

ZDZISŁAW JAWORSKI
HALINA MURASIEWICZ

Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Szczecińska, Szczecin

Niestacjonarne modelowanie fluktuacji przepływu dwufazowego ciecz-ciecz w mieszalniku statycznym typu *Kenics*

Wprowadzenie

Przepływy turbulenty są bardzo powszechnym procesem występującym naturalnie w przyrodzie jak i w zastosowaniach technicznych. Tematyce tej poświęcono wiele uwagi o czym świadczy bardzo duża liczba prac, z których na wyróżnienie zasługują monografie [1, 2]. W ostatniej dekadzie dokonano znaczącego rozwoju badań burzliwości, co umożliwiła numeryczna mechanika płynów (CFD) będąca doskonałym uzupełnieniem i rozszerzeniem badań eksperymentalnych. Jednak istnieją jeszcze obszary, które w dalszym ciągu wymagają zaawansowanych badań. Jednym z nich jest modelowanie przepływu burzliwego dwufazowego typu ciecz-ciecz w mieszalniku statycznym. Dotychczas posilkowano się technikami RANS lub LES i w niewielkim stopniu DNS przy analizie procesu przepływu burzliwego. Techniki te umożliwiają w sposób zadawalający opisanie charakteru przepływów turbulentnych. Jednak wykorzystując wyżej wymienione metody napotkać można kilka barier. Dlatego na przełomie ostatnich lat podjęto badania nad nowym sposobem opisu turbulencji przepływu metodą symulacji niestacjonarnych RANS.

W pracy przedstawiono wyniki modelowania przepływu burzliwego dwufazowego ciecz-ciecz, wykorzystując podejście *Large Eddy Simulation* (LES) oraz *Unsteady (Transient) Reynolds Averaged Navier-Stokes* (URANS, T-RANS) dla stanu nieustalonego w mieszalniku statycznym typu *Kenics*. Analiza taka jest ważna w szczególności przy projektowaniu urządzeń, w których zachodzi zmienny w czasie proces mieszania dwóch cieczy. Zastosowanie symulacji niestacjonarnych pozwala na uzyskanie obrazu przepływu cieczy oraz, co jest bardzo istotne, pozwala określić proporcje i parametry wykorzystywanych cieczy tak, aby uzyskać jednolitą emulsję. Symulacje wielkowirowe w szerokim zakresie opisane są w pracach [3, 4]. Podejście URANS, według autorów [5], jest alternatywą dla metod LES i DNS, albowiem zmniejsza czas obliczeń poprzez zastosowanie prostszego modelu. Ograniczeniem tej alternatywy jest możliwość porównania wyników symulacji tych metod tylko dla bardzo dużych fluktuacji w skali nadsiatkowej. W otwartej literaturze nie spotkano dotychczas pracy poświęconej modelowaniu URANS w mieszalnikach statycznych w odniesieniu do przepływu dwufazowego ciecz – ciecz. Znaleźć można natomiast prace, w których autorzy opisują zastosowanie metody URANS w odniesieniu do innych obiektów [6]. Metoda ta została przedstawiona w dostępnych pracach jako wysoko obiecujące modelowanie przepływu turbulenty [7]. Skłoniło to autorów niniejszej pracy do porów-

kania obu tych metod symulacyjnych URANS i LES w odniesieniu do modelowania przepływu dwóch cieczy w mieszalniku statycznym typu *Kenics*.

Model matematyczny

W literaturze [1] spotkać można kilka sposobów modelowania przepływów wielofazowych. Autorzy w prezentowanych tu badaniach wykorzystali pseudoheterogeniczne podejście eulerowskie, które w komercyjnym kodzie *Fluent* zdefiniowane jest jako *Mixture Model*. Poszczególne równania różniczkowe transportu zdefiniowane w programie *Fluent* przedstawiono w poprzedniej pracy autorów [8].

Jednym z założeń modelu *mixture* jest stała wartość rozmiaru kropeł niezależnie od zmian warunków przepływu, którą oszacowano wykorzystując zależność zaproponowaną przez *Chena* i *Libby'ego* [9]. Średnia wartość średnicy *Sautera* wyliczona dla mieszalnika *Kenics* dla następujących parametrów: liczby *Re* = 10 000, liczby *Webera*, *We* = 118,78 oraz stosunku lepkości (μ_d/μ_c) = 0,89 wynosiła $d_{32} = 0,775$ [mm].

Do modelowania przepływu turbulenty zaimplementowano metodę URANS z modelem burzliwości *k-ε* oraz metodę LES z modelem lepkości podsiatkowej *Smagorinsky'ego-Lilly*. W przypadku modelowania niestacjonarnego RANS wykorzystuje się podobne równanie domykające jak w metodzie stacjonarnej RANS zaproponowanej przez *Launera* i *Spaldinga* [10]. Różnica polega na wprowadzeniu do nich członu czasowego i wtedy zmienne zależne są zarówno funkcjami położenia, jak i również czasu.

W metodzie LES lokalne wartości prędkości i udziału objętościowego w równaniach transportu zastąpione zostały przez ich wartości odfiltrowane po części spektrum fluktuacji. W wyniku operacji filtrowania uzyskuje się wyrażenie opisujące naprężenia podsiatkowe [10]. Jednym z najczęściej wykorzystywanych modeli do określania wielkości podsiatkowej lepkości, μ_{SGS} , jest model *Smagorinsky-Lilly*:

$$\mu_{SGS} = \rho(C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (1)$$

gdzie

- ρ – gęstość [kg/m³],
- C_s – stała *Smagorinsky'ego* ($C_s = 0,1$) [5],
- \bar{S} – rozmiar tensora deformacji [1/s],
- Δ – szerokość filtra, [m].

Długość kroku czasowego w iteracjach zdefiniowano, w obu przypadkach tak, aby uzyskać w komórce obliczeniowej zmodyfikowaną konwekcyjną liczbę *Couranta* na poziomie 1/20 [2].

Warunki modelowania

Symulacje numeryczne przepływu dwufazowego przeprowadzono dla mieszalnika *Kenics*, którego geometrię i siatkę blokowo-strukturalną wykonano w programie *Gambit 2.0.4*. Mieszalnik *Kenics* zbudowany był z dziesięciu naprzemiennie ułożonych prawo- i lewoskrętnych wkładek mieszających. Dokładniejsze wymiary mieszalnika oraz pojedynczej wkładki *Kenics* przedstawiono w pracy [8], gdzie średnica mieszalnika wynosiła 25 [mm]. Siatka numeryczna zawierała około 900 tysięcy komórek obliczeniowych.

Obliczenia numeryczne CFD przeprowadzono w programie komercyjnym *Fluent 6.2.16* dla liczby *Reynoldsa* liczonej na pełny przekrój mieszalnika wynoszącej 10 000. Modelowanie przepływu dwufazowego wykonano dla wody, stanowiącej fazę ciągłą, o gęstości $\rho_{H_2O} = 998$ [kg/m³] i lepkości $\mu_{H_2O} = 0,001$ [Pa s], natomiast fazą rozproszoną były krople oleju silikonowego o gęstości $\rho_{olej} = 900$ [kg/m³] i lepkości $\mu_{olej} = 0,0009$ [Pa s]. Faza rozproszona stanowiła 1% objętościowy mieszaniny dwufazowej, podobnie jak w pracy [11].

Modelowanie CFD przeprowadzono dla dwóch podejść symulacyjnych. W ramach każdej symulacji rozpatrywano po 3 przypadki o różnej relacji gęstości fazy ciągłej, ρ_c , i rozproszonej, ρ_d . Relacje gęstości faz przedstawiają się następująco: w przypadku pierwszym $\rho_c = \rho_{H_2O} > \rho_d = \rho_{olej}$, w przypadku drugim $\rho_c = \rho_d = \rho_{olej}$, a w przypadku trzecim $\rho_c = \rho_{olej} < \rho_d = \rho_{H_2O}$. Wyniki symulacji numerycznych LES i URANS porównano w połowie wysokości każdej wkładki *Kenics* dla punktu umieszczonego w odległości promieniowej od osi rury, $R = 0,00625$ [m]. W punkcie tym rejestrowano lokalne wartości prędkości chwilowej składowej osiowej mieszaniny, v_z , oraz inne wielkości charakteryzujące przepływ burzliwy.

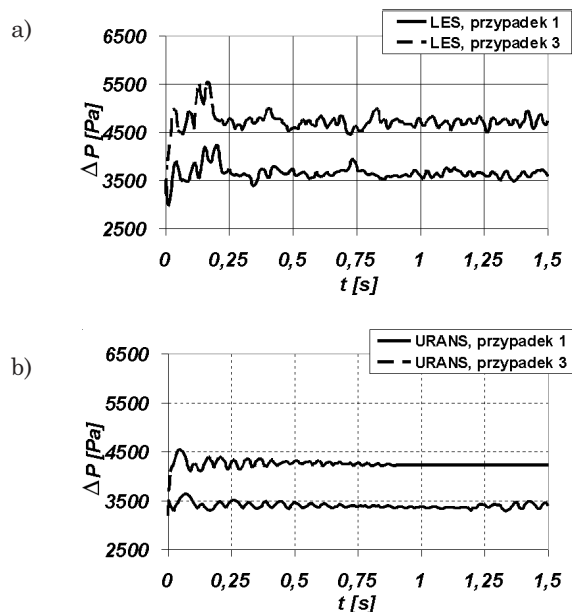
Wyniki modelowania

W przeprowadzonych symulacjach LES i URANS zastosowano standardowe wartości parametrów numerycznych dostępne w kodzie *Fluent 6.2.16* opisane szerzej w pracy [8]. W ramach jednego kroku czasowego, $\delta t = 0,001$ [s], wykonywano 50 wewnętrznych iteracji, a łączny symulowany czas wyniósł $\Delta t = 1,5$ [s], co równa się 1500 krokom czasowym.

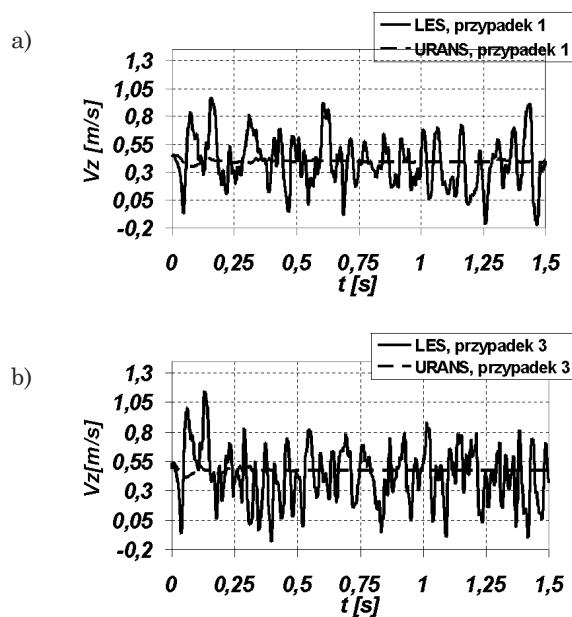
Przeprowadzona analiza numeryczna pozwoliła na określenie poziomu spadków ciśnienia wzdłuż 10 wkładek mieszalnika *Kenics* dla modelowania LES i URANS. Fluktuacje spadku ciśnienia, Δp w funkcji czasu przedstawiono na rys. 1. Zaprezentowano tylko dane dla dwóch przypadków (1 oraz 3) celem zachowania przejrzystości.

Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że podobnie jak prędkość, przewidywane spadki ciśnienia również fluktuują w czasie. Najmocniej widoczne jest to dla symulacji LES, które dały znacznie większe wartości fluktuacji Δp niż URANS. W przypadku modelowania LES zauważono w początkowym etapie bardzo silne odchylenia, które zmniejszają się wraz z czasem. W modelowaniu URANS występują obszary (Rys 1b), w których fluktuacje spadków ciśnienia praktycznie nie są obserwowalne. W modelowaniu LES, jak i w URANS, wartości Δp osiągnęły zbliżony poziom w granicach $\pm 10\%$.

Na podstawie uzyskanych z symulacji wartości prędkości składowej osiowej, v_z oceniono poziom fluktuacji prędkości w czasie (Rys. 2) dla obu podejść. Porównując lokalne prędkości dla symulacji LES i URANS zaobserwowano również



Rys. 1. Spadki ciśnienia wzdłuż długości mieszalnika *Kenics* dla modelowania LES (1a) i URANS (1b), przypadek 1 i 3, $Re = 10\,000$



Rys. 2. Zmiany wartości prędkości osiowej w czasie uzyskanych na drodze modelowania CFD dla metody LES i URANS, przypadek 1 i 3 (2a) i 3 (2b), $Re = 10\,000$

znaczącą różnicę w ich poziomie. Fluktuacje prędkości uzyskane dla URANS były wyraźnie mniejsze niż dla LES.

Porównując wyniki symulacji dla tych dwóch technik zauważono, iż podejście URANS daje znacznie niższy poziom przewidywanej fluktuacji przepływu i przypuszczalnie jest mniej efektywne od metody LES przy próbie opisu przepływu turbulentnego.

Wnioski

Zaprezentowane wyniki symulacji stanowią podstawę do porównania modelowania fluktuacji przepływu burzliwego dwufazowego ciecz – ciecz wykorzystując podejście URANS z modelem burzliwości $k-\epsilon$ oraz LES z modelem *Smagorinsky-Lilly*.

Przeprowadzone symulacje numeryczne dla tego typu przepływu pozwoliły stwierdzić, że:

- obie metody można wykorzystywać do prognozowania struktury fluktuacji warunków hydrodynamicznych wewnątrz mieszalnika *Kenics*, ale metoda LES oddaje bardziej realistyczny przebieg,
- poziom przewidywanych fluktuacji prędkości jak i również spadków ciśnienia w modelowaniu URANS był znacznie niższy w LES przy zastosowaniu tych samych parametrów,
- po upływie pierwszego okresu niestabilności prędkości symulowanych sposobem URANS, duże fluktuacje wygasły, co ma związek prawdopodobnie z wysokimi wartościami lepkości efektywnej,
- modelowanie URANS z zaproponowanej formie raczej nie powinno być wykorzystywane do opisu oscylacji przepływu burzliwego.

L I T E R A T U R A

1. *G. Hewitt, J. Vassilicos*: Prediction of turbulent flows, Cambridge University Press, 2005.
2. *S. Pope*: Turbulent flows, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
3. *B. Geurts*: Elements of direct and large eddy simulation, Edwards Inc. 2003.
4. *P. Sagaut*: Large eddy simulation for incompressible flows, Springer-Verlag, Berlin 2002.
5. *M. Sobera*: Flow, heat and mass transfer through protective textiles, Phd, TU Delft, 2006.
6. *S. Kenjeres, K. Hanjalic*: Intern. Journal of Heat and Fluid Flow, **27**, nr 5, 800 (2006).
7. *E. Labourasse, P. Sagaut*: J. Comp. Phys., **192**, 301 (2002).
8. *Z. Jaworski, H. Murasiewicz, P. Pianko-Oprych, M. Baker*: Proc. 10th Intern. Conf. Multiphase Flow in Ind. Plant, Tropea, Italy, 2006, 161-170.
9. *S. Chen, D. Libby*: Paper presented at the 71st Annual AIChE Meeting, 1978.
10. *B. Launder, D. Spalding*: Mathematical models of turbulence, Academic Press Inc., London 1972.
11. *A. Pacek, Aylianawati, A. Nienow*: Proc. 3rd Intern. Symp. on Mixing in Ind. Proc., Osaka, Japan, 1999, 115-122.