

Monika MUSIAŁ, Joanna KARCZ

e-mail: joanna.karcz@zut.edu.pl

Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny, Szczecin

Ocena wpływu modelu burzliwości na wyniki symulacji numerycznych przepływu dwufazowego ciecz-gaz w zbiorniku z mieszadłem CD 6

Wstęp

Modelowanie procesów przenoszenia z zastosowaniem metod numerycznej mechaniki płynów CFD umożliwia uzyskanie rozkładów wielkości opisujących wymianę pędu i masy [Jaworski, 2005], między innymi w takich aparatach jak bioreaktory zaopatrzone w mieszadła mechaniczne. W przypadku burzliwego przepływu płynu w aparacie na układ równań rozwiązywany numerycznie składają się różniczkowe równania transportu uzupełnione o równania odpowiadające przyjętemu w obliczeniach modelowi burzliwości. Spośród proponowanych w literaturze przedmiotu [Ranade, 2002] modeli burzliwości często korzysta się z modelu $k-\varepsilon$, zawierającego dwa równania opisujące przenoszenie kinetycznej energii burzliwości k oraz szybkości jej dyssypacji ε . Ten model zakłada izotropowość lepkości burzliwej. Model burzliwości SST (*Shear Stress Transport*) jest modyfikacją modelu $k-\omega$ (gdzie ω oznacza dyssypację właściwą, wyrażoną w 1/s) i łączy w sobie zalety, którymi charakteryzuje się model $k-\omega$ w modelowaniu obszarów przyściennych z zaletami modelu $k-\varepsilon$ w modelowaniu przepływu w objętości płynu [Domański, 2014].

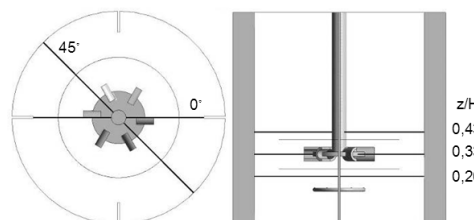
Istotnym czynnikiem, warunkującym poprawny przebieg operacji mieszania, jest dobór odpowiedniego typu mieszadła [Stręk, 1981]. W mieszanych mechanicznie układach ciecz-gaz mieszadło powinno zapewniać w miarę równomierne rozproszenie fazy gazowej w cieczy [Kamieński, 2004], a także spełniać inne warunki w zależności od rodzaju procesu. W układach biologicznych ważne jest, aby zapewnić odpowiednio niski poziom naprężeń ścinających w mieszanym płynie. Do takich procesów zalecane jest między innymi mieszadło CD 6 (mieszadło *Smitha* [Smith i Katsanevakis, 1993]), które różni się od mieszadła *Rushtona* zakrzywieniem łopatek mieszadła (krzywizna łopatki o promieniu $R = b/2$, gdzie b jest szerokością łopatki mieszadła [Musiał i in., 2014]).

Badania przedstawione w tej pracy miały na celu ocenę wpływu zastosowanego w obliczeniach modelu burzliwości na wyniki symulacji numerycznych CFD przepływu dwufazowego wodny roztwór sacharozy – powietrze w zbiorniku z mieszadłem CD 6.

Zakres symulacji numerycznych

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla układu ciecz-gaz mieszanego w płaskodennym zbiorniku cylindrycznym (Rys. 1) o średnicy wewnętrznej $D = 0,288$ m, wyposażonym w cztery standardowe przegrody oraz mieszadło CD 6 (turbinowe *Smitha* o średnicy $d = 0,33D$, z sześcioma wklęsłymi łopatkami ($Z = 6$), zawieszzone na wysokości $h = 0,33D$). Wysokość słupa płynu w bioreaktorze wynosiła $H = D$. Powietrze doprowadzono do układu za pomocą pierścieniowego dystrybutora gazu umieszczonego pod mieszadłem w odległości $e = 0,5h$.

Obliczenia przeprowadzono w zakresie przepływu burzliwego dla wodnego roztworu o stężeniu sacharozy wynoszącym 5 % mas. przy zadanej wartości częstości obrotów mieszadła $n = 12$ 1/s oraz natężeniu przepływu powietrza $V_g = 3,89 \cdot 10^{-4}$ m³/s. Symulacje numeryczne przeprowadzono na platformie *ANSYS Workbench* (*ANSYS, 15*) przy pomocy solwera *CFX 15* stosując w obliczeniach jeden z dwóch modeli burzliwości dla fazy ciągłej: $k-\varepsilon$ lub SST . Domeny obliczeniowe skonstruowano w *ANSYS Design-Modeler*. Siatka numeryczna, stworzona w oprogramowaniu *ANSYS Mesh*, składała się z dwóch obszarów: strefy obejmującej mieszadło oraz strefy obejmującej pozostałą część zbiornika. Podział nastąpił ze względu

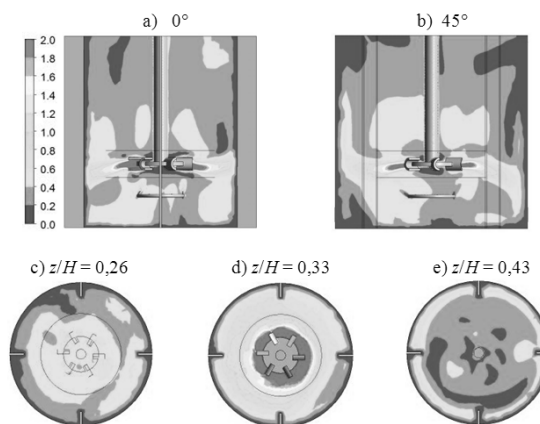


Rys. 1. Przekroje zbiornika z przegrodami i mieszadłem CD 6 z zaznaczonymi współrzędnymi: osiowymi $z/H = 0,26; 0,33$ lub $0,43$ oraz kątowymi 45° lub 0°

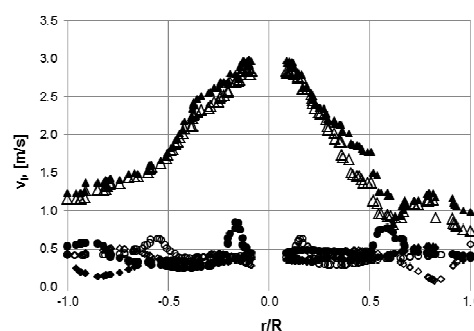
na zastosowanie układu wielokrotnego odniesienia (*MRF*). Niestrukuralna siatka numeryczna dla zbiornika z przegrodami oraz mieszadłem CD 6 zawierała ponad 920000 elementów tetrahedralnych. Do modelowania rozkładu wielkości pęcherzy gazu zastosowano model *MUSIG* (*Multiple Size Group*). Symulacje numeryczne wykonywano do momentu osiągnięcia poziomu zbieżności na poziomie 10^{-4} .

Wyniki obliczeń

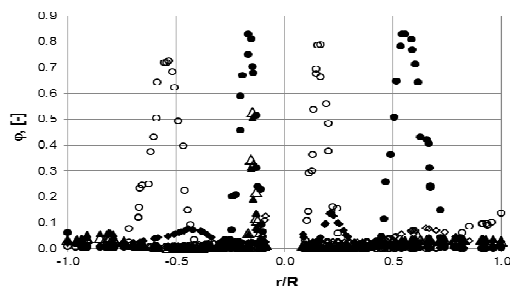
Wyniki obliczeń opracowano w postaci konturów i rozkładów takich wielkości, jak: prędkość cieczy (Rys. 2 i 3), udział gazu zatrzymanego w cieczy (Rys. 4), rozmiar pęcherzy gazowych (Rys. 5) w płaszczyznach osiowych i promieniowych mieszalnika.



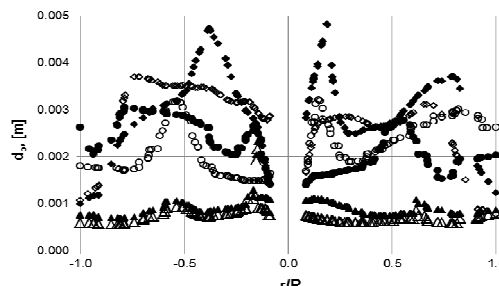
Rys. 2. Kontury prędkości cieczy [m/s] dla układu ciecz-gaz w dwóch płaszczyznach osiowych (a, b) oraz trzech płaszczyznach promieniowych (c, d, e) $z/H = \text{const}$; model burzliwości SST



Rys. 3. Porównanie promieniowych rozkładów prędkości cieczy v_r dla zadanej wartości współrzędnej $z/H = \text{const}$, uzyskanych przy zastosowaniu dwóch różnych modeli burzliwości: $k-\varepsilon$ (punkty pełne) lub SST (punkty puste); $z/H = 0,26$ (○), $0,33$ (Δ), $0,43$ (◊); współrzędna kątowa 0°



Rys. 4. Porównanie promieniowych rozkładów udziału ϕ gazu zatrzymanego w cieczy dla zadanej wartości współrzędnej $z/H = \text{const}$, uzyskanych przy zastosowaniu dwóch różnych modeli burzliwości: $k-\epsilon$ (punkty pełne) lub SST (punkty puste); $z/H = 0,26$ (○); $0,33$ (Δ); $0,43$ (◇); współrzędna kątowa 0°



Rys. 5. Porównanie promieniowych rozkładów średniego rozmiaru d_b pęcherzy gazu dla zadanej wartości współrzędnej $z/H = \text{const}$, uzyskanych przy zastosowaniu dwóch różnych modeli burzliwości: $k-\epsilon$ (punkty pełne) lub SST (punkty puste); $z/H = 0,26$ (○); $0,33$ (Δ); $0,43$ (◇); współrzędna kątowa 0°

Z analizy konturów prędkości cieczy w układzie ciecz-gaz w płaszczyznach osiowych wynika, że rozkłady tej wielkości zależą od współrzędnej kątowej. W płaszczyźnie 0° (Rys. 2a) rozkłady prędkości cieczy są bardziej symetryczne niż w płaszczyźnie 45° (Rys. 2b) ułożonej między dwiema przeciwległymi przegrodami zbiornika. W płaszczyznach promieniowych usytuowanych na danym poziomie bezwymiarowej współrzędnej osiowej z/H (Rys. 1), najbardziej symetryczne kontury prędkości cieczy odpowiadają wysokości zawieszenia mieszała ($z/H = 0,33$, rys. 2d).

Porównanie ilościowych promieniowych rozkładów prędkości cieczy w układzie ciecz-gaz, przedstawionych na rys. 3, wskazuje, że największe wartości tej wielkości odpowiadają poziomowi zawieszenia mieszała ($z/H = 0,33$). Profile prędkości dla tej współrzędnej osiowej opadają wraz ze wzrostem bezwymiarowej współrzędnej promieniowej r/R ($R = D/2$; r – współrzędna promieniowa). Profile prędkości cieczy na poziomach poniżej ($z/H = 0,26$) i powyżej mieszała ($z/H = 0,43$) leżą na rys. 3 poniżej rozkładów prędkości dla $z/H = 0,33$, są bardzo spłaszczone i mają podobne wartości w całym zakresie współrzędnej promieniowej r/R . W przypadku wszystkich trzech wartości współrzędnej z/H praktycznie nie ujawnia się wpływ zastosowanego w obliczeniach modelu burzliwości na wartość prędkości cieczy w układzie dwufazowym.

Wpływ modelu burzliwości ujawnia się natomiast w przypadku, przedstawionych na rys. 4, promieniowych rozkładów udziału ϕ gazu zatrzymanego w cieczy określonych na poziomie poniżej zawieszenia mieszała (dla wartości współrzędnej osiowej $z/H = 0,26$). Obserwuje się dla obu modeli $k-\epsilon$ oraz SST charakterystyczną asymetryczność pików względem wału mieszała ($r/R = 0$), przy czym są one przesunięte w prawo w przypadku zastosowania modelu $k-\epsilon$, a w lewo – w przypadku modelu SST .

Zastosowany w obliczeniach numerycznych model burzliwości wpływa również na przebieg promieniowego rozkładu średniego rozmiaru d_b pęcherzyków gazu dla zadanej wartości współrzędnej osiowej z/H , o czym świadczą profile $d_b = f(r/R)_{z/H = \text{const}}$ zamieszczone na rys. 5. Największe zróżnicowanie rozmiarów pęcherzyków gazu występuje w strefie ułożonej powyżej mieszała ($z/H = 0,43$), otrzymanych przy użyciu modelu burzliwości $k-\epsilon$.

W porównaniu z tymi danymi profile $d_b = f(r/R)$ dla tej współrzędnej uzyskane przy założeniu modelu SST są nieco bardziej spłaszczone. Charakterystyczne jest również, że na wysokości zawieszenia mieszała ($z/H = 0,33$) średnie rozmiary pęcherzyków

mają najmniejsze wartości, przy czym są one niezależne od rodzaju modelu burzliwości użytego w obliczeniach numerycznych.

Uśrednione promieniowe wartości rozmiaru d_b pęcherzyków gazu w zakresie $-1 < r/R < 1$ dla danej wartości bezwymiarowej współrzędnej osiowej $z/H = \text{const}$ oraz danego modelu burzliwości zestawiono w tab. 1. Z porównania tych danych wynika, że dla każdej wartości współrzędnej z/H większe wartości d_b otrzymuje się dla modelu $k-\epsilon$ niż SST . W tab. 1 podane są także uśrednione dla całej objętości aparatu wartości rozmiaru pęcherzyków gazu d_{bm} oraz uśrednione wartości udziału gazu zatrzymanego w cieczy ϕ_m . W przypadku modelu $k-\epsilon$ otrzymano nieco większe wartości d_{bm} oraz nieco mniejsze wartości udziału ϕ_m w porównaniu z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu modelu SST . Numerycznie określone wartości udziału gazu ϕ_m z użyciem modelu $k-\epsilon$ są zgodne z własnymi wynikami eksperymentalnymi. Jak pokazują dane w tab. 1, ta zgodność jest znacznie gorsza w przypadku zastosowania w obliczeniach modelu burzliwości SST .

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych symulacji można sformułować następujące wnioski obowiązujące w zakresie przeprowadzonych obliczeń:

- wpływ modeli burzliwości $k-\epsilon$ oraz SST na rozkłady prędkości cieczy w układzie ciecz-gaz jest nieznaczny,
- udział gazu zatrzymanego w cieczy w strefie pod mieszałem, a także średni rozmiar pęcherzy gazu w strefie nad mieszałem znacząco zależą od przyjętego w obliczeniach modelu burzliwości.

OZNACZENIA

- d – średnica mieszała, [m]
- D – wewnętrzna średnica mieszalnika, [m]
- d_b – średni rozmiar pęcherzy gazu, m
- H – wysokość słupa mieszaniny ciecz-biofaza w mieszalniku, [m]
- n – częstość obrotów mieszała, [1/s]
- V_g – objętościowe natężenie przepływu gazu, [m³/s]
- v_l – prędkość cieczy, [m/s]
- ϕ – udział gazu zatrzymanego w cieczy, [-]

LITERATURA

- ANSYS® Academic Research, Release 15.0, Help System, CFX, Modeling Guide, ANSYS, Inc.
- Domański M., 2014. *Numeryczna i eksperymentalna analiza procesów przenoszenia w mieszalniku z niecentrycznym mieszałem szybkoobrotowym*. Praca doktorska, ZUT, Szczecin
- Jaworski J., 2005. *Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej*. EXIT, Warszawa
- Kamiński J., 2004. *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa
- Musiał M., Karcz J., Cudak M., 2014. Zastosowanie metody CFD do analizy hydrodynamiki w mieszalniku z przegrodami i mieszałem CD 6. *Przem. Chem.*, **93**, 9, 1599-1603. DOI: 10.12916/przemchem.2014.1599
- Ranade V.V., 2002. *Computational flow modeling for chemical reactor engineering*, Academic Press, San Diego
- Smith J.M., Katsanevakis A.N., 1993. Impeller power demand in mechanically agitated systems. *Chem. Eng. Res. Des.*, **71**, Part A, 145-152
- Stręk F., 1981. *Mieszanie i mieszalniki*. WNT, Warszawa

Tab. 1. Porównanie wyników obliczeń numerycznych i eksperymentalnych

	$d_b \cdot 10^3$, [m]		
	$z/H = 0,26$	$z/H = 0,33$	$z/H = 0,43$
Model $k-\epsilon$	2,35	0,83	3,08
Model SST	2,11	0,73	2,79
Średnie wartości	Model $k-\epsilon$	Model SST	Eksperyment
$d_{bm} \cdot 10^3$, [m]	2	1,95	–
$\phi_m \cdot 10^2$	6,99	10,1	6,89
Błąd względny, [%]	1,45	46,6	–