

УДК 66.011(045)

Б. Я. Корнієнко, д-р техн. наук, доцент

Національний авіаційний університет, м. Київ

АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

Розглядаються основні підходи до математичного моделювання процесів переносу у псевдозрідженому шарі, класифікація моделей за типами міжфазної взаємодії, з урахуванням стохастичної і хаотичної гідродинаміки та класифікація процесів в апараті з псевдозрідженим шаром за їх властивостями для гідродинамічних моделей.

Ключові слова: *математичне моделювання, двохфазні моделі, гідродинамічні моделі, стохастичний підхід, хаотична гідродинаміка.*

Вступ. Розвиток суспільства у сучасних умовах залежить від розроблення та впровадження енергоефективних екологічно чистих технологій. Застосування техніки псевдозрідження для отримання твердих композитів із заданими властивостями за наявності фазових переходів дозволяє сумістити низку технологічних стадій при термічному коефіцієнті більше 60 %. Тому створення математичних моделей з метою розробки сучасних систем керування процесами у дисперсних системах є актуальною задачею. Протягом останніх десятиліть розроблена велика кількість математичних моделей процесів переносу у дисперсних системах із різним рівнем деталізації.

Розглянемо основні підходи до математичного моделювання процесів переносу у псевдозрідженому шарі, класифікація моделей за типами міжфазної взаємодії, з урахуванням стохастичної і хаотичної гідродинаміки.

Відповідно [1] визначимо мету математичної моделі апарата для зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі: надання допомоги у вивченні процесів, що відбуваються в апараті (модель, як засіб пізнання та навчання); збір та обробка даних (модель, як методика розрахунку); скорочення числа та вартості необхідних експериментів (модель, як засіб здійснення обчислювальних експериментів).

Розглянемо математичні моделі процесів зневоднення та гранулювання у апаратах із псевдозрідженим шаром, що необхідні для визначення основних параметрів процесів, масштабування апаратів та здійснення подальшого керування процесами. Дослідження здійснювалися для псевдозрідженого шару із висхідним потоком теплоносія

та з урахуванням турбулентності у псевдозрідженому шарі. Також використані математичні моделі для швидкого псевдозрідження.

Модель Мая. Рання версія двофазної моделі запропонована В. Маєм [2]. Основні припущення: розподіл потоку газу відбувається відповідно до двофазної теорії; передбачається, що потік бульбашок газу перебуває у загальному потоці; бульбашки газу вільні від твердих тіл; структура потоку газу в емульсійній фазі розганяється із загальним потоком; поруватість у фазі емульсії відповідає мінімальним умовам псевдозрідження.

Коефіцієнт дисперсії і коефіцієнт масообміну встановлені на експериментальних дослідах.

Модель Шеллав [3, 4] є напівемпіричною моделлю, заснованою на двофазній моделі Дж. Ван Дімтера [5], де зроблено наступні припущення: газова фаза є вільною від твердих частинок, що перебувають у потоці; немає потоку газу через фазу емульсії; змішування емульсії із газовою фазою моделюється за допомогою турбулентної дифузії.

Використовуючи ці припущення, сформовані масові баланси при стаціонарних умовах і урахуванні кінетики першого порядку:

$$\frac{dC_b}{dz} + N_\alpha \cdot (c_b - c_e) = 0; \quad (1)$$

$$-\frac{1}{N_d} \cdot \frac{d^2 c_e}{dz^2} - N_\alpha \cdot (c_b - c_e) + N_r \cdot c_e = 0; \quad (2)$$

із безрозмірним числом одиниць переносу N_α , кількістю блоків перемішування у емульсійній фазі N_d та числом одиниць реакції N_r .

Модель Оркутта та Девідсона–Харрісона. Модель, запропонована Дж. Оркуттом [7], пізніше відтворена Дж. Девідсоном і Д. Харрісоном [1], одна з перших, де параметри пов'язані з динамікою газових бульбашок. Вона ґрунтується на наступних припущеннях: розподіл газового потоку відбувається відповідно до двофазної теорії; передбачається, що потік газових бульбашок перебуває у спільному потоці; газові бульбашки не містять твердих тіл; структура потоку газу в щільній фазі або повністю змішана, або витісняється; поруватість у фазі емульсії відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; міжфазний масообмін складається з механізмів проникнення і дифузії.

Встановлено, що коефіцієнт масопереносу k_{be} визначається за виразом

$$k_{be} = 0.75 \cdot U_{mf} + \frac{0.975 \cdot g^{0.25} \cdot D_m^{0.5}}{d_{eq}^{0.25}}. \quad (3)$$

Пізніше ця модель розширена Р. Дартоном [8], з урахуванням зростання бульбашок у шарі.

Модель Партриджа-Роу. Ця модель у [9] принципово відрізняється від моделі Оркутта, тому що містить наступні припущення щодо двофазності: потік газових бульбашок визначається двофазною теорією; передбачається, що потік газових бульбашок перебуває у спільному потоці; поруватість у спільному потоці відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; структура потоку газу в щільній фазі витісняється; поруватість у фазі емульсії відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; міжфазний масоперенос визначається за формулою:

$$Sh_c = \frac{k_{ce} \cdot d_c}{D_m} = 2 + 0.69 \cdot Re_c^{0.5} \cdot Sc^{0.33}. \quad (4)$$

Модель Грейса. Ця модель, яка була запропонована Дж. Грейсом [10], спирається на наступних припущеннях: немає чистого вертикального потоку газу в щільну фазу; потік бульбашок газу імовірно витісняється; в застійних зонах щільної фази не відбувається змішування; поруватість у щільній фазі відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; для обчислення масопереносу використовуються напівемпіричні рівняння Грейса.

Дана модель може розглядатися як спрощення моделі висхідного трифазного шару [11] і моделі протипотоку зворотного перемішування [12]. Вважається, що фазу хмари в цій моделі знехтувано. Припущення про відсутність вертикального потоку газу в щільній фазі введено у [11] і прийнято. Модель Грейса припускає також наявність твердих тіл у межах фази бульбашок.

Модель Вертера. Основні припущення моделі, запропоновані Дж. Вертером [13] таким чином: немає чистого вертикального потоку газу в щільну фазу; потік бульбашок газу імовірно витісняється; в застійних зонах щільної фази не відбувається змішування; поруватість у щільній фазі відповідає мінімальним умовам псевдозрідження.

Ця модель заснована на більш ранній моделі [14], де враховано зростання бульбашки. Коефіцієнт передачі усередненої висоти шару і масових характеристик передачі, вважається незалежним від осевих і радіальних позицій.

Модель Като – Венав [15] враховує зміни розміру бульбашок, що супроводжують процес міжфазного переносу. Основні припущення: немає чистого вертикального потоку газу в емульсії; псевдозріджений шар ділиться на n відсіків, висота цих відсіків дорівнює діаметру бульбашки на відповідній висоті; кожен відсік складається з фази емульсії і хмари фази бульбашки. Розмір хмари розраховується у відповідності з теорією Дж. Девідсона [16]:

$$\frac{V_c}{V_b} = \frac{\alpha + 2}{\alpha - 1} \quad (5)$$

газ повністю змішується на кожному етапі у кожному відсіку; не відбувається зворотне перемішування між відсіками; поруватість у фазі емульсії відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; поруватість шару ε постійна і лінійно зростає до 1; масоперенос заснований на рекомендації Х. Кобаяші [17]:

$$k_{be} = \frac{0.11}{d_b} \quad (6)$$

зміна розмірів бульбашки з висотою визначається за допомогою адаптації співвідношення Х. Кобаяші [17]:

$$d_b = 0.14 \cdot \rho_p \cdot d_p \cdot \frac{U}{U_{mf}} \cdot x + d_{b,0}. \quad (7)$$

Модель Куній-Левеншпіля. Головною особливістю моделі Куній-Левеншпіля [11] є розгляд трьох окремих фаз (тобто бульбашки, хмари та емульсія) і два різні опори між ними. Зроблено наступні припущення: немає чистого вертикального потоку газу у фазі емульсії; шар складається з трьох фаз: бульбашки, хмари та емульсії; розмір хмари розраховується за Дж. Девідсоном [16]; газ в бульбашці ймовірно витісняється; немає зворотного перемішування в емульсії; поруватість в емульсії і хмарі відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; масообмін між бульбашкою і хмарою є похідним від підходу Девідсона-Харрісона [7]:

$$K_{be} = 4.5 \cdot \frac{U_{mf}}{d_b} + 5.85 \cdot \frac{D_m^{1/2} \cdot g^{1/4}}{d_b^{3/4}} \quad (8)$$

перенос із фази хмари до емульсії відбувається у відповідності з теорією проникнення Хігбі:

$$\begin{aligned} K_{ce} &= \left(\frac{4 \cdot D_{me} \cdot \varepsilon_{mf} \cdot u_b}{\pi \cdot d_b} \right)^{1/2} \cdot \frac{S_c}{V_b} \cong 6.77 \cdot \left(\frac{D_m \cdot \varepsilon_{mf} \cdot u_b}{d_b^3} \right)^{1/2} = \\ &= 6.77 \left(\frac{D_m \cdot \varepsilon_{mf} \cdot 0.711 \cdot \sqrt{g \cdot d_b}}{d_b^3} \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Висновки. За результатами досліджень зроблено наступні узагальнення. Модель Оркутта: ця модель, що допускає поршневий режим потоку в обох фазах, дає непогані результати розподілу профілів концентрації за рахунок врахування міжфазного масообміну. Потребує уточнення параметрів для конкретних експериментальних даних. Модель Парtridge-Рой: Неврахування двофазної теорії викликало серйозну проблему для цієї моделі. Прогнозована область фази бульбашок перевищує загальну площу шару. Спроби скоригувати газові потоки в фазах не подолали цю проблему повністю. Модель Като – Вена: Ця модель задовільно

передбачає профіль розподілу концентрації в фазі бульбашок, але вона не може спрогнозувати концентрацію в емульсійній фазі і не може спрогнозувати падіння концентрації біля поверхні шару. Модель Куній-Левеншпіля: Найкращу відповідність було знайдено, застосовуючи цю модель. За допомогою даної моделі вірно спрогнозовано концентрацію в щільній фазі, за рахунок невисокої швидкості міжфазного масообміну. Встановлено, що загальний масообмін в моделі Куній-Левеншпіля обмежений опором між хмарою і емульсією і модель спрощено до двох фаз, об'єднавши фази бульбашки і хмари.

Разом з тим, наведені вище детерміновані математичні моделі можна покращити, застосувавши стохастичний підхід до процесів, що відбуваються в апараті із псевдозрідженим шаром [18].

Для математичного моделювання апаратів із псевдозрідженим шаром використовується також хаотична гідродинаміка [19]. Тому за допомогою хаосу можна описати динаміку псевдозрідженого шару та досліджувати процеси у апараті для різних гідродинамічних режимів. Детермінований хаос може виникати у псевдозрідженому шарі в результаті нелінійної взаємодії двох бульбашок [20–23]. Таким чином можна використовувати хаотичну поведінку псевдозрідженого шару для класичної математичної моделі Ван Дімтера.

Список використаних джерел:

1. Корнієнко Б. Я. Особливості моделювання процесів переносу у дисперсних системах. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2011. № 2(8). С. 5–9.
2. May W. G. Fluidized-Bed Reactor Studies. *Chemical engineering progress*. 1959. Vol. 55, N. 12. P. 49–56.
3. deVries R. J., van Swaaij W. P. M., Mantovani C., Heijkoop A. Design criteria and performance of the commercial reactor for the Shell chlorine process. *Proceedings of 5th European Symposium on Chemical Reaction Engineering*. Amsterdam, Elsevier Publ. Corp., 1972. P. B9-59– B9-69.
4. van Swaaij W. P. M., Zuiderweg F. J. Investigation of Ozone decomposition in fluidized beds on the basis of a two-phase model. *2nd International Symposium in Chemical Reaction Engineering*. Amsterdam, 1972. P. 9–25.
5. van Deemter J. J., Drinkenburg A. A. H. (Ed.) In fluidization. *Netherlands University Press*, Amsterdam, Netherlands. 1967. P. 334–347.
6. Orcutt J. C., Davidson J. F., Pigford R. L. Reaction time distribution in fluidized catalytic reactors. *Chemical engineering progress symposium series*. 1962. Vol. 58, N 38. P. 1–15.
7. Дэвидсон Дж., Харрисон Д. Псевдоожигение. М.: Химия, 1973. 725 с.
8. Darton R. C. A bubble growth theory of fluidized bed reactors. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1979. Vol. 57. P. 134–138.
9. Partridge B. A., Rowe P. N. Chemical reaction in a bubbling gas-fluidised bed. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1966. Vol. 44. P. 335–348.

10. Grace J. R. Fluidized beds as chemical reactors, in gas fluidization technology. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1986. 428 p.
11. Куний Д., Левеншпиль О. Промышленное псевдоожигение: пер. с англ. М.: Химия, 1976. 448 с.
12. Fryer C. C., Potter O. E. Experimental investigation of models for fluidized bed catalytic reactors. *AIChE Journal*. 1976. Vol. 22. P. 38–47.
13. Werther J. Mathematical modeling of fluidized bed reactors. *International chemical engineering*. 1980. Vol. 20. P. 529–541.
14. Werther J. Mathematische Modellierung von Wirbel schichtreaktoren. *Chemie Ingenieur Technik*. 1978. Vol. 50, N 11. P. 850–860.
15. Kato K., Wen C. Y. Bubble assemblage model for fluidized bed catalytic reactors. *Chemical Engineering Science*. 1969. Vol. 24. P. 1351–1369.
16. Davidson J. F. Symposium on Fluidization — Discussion. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1961. Vol. 39. P. 230–232.
17. Kobayashi H., Arai F., Sunawaga T. Fluidization models. *Chemical Engineering Tokyo*. 1967. Vol. 31. P. 239.
18. Grace J.R. Contacting modes and behaviour classification of gas-solid and other two-phase suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1986. Issue 64. P. 353–363.
19. Stringer J. Is a fluidized bed a chaotic dynamic system. 10th International Conference on Fluidized Bed Combustion, ASME, New York, USA, 1989. P. 265–272.
20. Новиков В. В., Корниенко Б. Я., Сомлев А. А. Математическая модель процесса гранулирования в псевдосжиженном слое с использованием теории фрактальных множеств. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2008. № 3. С. 196–200.
21. Korniyenko B. Y. Modeling of transport processes in disperse systems. *The Advanced Science Journal*. 2013. Issue 1. P. 7–10.
22. Корнієнко Б. Я. Математичне моделювання динаміки процесів переносу при зневодненні та гранулюванні у псевдозрідженому шарі. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2012, № 4(53). С. 84–90.
23. Корнієнко Б. Я. Інформаційні технології оптимального управління виробництвом мінеральних добрив: монографія. К. : Вид-во Аграр Медіа Груп, 2014. 288 с.

The basic approach to mathematical modeling of transport processes in a fluidised bed, classification models for interfacial interaction types, subject to stochastic and chaotic hydrodynamics and classification processes in the apparatus with a fluidized bed of their properties for hydrodynamic models.

Key words: *mathematical modeling, two-phase model, hydrodynamic model, stochastic approach, chaotic hydrodynamics.*

Одержано 17.02.2017