

УДК 66.096.5

## Расчетно-экспериментальное исследование аппарата с двумерным псевдооживленным слоем

Мизонов В.Е., д-р техн. наук, Огурцов А.В., канд. техн. наук, Митрофанов А.В., асп., Tannous K., Dr.-Eng.

Предложена нелинейная ячеечная модель аппарата с псевдооживленным слоем. Сформулирована и решена задача расчета локальных скоростей обтекания частиц по высоте псевдооживленного слоя в лабораторном аппарате плоской формы.

Ключевые слова: псевдооживление, концентрация, цепь Маркова, скорость витания.

## Computational and experimental research of an apparatus with two dimensional fluidized bed

Mizonov V.E., Doctor of Engineering Science, Ogurcov A.V., Candidate of Engineering Science, Mitrofanov A.V., Graduate student, Tannous K., Dr.-Eng.

A non-linear cell model of the vehicle with a fluidized bed is offered. The problem of calculation of local speeds of flow of particles on an altitude of fluidized layer in the laboratory vehicle of the flat form is formulated and resolved.

Keywords: fluidized, concentration, chain of the Markov, velocity of the whorl.

Технология псевдооживления имеет широкое применение в различных отраслях промышленности. Широкое внедрение псевдооживления обусловливается рядом факторов: выравниванием температур и концентраций в объеме слоя, связанным с интенсивным перемешиванием твердой фазы; высокими значениями коэффициентов эффективной теплопроводности и теплоотдачи от слоя к газу (и обратно); текучестью; независимостью гидравлического сопротивления слоя от фракционного состава и др. [1].

При создании нового аппарата с псевдооживленным слоем лишь эксперимент позволяет с приемлемой точностью предвидеть его показатели, так как детальное понимание механизмов движения частиц в псевдооживленном слое отсутствует [1, 2]. Путь к окончательному техническому решению сокращается и удешевляется, если эксперименту предшествует численный эксперимент [1, 2].

Ранее для математического моделирования поведения слоя и расчета распределения частиц по высоте аппарата нами была предложена ячеечная модель, базирующаяся на основе одномерной цепи Маркова [3].

Аппарат со взвешенным слоем рассматривался как совокупность ячеек. Перетоки материала между ячейками описаны переходной матрицей, элементы которой определяются фактической скоростью газа в ячейках, интенсивностью взаимодействий между частицами и некоторыми другими случайными факторами. Движение материала рассматривается через малые конечные промежутки времени  $\Delta t$ , в течение которых частицы могут переместиться не далее соседней ячейки. В аппарат подается газ со скоростью  $W$ . Крупность фракции исходного материала характеризуется ее скоро-

стью витания  $V_s$ . Текущее состояние процесса представлено вектором-столбцом  $S$ , состоящим из концентраций материала в каждой ячейке, а его эволюция – матричным равенством

$$S^{k+1} = C \cdot S^k, \quad (1)$$

где  $k$  – номер перехода;  $C$  – матрица переходов размера  $n \times n$ , состоящая из вероятностей для материала перейти вниз, остаться в наблюдаемой ячейке или перейти вперед. Вероятности остаться в текущей ячейке составляют главную диагональ матрицы  $C$ , вероятности перехода вниз и перехода вверх располагаются соответственно на диагоналях над и под главной:

$$C = \begin{pmatrix} c_{s1} & c_{b2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ c_{f1} & c_{s2} & c_{b3} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{f2} & c_{s3} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c_{s(n-2)} & c_{b(n-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c_{f(n-2)} & c_{s(n-1)} & c_{bm} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & c_{f(n-1)} & c_{sm} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Вероятности  $c_{si}$ ,  $c_{fi}$  и  $c_{bi}$  связаны с параметрами процесса и крупностью фракции следующими зависимостями:

$$c_{bi} = d \text{ при } V_i > 0 \text{ и } c_{bi} = V_i + d \text{ при } V_i < 0; \quad (3)$$

$$c_{fi} = V_i + d \text{ при } V_i > 0 \text{ и } c_{fi} = d \text{ при } V_i < 0; \quad (4)$$

$$c_{si} = 1 - c_{fi} - c_{bi}, \quad (5)$$

где

$$v_i = (w_i - V_s)\Delta t/\Delta x; \quad (6)$$

$$d = D\Delta t/\Delta x^2, \quad (7)$$

$D$  – коэффициент макроdiffузии.

Величина  $v$  характеризует осредненное движение материала в ячейке, величина  $d$  – его симметричную случайную составляющую [3].

Начальное заполнение вектора  $S$ , определяемое насыпной плотностью частиц, проводилось следующим образом: сначала рассчитывались объемы всех ячеек, затем определяли объем, занимаемый неподвижным слоем материала в аппарате. После этого элементам вектора  $S$ , начиная с  $i = 1$ , последовательно присваивались соответствующие значения объемов ячеек, которые вычитались из объема, занимаемого всем слоем в насыпном состоянии. Когда при некотором  $i = j$  эта разность становилась отрицательной, элементу  $S(j)$  присваивалось значение оставшегося объема материала до вычитания (при  $i = j - 1$ ), а элементам с номерами  $i > j$  присваивались нулевые значения. Затем по известным объемам материала вычислялась концентрация материала в каждой ячейке, которая далее рассматривалась как максимально возможная для данной ячейки концентрация твердых частиц  $S_{maxi}$  [3].

В линейных моделях [4] делается допущение, что  $w_i = W = const$ , т. е. скорость газа не зависит ни от наличия в аппарате материала, ни от номера ячейки и является только функцией площади поперечного сечения аппарата  $w_i = f(A_i)$ . В реальных взвешенных потоках сечение аппарата загромождено большим количеством частиц. Увеличение объемной концентрации твердых частиц приводит к росту фактической скорости обтекания, и скорость является функцией не только площади поперечного сечения, но также функцией концентрации материала в аппарате  $w_i = f(A_i, S_i)$ , что и делает представленную модель нелинейной, в отличие от подобных линейных моделей [4].

С учетом введенной максимальной концентрации материала  $S_{max}$ , которая может наблюдаться в ячейке, и коэффициентом ее порозности  $\varepsilon$ , фактическая скорость газа в  $i$ -й ячейке может быть рассчитана следующим образом (предполагается, что размеры самих частиц незначительны по сравнению с сечением аппарата):

$$w_i = \frac{W}{1 - \varepsilon(S_i / S_{max})}, \quad (8)$$

где  $S_i$  – расчетная концентрация материала в данной ячейке;  $S_{max}$  – максимально возможная концентрация материала в ячейке данного объема [3].

Данные предположения наглядно иллюстрирует рис. 1.

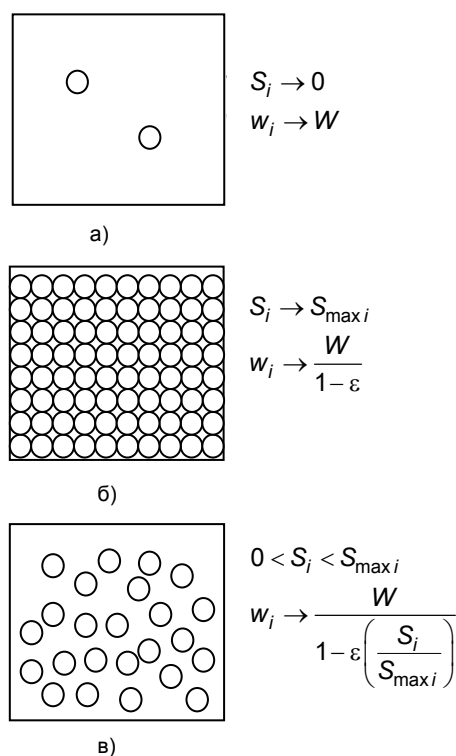


Рис. 1. Варианты движения газа через зернистый слой при различной концентрации частиц: а – концентрация частиц незначительна ( $S_i \rightarrow 0$ ); б – концентрация частиц максимальна ( $S_i \rightarrow S_{max}$ ); в – произвольная концентрация частиц

Когда концентрация частиц в ячейке незначительна ( $S_i \rightarrow 0$ ) и не оказывает существенного влияния на скорость, последняя становится постоянной ( $w_i \rightarrow W$ ) и модель линейной (рис. 1,а). Когда концентрация частиц в ячейке максимальна ( $S_i \rightarrow S_{max}$ ), при расчете скорости должна быть сделана поправка на коэффициент порозности

$$w_i = \frac{W}{1 - \varepsilon} \quad (\text{рис. 1,б}).$$

Если величина  $S_i$  меньше максимального значения, но все-таки существенно влияет на величину  $w_i$  (рис. 1,в), то справедлива зависимость (8) [3].

Однако методики измерения локальных значений объемной концентрации дисперсного материала в некотором объеме (в объеме ячейки) псевдооживленного слоя отсутствуют, а количественных закономерностей, позволяющих с приемлемой точностью рассчитать расширение и объемную концентрацию материала, в настоящее время не существует [3, 5, 6].

В ряде исследований для изучения поведения частиц в аппаратах с псевдооживленным слоем использованы аппараты с плоским (двумерным) слоем [5, 6, 7]. В таких аппаратах можно не только наблюдать за поведением слоя, но также дать количественную оценку многим процессам, происходящим в нем.

Правомерность применения аппаратов с псевдооживленным слоем, в которых движение частиц ограничено одной плоскостью, для исследования характеристик объемного слоя обсуждалась рядом авторов [7, 8]. В специальном исследовании [8] были сопоставлены аппараты с двумерным (2D) и «псевдодвумерным» (pseudo-2D), в котором расстояние между стенками аппарата (глубина) составляло пять диаметров частиц, псевдооживленными слоями. Приведенные в [8] результаты показывают, что близость стенок качественно не влияет на профиль потока частиц на любой высоте, хотя и влияет на профиль потока газа.

При использовании аппаратов с двумерным псевдооживленным слоем, непосредственно для количественной оценки процессов в нем могут использоваться различные методики, современный обзор которых приведен в [9]. Анализ этих методик показывает, что большинство из них предназначены для определения скоростей частиц и воздушных пузырей, а распределение порозности по высоте слоя остается малоизученным.

В связи с этим, в качестве экспериментальной установки был изготовлен аппарат плоской формы, одна из стенок которого была выполнена из прозрачного стекла, а другая служила непрозрачным фоном. Расстояние между стенками аппарата составляло 6,2 мм. Призматическая часть заменяла коническую часть реального цилиндрикоконического аппарата, а часть в виде прямоугольного параллелепипеда – цилиндрическую часть. Ширина аппарата в цилиндрической части – 166 мм, ширина внизу конической части – 120 мм, высота аппарата – 800 мм.

Аппарат был условно разделен по высоте на 40 ячеек по 20 мм каждая. Движение воздуха через аппарат обеспечивалось вентилятором. Скорость движения воздуха рассчитывалась по показаниям трубки Пито-Прандтля. На газораспределительную решетку (металлическую сетку с квадратными ячейками 1×1 мм, живое сечение решетки 40%) укладывались одинаковые сферические пластмассовые частицы диаметром 6 мм. Средняя масса одной частицы составила 0,191 г.

После включения вентилятора и перехода слоя в установившееся состояние, было сделано 20 фотографий псевдооживленного слоя. Затем по фотографиям было определено количество частиц в каждой ячейке аппарата и найдено среднее количество частиц, наблюдаемых в ячейках.

Экспериментальное и расчетное распределения частиц по высоте псевдооживленного слоя в установившемся режиме работы аппарата показаны на рис. 2, а экспериментальное и расчетное распределения концентраций материала по высоте аппарата приведены на рис. 3.

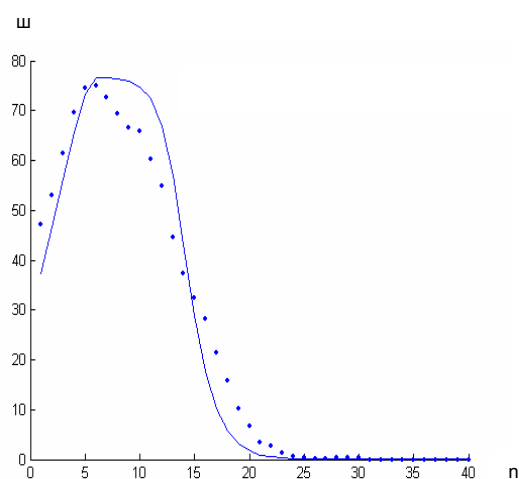


Рис. 2. Экспериментальное и расчетное распределение количества частиц материала по высоте аппарата в установившемся режиме работы (высота неподвижного слоя 22 см, расход оживающего агента 763,2 см<sup>3</sup>/с): • – экспериментальное количество частиц; — — расчетное количество частиц

Сравнение экспериментальных и численных распределений показывает удовлетворительное совпадение результатов. При этом форма полученного профиля распределения концентраций (заметное увеличение концентрации, наблюдаемое в центральной части псевдооживленного слоя) качественно соответствует данным, приводимым в литературе [1, 6].

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет при заданных скорости витания частиц, скорости газа, подаваемого в аппарат, и массе частиц получить распределения массы материала и скоростей частиц по высоте аппарата в установившемся режиме.

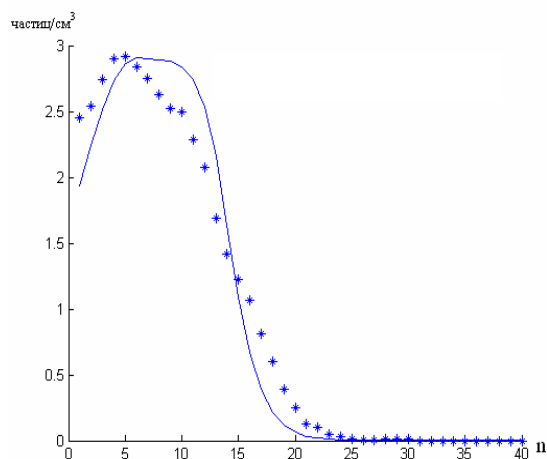


Рис. 3. Экспериментальное и расчетное распределение концентраций частиц материала по высоте аппарата в установившемся режиме работы (высота неподвижного слоя 22 см, расход оживающего агента 763,2 см<sup>3</sup>/с): — — расчетная концентрация; \* – экспериментальная концентрация

Кроме того, с помощью модели может быть исследован и переходный режим, уточне-

но значение скорости начала псевдооживления и критической скорости уноса материала из аппарата, а также количества материала, уносимого из слоя.

#### Список литературы

1. **Гильперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б.** Основы техники псевдооживления. – М.: Химия, 1967.
2. **Расчеты** аппаратов кипящего слоя: Справочник / Под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986.
3. **Ячеечная** математическая модель распределения твердых частиц в псевдооживленном слое / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.А. Огурцов, В.Е. Мизонов // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50. – Вып. 3. – С. 100–103.
4. **Мизонов В.Е., Ушаков С.Г.** Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия, 1989.

5. **Almendros-Ibanez J.A., Sobrino C., de Vega M. and Santana D.** A new model for ejected particle velocity from erupting bubbles in 2-D fluidized beds // Chemical Engineering Science, 61. – 2006. – PP. 5981–5990.
6. **Pallares D. and Johnsson F.** A novel technique for particle tracking in cold 2-dimensional fluidized beds-simulating fuel dispersion // Chemical Engineering Science, 61. – 2006. – PP. 2710–2720.
7. **Tsuji Y., Kawaguchi T. and Tanaka T.** Discrete Particle Simulation of Two-Dimensional Fluidized Bed // Powder Technol. 77. – 1993. – PP. 79–87.
8. **Link J., Zeilstra C., Deen N. and Kuipers H.** // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – Vol. 82. – 2004. – PP. 30–36.
9. **Lim K.S., Zhu J.X. and Grace J.R.** Hydrodynamics of gas–solid fluidization // Int. J. Multiph. Flow 21 (1995). – PP. 141–193.

Мизонов Вадим Евгеньевич,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики,  
e-mail: mizonov@home.ivanovo.ru

Огурцов Антон Валерьевич,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики,  
телефон (4932) 26-97-45.

Митрофанов Андрей Владимирович,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
аспирант кафедры прикладной математики,  
телефон (4932) 26-97-45.

Тану Катя,  
департамент химической инженерии университета г. Кампинос (Бразилия),  
доктор, профессор,  
e-mail: mizonov@home.ivanovo.ru