measurement points along the cross section of the measuring unit

Точки измерения параметров слоя располагались по оси корпуса установки на высоте h . Замеры производились при различной производительности воздуходувки в четырех фиксированных по высоте точках. В качестве вторичного прибора использовали дифференциальный манометр марки DT-8920. Замеры высоты псевдооживленного слоя H производили от уровня распределительной решетки до свободной поверхности слоя.

В научной литературе нет нормативного документа, регламентирующего расположение точек замеров при проведении измерений в псевдооживленном слое, поэтому было выполнено траверсирование корпуса аппарата с помощью сетки. Разбивка сетки выполнялась согласно рекомендациям из литературы [25]: сечение корпуса было разбито на участки, подобные сечению корпуса, плоскостями, параллельными его стенкам, и измерения выполнены в центре каждого полученного квадрата. Согласно рекомендациям [25], сторона полученного прямоугольника должна оставаться в диапазоне 150–200 мм, а минимальное число измерительных точек должно равняться трем в каждом направлении (принятая схема показана на рис. 2б – по сечению корпуса имеем девять квадратов размерами 70×70 мм с точками измерения). В ходе опыта в каждой точке проведено по пять замеров.

Результаты и обсуждение

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных показаны на рис. 3–5.

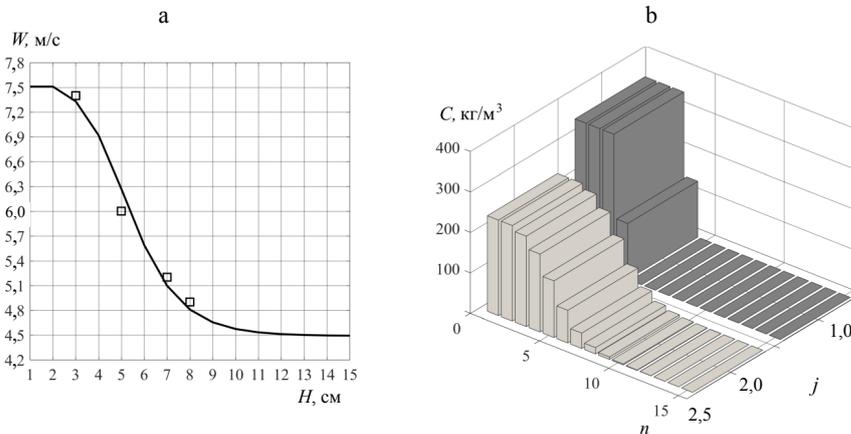


Рис. 3. Распределение характеристик слоя по его высоте при фиктивной скорости воздуха

$W_0 = 4,5$ м/с: а – распределение скорости стесненного движения оживающего агента (линия – расчет, маркеры – экспериментальные значения); б – распределение концентрации твердой фазы ($j = 1$ – псевдооживленный слой; $j = 2$ – плотный слой)

Fig. 3. The pattern of the distribution of the characteristics of the bed along its height at a superficial air velocity $W_0 = 4,5$ m/s: а – distribution of the velocity of the constrained movement of the fluidizing agent (line – calculation, markers – experimental values); б – distribution of the concentration of the solid phase ($j = 1$ – fluidized bed; $j = 2$ – dense bed)

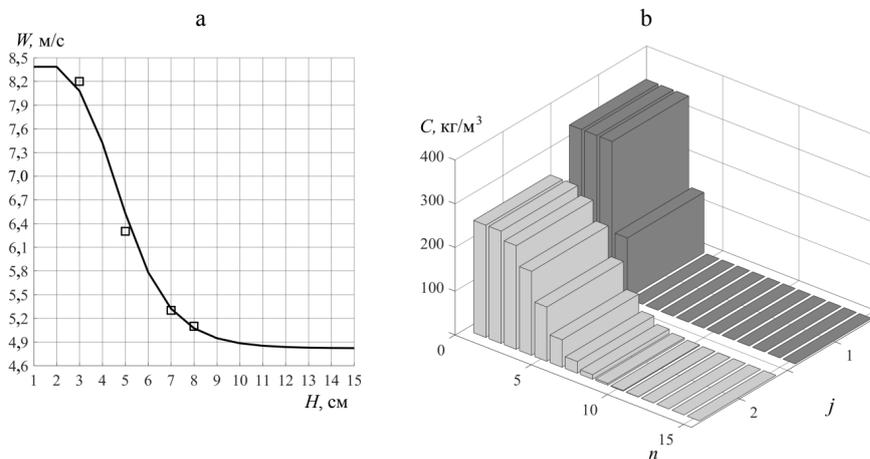


Рис. 4. Распределение характеристик слоя по его высоте при фиктивной скорости воздуха

$W_0 = 4,8$ м/с: а – распределение скорости стесненного движения оживающего агента (линия – расчет, маркеры – экспериментальные значения); б – распределение концентрации твердой фазы ($j = 1$ – псевдооживленный слой; $j = 2$ – плотный слой)

Fig. 4. The pattern of the distribution of the characteristics of the bed along its height at a superficial air velocity $W_0 = 4,8$ m/s: а – distribution of the velocity of the constrained movement of the fluidizing agent (line – calculation, markers – experimental values); б – distribution of the concentration of the solid phase ($j = 1$ – fluidized bed; $j = 2$ – dense bed)

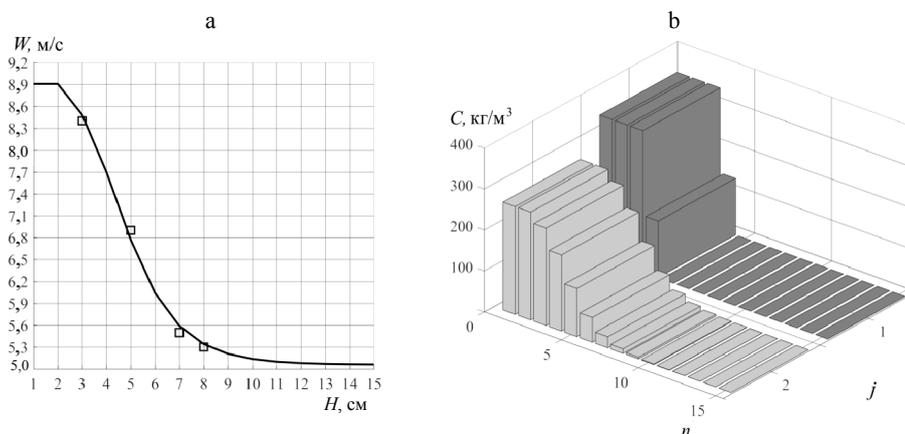


Рис. 5. Распределение характеристик слоя по его высоте при фиктивной скорости воздуха $W_0 = 5,1$ м/с: а – распределение скорости стесненного движения оживающего агента (линия – расчет, маркеры – экспериментальные значения); б – распределение концентрации твердой фазы ($j = 1$ – псевдооживленный слой; $j = 2$ – плотный слой)

Fig. 5. The pattern of the distribution of the characteristics of the bed along its height at a superficial air velocity $W_0 = 5,1$ m/s: a – distribution of the velocity of the constrained movement of the fluidizing agent (line – calculation, markers – experimental values); b – distribution of the concentration of the solid phase ($j = 1$ – fluidized bed; $j = 2$ – dense bed)

На рис. 3а, 4а и 5а показаны результаты сравнения расчетных (линии) и экспериментальных (маркеры) распределений локальной скорости воздуха по высоте слоя. Максимальное отклонение расчетных прогнозов от экспериментальных значений не превышало 4 %, что свидетельствует о высокой прогностической эффективности предложенной физико-математической модели и достаточном качестве выполненной ранее параметрической идентификации. Параметры дискретизации пространства аппарата во всех численных экспериментах составляли $\Delta x = 0,01$ м и $\Delta t = 0,02$ с.

Для иллюстрации характера распределения частиц по высоте псевдооживленного слоя служат рис. 3б, 4б и 5б. Как видно, распределение твердой фазы является неоднородным и асимптотически снижается по высоте слоя. Характер распределения во многом определяется диффузионным переносом частиц в слое, так как при его отсутствии расчетное распределение оставалось бы однородным. В то же время возникающая из-за случайных миграций неоднородность приводит к соответствующим изменениям в аксиальном профиле скоростей, делая его качественно и количественно более достоверным.

ВЫВОДЫ

1. В работе выполнено расчетное и экспериментальное исследование локальных гидромеханических характеристик монодисперсного псевдооживленного слоя. В задачи исследования входили разработка и адаптация математической модели для рассматриваемого случая, ее параметрическая идентификация, верификация путем сопоставления получаемых прогнозов

с данными натурального эксперимента. Результаты работы согласуются с теорией транскляторного механизма теплопереноса [12].

2. Важным обстоятельством являлось то, что используемый для натурального эксперимента материал по своим физико-механическим свойствам близок к частицам каменного угля, но имеет более стабильные гранулометрические параметры. Последнее обстоятельство позволяет с некоторой уверенностью переносить полученные результаты на случаи ожижения частиц каменноугольного топлива.

3. Поскольку полученные расчетные прогнозы находятся в хорошем соответствии с результатами натурального эксперимента, можно сделать вывод, что предложенная структура математической модели в качественном отношении подходит для прогнозирования процесса псевдоожижения частиц угля (по крайней мере, достаточно узких его фракций). Таким образом, предложенную модель можно рассматривать как достоверную научную основу компьютерного метода расчета котлоагрегатов, использующих технику псевдоожижения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
2. Фортов, В. Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В. Е. Фортов, О. С. Попель // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13.
3. Пехота, А. Н. Исследование термоаналитическими методами энергетических свойств брикетированного многокомпонентного топлива / А. Н. Пехота, С. А. Филатов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 2. С. 143–155. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-143-155>.
4. Computational modeling of Pollutants in Furnaces of Pulverized Coal Boilers of the Republic of Kazakhstan / A. Askarova, A. Georgiev, S. Bolegenova, M. Beketayeva, V. Maximov, S. Bolegenova // Energy. 2022, Vol. 258, Article. 124826. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124826>.
5. Oka, S. N. Fluidized Bed Combustion / S. N. Oka. NY, Basel, CRC Press, 2003. 599 p. <https://doi.org/10.1201/9781420028454>.
6. Sarkar, D. K. Thermal Power Plant: Design and Operation / D. K. Sarkar. Elsevier Inc. 2015. 588 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-00536-9>.
7. Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges / Editors: S. De, V. S. Moholkar, A. K. Agarwal, B. Thallada. Singapore: Springer Nature, 2018. 521 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9>.
8. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. I / под ред. Г. М. Островского. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. 848 с.
9. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справ. / под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. Л.: Химия, 1986. 352 с.
10. Kunii, D. Fluidization Engineering / D. Kunii, O. Levenspiel. 2nd ed. Butterworth-Heinemann. 1991. 498 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24190-0>.
11. Филиппов, А. И. О диффузии под воздействием звука / А. И. Филиппов, К. А. Филиппов // Акустический журнал. 1999. Т. 45, № 3. С. 414–417.
12. Полигормонический трансклятор бегущей волны / А. И. Филиппов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 2. С. 39–44.
13. Multiscale Modeling of Gas-Fluidized Beds / M. A. van der Hoef [et al.] // Advances in Chemical Engineering. 2006. Vol. 31. P. 65–149. [https://doi.org/10.1016/S0065-2377\(06\)31002-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2377(06)31002-2).
14. Review of Discrete Particle Modeling of Fluidized Beds / N. G. Deen [et al.] // Chemical Engineering Science. 2007. Vol. 62. P. 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.014>.
15. Meso-Scale Oriented Simulation Towards Virtual Process Engineering (VPE) – The EMMS Paradigm / W. Ge [et al.] // Chemical Engineering Science. 2011. Vol. 66. P. 4426–4458. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.029>.

16. Dai, Q. Influence of Meso-Scale Structures on Drag in Gas-Solid Fluidized Beds / Q. Dai, C. Chen, H. Qi // *Powder Technology*. 2016. Vol. 288. P. 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.031>.
17. Бобков, С. П. Моделирование основных процессов переноса с использованием клеточных автоматов / С. П. Бобков // *Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология*. 2009. Т. 52, № 3. С. 109–114.
18. Berthiaux, H. Application of the Theory of Markov Chains to Model Different Processes in Particle Technology / H. Berthiaux, V. Mizonov, V. Zhukov // *Powder Technology*. 2005. Vol. 157, No 1–3. P. 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.019>.
19. Theoretical and Experimental Study of Particulate Solids Drying in Circulating Fluidized Bed / A. Mitrofanov [et al.] // *Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 18, No 2. P. 267–276. <https://doi.org/10.17654/hm018020267>.
20. A Markov Chain Model to Describe Fluidization of Particles with Time-Varying Properties / A. V. Mitrofanov [et al.] // *Particulate Science and Technology*. 2018. Vol. 36, No 2. P. 244–253. <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1243180>.
21. Экспериментальное и расчетное исследование пиролиза биомассы в цилиндрическом реакторе / А. В. Митрофанов [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021; 64 (1), 51–64. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-51-64>.
22. Khan, A. R. The Resistance to Motion of a Solid Sphere in a Fluid / A. R. Khan, J. F. Richardson // *Chem. Eng. Commun.* 1987. Vol. 62. P. 135–150. <https://doi.org/10.1080/00986448708912056>.
23. Dehling, H. G. Stochastic Models for Transport in a Fluidized Bed / H. G. Dehling, A.C. Hoffmann, H. W. Stuu // *SIAM J. Appl. Math.* 1999. Vol. 60. P. 337–358. <https://doi.org/10.1137/s0036139996306316>.
24. Esin, A. Correlation of Axial Mixing of Solids in Fluidized Beds by a Dispersion Coefficient / A. Esin, M. Altun // *Powder technology*. 1984. Vol. 39. P. 241–244. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(84\)85041-x](https://doi.org/10.1016/0032-5910(84)85041-x).
25. Алиев, Г. М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов / Г. М.-А. Алиев. М.: Металлургия. 1986. 544 с.

Поступила 16.03.2023 Подписана в печать 23.06.2023 Опубликовано онлайн 30.11.2023

REFERENCES

1. Korsak E. P. Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus. *Energetika. Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398> (in Russian).
2. Fortov V. E., Popel' O. S. (2014) The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 61 (6), 389–398. <https://doi.org/10.1134/S0040601514060020>.
3. Pekhota A. N., Filatov S. A. (2022) Investigation of Energy Properties of Briquetated Multi-component Fuel by Thermo-Analytical Methods. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 143–155. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-143-155> (in Russian).
4. Askarova A., Georgiev A., Bolegenova S., Beketayeva M., Maximov V., Bolegenova S. (2022) Computational Modeling of Pollutants in Furnaces of Pulverized Coal Boilers of the Republic of Kazakhstan. *Energy*, 258, 124826. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124826>.
5. Oka S. N. (2003) *Fluidized Bed Combustion*. NY, Basel, CRC Press. 599. <https://doi.org/10.1201/9781420028454>.
6. Sarkar D. K. (2015) *Thermal Power Plant: Design and Operation*. Elsevier Inc. 588. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-00536-9>.
7. De S., Moholkar V. S., Agarwal A. K., Thallada B. (eds.) (2018) *Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges*. Singapore, Springer Nature. 521. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9>.

8. Ostrovskii G. M. (ed.) (2004) *The New Handbook of Chemist and Technologist. Processes and Devices of Chemical Technologies. Part I*. St. Petersburg, Professional Publ. 848 (in Russian).
9. Mukhlenov I. P., Sazhin B. S., Frolov V. F. (eds.) (1986) *Calculation of Fluidized Bed Devices*. Leningrad, Khimiya Publ. 352 (in Russian).
10. Kunii D., Levenspiel O. (1991) *Fluidization Engineering*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann. 498. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24190-0>.
11. Filippov A. I., Filippov K. A. (1999) On Diffusion under the Influence of Sound. *Akusticheskij Zhurnal*, 45 (3), 414–417 (in Russian).
12. Filippov, A. I., Mukhametzyanov, E. V., Leont'ev, A. I. Sadriev A. F. Polyharmonic Transcillator of a Running Wave. *Russian Physics Journal. Vol. 56*, 155–161 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11182-013-0011-y>.
13. van der Hoef M. A., Ye M., van Sint Annaland M., Andrews A. T., Sundaresan S., Kuipers J. A. M. (2006) Multiscale Modeling of Gas-Fluidized Beds. *Advances in Chemical Engineering*, 65–149. [https://doi.org/10.1016/S0065-2377\(06\)31002-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2377(06)31002-2).
14. Deen N. G., van Sint Annaland M., van der Hoef M. A., Kuipers J. A. M. (2007) Review of Discrete Particle Modeling of Fluidized Beds. *Chemical Engineering Science*, 62 (1–2), 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.014>.
15. Ge W., Wang W., Yang N., Li J., Kwauk M., Chen F. [et al.] (2011) Meso-Scale Oriented Simulation Towards Virtual Process Engineering (VPE) – The EMMS Paradigm. *Chemical Engineering Science*, 66, 4426–4458. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.029>.
16. Dai Q., Chen C., Qi H. (2016) Influence of Meso-Scale Structures on Drag in Gas-Solid Fluidized Beds. *Powder Technology*, 288, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.031>.
17. Bobkov S. P. (2009) Simulation of Basic Transfer Processes Using Cellular Automata. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = Chem-ChemTech*, 52 (3), 109–114 (in Russian).
18. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the Theory of Markov Chains to Model Different Processes in Particle Technology. *Powder Technology*, 157 (1–3), 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.019>.
19. Mitrofanov A., Mizonov V., Shuina E., Kasatkina N., Shpeynova N. (2019) Theoretical and Experimental Study of Particulate Solids Drying in Circulating Fluidized Bed. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 18 (2), 267–276. <https://doi.org/10.17654/hm018020267>.
20. Mitrofanov A. V., Mizonov V. E., Tannous K., Ovchinnikov L. N. (2018) A Markov Chain Model to Describe Fluidization of Particles with Time-Varying Properties. *Particulate Science and Technology*, 36 (2), 244–253. <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1243180>.
21. Mitrofanov A. V., Mizonov V. E., Vasilevich S. V., Malko M. V. (2021) Experiments and Computational Research of Biomass Pyrolysis in a Cylindrical Reactor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 51–64. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-51-64> (In Russian).
22. Khan A. R., Richardson J. F. (1987) The Resistance to Motion of a Solid Sphere in a Fluid. *Chemical Engineering Communication*, 62, 135–150. <https://doi.org/10.1080/00986448708912056>.
23. Dehling H. G., Hoffmann A. C., Stuu H. W. (1999) Stochastic Models for Transport in a Fluidized Bed. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 60 (1), 337–358. <https://doi.org/10.1137/s0036139996306316>.
24. Esin A., Altun M. (1984) Correlation of Axial Mixing of Solids in Fluidized Beds by a Dispersion Coefficient. *Powder Technology*, 39 (2), 241–244. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(84\)85041-x](https://doi.org/10.1016/0032-5910(84)85041-x).
25. Aliyev G. M.-A. (1986) *Technique of Dust Collection and Purification of Industrial Gases*. Moscow, Metallurgiya Publ. 544 (in Russian).

Received: 16 March 2023

Accepted: 23 June 2023

Published online: 30 November 2023