

WOJCIECH SOBIESKI

Wydział Nauk Technicznych, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn

Wybrane zagadnienia numerycznego modelowania złoża fluidalnego w fontannowej suszarce do ziarna

Wprowadzenie

W literaturze znaleźć można dziesiątki wariantów równań zachowania złożeń fluidalnych. Jak dotąd nie opracowano w tym zakresie jednolitej teorii, a dopasowanie modelu symulacyjnego do wyników eksperymentów odbywa się poprzez manipulowanie modelami jednostkowymi, uściślającymi ogólny model matematyczny ośrodka dwufazowego. Po przeglądzie literatury przedmiotu można zadać pytanie: Czy obecnie najczęściej stosowana konfiguracja zestawu formuł obliczeniowych wykorzystywana do modelowania złożeń fontannowych jest optymalna? Być może niektóre inne elementy teorii ośrodków typu *fluid-solid* są ogólnie lub też tylko w pewnych zastosowaniach korzystniejsze. Aspekt ten stanowił motywację do podjęcia prezentowanych tu badań. Głównym celem było wytypowanie innych, niż ogólnie przyjęte, zestawów formuł, dla których wyniki symulacji numerycznych są zgodne z wynikami eksperymentu. Eksperymenty, będące podstawą opracowania modelu komputerowego opisane zostały między innymi w pracach [1–3].

Model matematyczny złoża fluidalnego

Do opracowania komputerowego modelu dynamiki złoża w fontannowej suszarce do ziarna wykorzystano tzw. wielofazowy model *Eulera* (WME). Jest to model przeznaczony do opisu mieszanin dowolnej liczby faz: gazów, cieczy i cząstek stałych. Dla każdej z faz rozwiązywany jest oddzielny układ równań bilansowych. Sprzęganie faz odbywa się poprzez ciśnienie oraz międzyfazowe współczynniki wymiany masy i pędu. WME opiera się bilansie masy i pędu [2–4]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_q \rho_q) + \nabla(\epsilon_q \rho_q \bar{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{m,q} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_q \rho_q \bar{v}_q) + \nabla(\epsilon_q \rho_q \bar{v}_q \otimes \bar{v}_q) = \nabla(\bar{\tau}_q^c - \epsilon_q p \bar{I} - p_s \bar{I}) + \bar{R} + \bar{S}_{F,q} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

- ϵ_q – udział objętościowy q -tego składnika [–],
- \bar{v}_q – prędkość q -tego składnika [m/s],
- ρ_q – gęstość q -tego składnika [kg/m³],
- \dot{m}_{pq} – masa przekazywana od składnika p do składnika q [kg/m³s],
- \dot{m}_{qp} – masa przekazywana od składnika q do składnika p [kg/m³s],
- $S_{m,q}$ – źródło masy q -tego składnika [kg/m³s],
- $\bar{\tau}_q^c$ – całkowity tensor naprężeń q -tego składnika [Pa],
- p – ciśnienie statyczne mieszaniny [Pa],
- p_s – ciśnienie granulatu [Pa],
- \bar{I} – tensor jednostkowy [–],

\bar{R} – pęd wymieniany między fazami w trakcie ruchu [N/m³],

$\bar{S}_{F,q}$ – siły źródłowe działające na q -ty składnik. [N/m³].

Wymianę pędu między składnikami przepływu można opisać następującą formułą [3]

$$\bar{R} = \sum_{p=1}^n (\bar{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \bar{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \bar{v}_{qp}) \quad (2)$$

gdzie

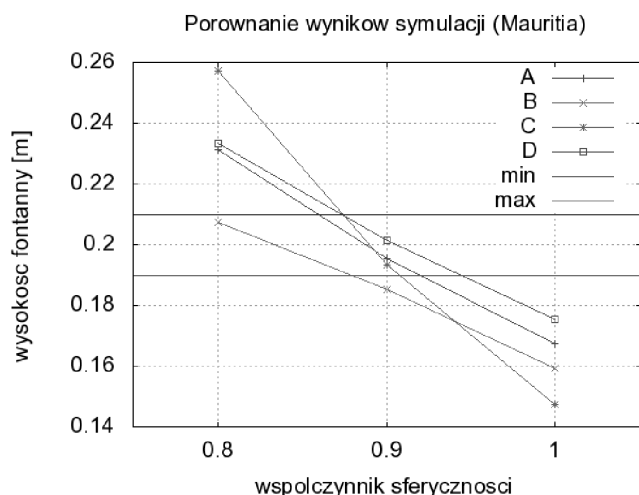
\bar{v}_{pq} – jest to prędkość międzyfazowa [m/s],
zaś \bar{R}_{pq} siła interakcji między fazami p i q [N/m³], zdefiniowana jako [3]

$$\sum_{p=1}^n \bar{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n \beta_{pq} (\bar{v}_p - \bar{v}_q) \quad (3)$$

Występujący tu współczynnik międzyfazowej wymiany pędu β_{pq} [kg/(m³s)] jest jednym z najważniejszych składowych modelu matematycznego.

Zagadnienia szczegółowe

- Podczas definiowania modelu symulacyjnego należy określić:
- model międzyfazowej wymiany pędu. W złożach fontannowych najczęściej stosuje się tzw. model *Gidaspowa* (1994) [5, 6]. Oprócz modelu *Gidaspowa* można stosować modele: *Syamlal-O'Briena* [7], *Wen-Yu* [7], *Di Felice* [7, 8], *Erguna* [9, 10], *Ma-Ahmadi* [11], *Foscolo-Gibilaro* [7], *Kocha-Hilla* [12] i inne.
 - formułę opisującą lepkość kinetyczną granulatu. W WME dynamikę granulatu opisuje się wykorzystując analogię do ośrodka gazowego. Takie podejście wymaga zdefiniowania nowych pojęć – jednym z nich jest lepkość kinetyczna granulatu. Najczęściej wyznacza się ją z formuł *Syamlal-O'Briena* lub *Gidaspowa* [13, 14].
 - formułę opisującą ciśnienie granulatu (również wynika z zastosowania teorii gazów). Najczęściej stosuje się wzory *Lun et al*, *Ma-Ahmadi* lub *Syamlal-O'Briena* [4, 13, 15].
 - formułę opisującą opór otoczenia (występująca w niektórych wzorach na współczynnik międzyfazowej wymiany pędu). Najczęściej stosuje się wzór *Schillera-Neumana* [9, 11], rzadziej formuły *Ihme* lub *Dalla Valle* [16].
 - funkcję przełączającą (dotyczy modelu *Gidaspowa*). Stosuje się ją w celu wygładzenia przejścia pomiędzy wzorami składowymi modelu *Gidaspowa*. W literaturze spotyka się najczęściej formułę zaproponowaną przez *Gidaspowa* [4, 17].
 - współczynnik sferyczności (dla granulatu niesferycznego) [11, 15].

**konfiguracja A:**

model oporu: Syamlal-O'Brien
lepkość kinetyczna: Syamlal-O'Brien

konfiguracja B:

model oporu: Gidaspow
lepkość kinetyczna: Syamlal-O'Brien

konfiguracja C:

model oporu: Ma-Ahmadi
lepkość kinetyczna: Gidaspow

konfiguracja D:

model oporu: Ergun
lepkość kinetyczna: Gidaspow

min, max – minimalna i maksymalna wysokość fontanny obserwowana w eksperymentach

Rys. 1. Zestawienie konfiguracji modeli matematycznych, dla których wyniki symulacji komputerowych są zgodne z wynikami eksperymentu w zakresie wysokości fontanny

Podsumowanie

Liczne symulacje komputerowe (nie obejmujące jednak wszystkich możliwości), wykonane przy różnych konfiguracjach modeli i formuł obliczeniowych doprowadziły do uzyskania czterech wariantów optymalnych, dających wyniki zgodne z wynikami eksperymentów w zakresie wysokości fontanny (Rys. 1). We wszystkich przypadkach współczynnik oporu wyliczany był z formuły *Schillera-Neumana*, ciśnienie granulat z formuły *Lun et al.*, zaś wartość funkcji przełączającej z autorskiej formuły opartej na funkcji wykładniczej.

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

- Model *Gidaspowa* nie jest jedynym modelem interakcji dającym poprawne wyniki w modelowaniu złożeń fluidalnych w fontannowych suszarkach do ziarna,
- W modelu *Gidaspowa* można zaproponować nowe formuły wyliczania funkcji przełączającej dające większe możliwości konfiguracji modelu symulacyjnego,
- W odniesieniu do ziarna jęczmienia kluczową kwestią pozwalającą na wyregulowanie wysokości fontanny jest odpowiedni dobór wartości współczynnika sferyczności – wrażliwość *Wielofazowego Modelu Eulera* na ten parametr jest bardzo duża,
- Istnieje możliwość definicji współczynnika sferyczności w oparciu o standardowe wskaźniki kształtu – znane z literatury, lecz jak dotąd nie używane w odniesieniu do złożeń fontannowych.

LITERATURA

1. M. Markowski, W. Sobieski, I. Konopka, M. Tańska, I. Białobrzewski: *Drying Technology*, 25: 1621 (2007).
2. W. Sobieski: *Annual Review of Agricultural Engineering*, 5, nr 1, 2006.
3. W. Sobieski: *Task Quarterly* 12, No. 1 (2008).
4. W. Zhonghua, S. Mujumdar: *Drying Technology*, 25, 59 (2007).
5. C.R. Duarte, V.V. Murata, M.A.S. Barrozo: *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22, nr 2, 263 (2005).
6. W. Zhong, M. Zhang, J. Baoshehg, Y. Zhulin: *Chinese J. Chem. Eng.*, 14 nr 5, 611 (2006).
7. C.H. Ibsen: *An Experimental and Computational Study of Gas-Particle Flowing Circulating Fluidised Reactors*. Ph.D.thesis, Esbjerg (Denmark), 2002.
8. K.D. Kafui, C. Thornton, M.J. Adams: *Chemical Engineering Science*, 57, 2395 (2002).
9. L.C. Gomez, F.E. Milioli: *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 21, nr 4, 569 (2004).
10. R.K. Niven: *Chemical Engineering Science*, 57, 527 (2002).
11. R.A. Bell: Ph.D.thesis. School of Mechanical and Manufacturing Engineering Swinburne University of Technology, 31 August 2000.
12. J.M. Link, L.A. Cuypers, N.G. Deen, J.A.M. Kuipers: *Chemical Engineering Science*, 60, 3425 (2005).
13. C.R. Duarte, V.V. Murata, M.A.S. Barrozo: *Study of the spouted bed fluid dynamics using cfd*. *Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, São Paulo, Brazil, vol. A 581, 2004.
14. J. Dufek, G.W. Bergantz: *J. of Volcanology and Geothermal Research*, 143, nr 1–3, 113 (2005).
15. B.H. Hjertager, T. Solberg, K.G. Hansen: *Fourth International Conference on CFD in the Oil and Gas, Metallurgical & Process Industries SINTEF / NTNU Trondheim, Norway*, 2005.
16. O. Owoyemi, L. Cammarata, P. Lettieri, D. Colman: URL: <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/aiche-2004/pdf-files/papers/288a.pdf> (2007-04-12)
17. D. Lathouwers, J. Bellan: *Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review*, NREL/CP-570-30535, 2001.