

Jan TALAGA<sup>1</sup>, Ryszard WÓJTOWICZ<sup>1</sup>

e-mail: jtalaga@pk.edu.pl

Katedra Aparatury Przemysłowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

## Analiza wyników modelowania numerycznego i badań doświadczalnych hydrodynamiki przepływu cieczy w mieszalniku

### Wstęp

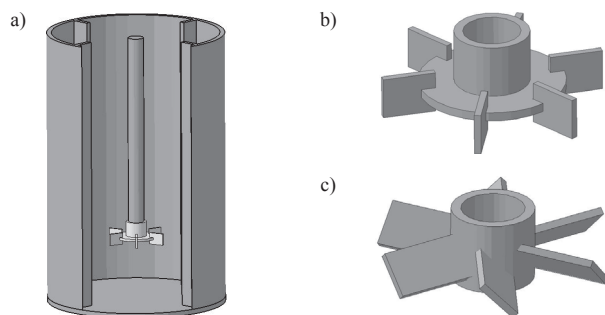
Programy symulacyjne oparte na kodach numerycznej mechaniki płynów (CFD) są przydatnym narzędziem wykorzystywanym podczas konstruowania aparatury przemysłowej [1, 2]. Przeprowadzenie wstępnych symulacji numerycznych pracy aparatu już w początkowym etapie jego projektowania w dużym stopniu upraszcza i ogranicza zakres niezbędnych działań projektowych, pozwala również na szczegółową analizę jego działania nie tylko w skali laboratoryjnej, ale również w skali przemysłowej.

Należy jednak pamiętać, że wyniki modelowania komputerowego powinny być zawsze weryfikowane w oparciu o dane pochodzące z realnego eksperymentu. Dopiero ich zgodność z wynikami badań doświadczalnych jest wyznacznikiem poprawności stosowanej metody.

W ramach pracy wykonano modelowanie numeryczne CFD i pomiary anemometryczne LDA hydrodynamiki przepływu cieczy w mieszalniku mechanicznym z wysokoobrotowym mieszadłem turbinowym, generującym promieniowy lub osiowy przepływ w aparacie. Obserwowano charakter zmian parametrów opisujących przepływ cieczy oraz porównano wyniki ilościowe uzyskane metodą symulacji numerycznych z wynikami badań doświadczalnych.

### Zakres prowadzonych badań

Modelowanie i badania doświadczalne przeprowadzono dla mieszalnika mechanicznego pokazanego na rys. 1a. Składał się on z cylindrycznego zbiornika o średnicy wewnętrznej  $D = 0,286$  [m] zamkniętego od góry pokrywą, wewnątrz którego znajdowało się mieszadło. Badano dwa różne typy mieszadeł – turbinowe tarczowe Rushtona z prostymi łopatkami (Rys. 1b) oraz turbinowe o łopatkach pochylonych pod kątem  $\alpha = 45^\circ$ , tłoczące ciecz w dół (Rys. 1c). Średnica mieszadła wynosiła zawsze  $d = D/3$  a jego odległość od dna  $h = d$ . Wewnątrz zbiornika umieszczono symetrycznie cztery płaskie, pełnej długości przegrody o standardowej szerokości  $B = D/10$ . Cieczą modelową, która wypełniała zbiornik do wysokości  $H = D$ , był sulfotlenek dwumetylu ( $\rho = 1100$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\eta = 0,0023$  [Pa·s]). Częstość obrotów mieszadła wynosiła  $n = 300$  [1/min], co odpowiadało w pełni rozwiniętemu ruchowi burzliwemu  $Re_m = 2,16 \cdot 10^5$ .



Rys. 1. Mieszalnik mechaniczny i mieszadła dla których prowadzono badania; a) widok mieszalnika, b) mieszadło turbinowe tarczowe, c) mieszadło turbinowe o łopatkach pochylonych

### Metodyka badań

Komputerowe symulacje hydrodynamiki przepływu cieczy w mieszalniku przeprowadzono z wykorzystaniem komercyjnego pakietu

obliczeniowego *MixSim 2.1.10* [3], generatora siatek *Gambit 2.4.6* [4] oraz solvera *Fluent 6.3.26* [5].

Uzyskane drogą modelowania numerycznego wyniki obliczeń porównano z wynikami badań doświadczalnych, wykonanych z użyciem anemometru laserowego.

W części doświadczalnej pracy wyznaczano wartości średnich prędkości przepływu cieczy  $u$  (wszystkich trzech składowych), kinetycznej energii turbulencji  $k$  oraz dyssypacji kinetycznej energii turbulencji  $\varepsilon$  na podstawie pomiarów chwilowych prędkości mieszanej cieczy dokonanych za pomocą dwukanałowego anemometru laserowego firmy DANTEC, wyposażonego w procesor sygnałów typu BSA. Wyniki pomiarów prędkości w poszczególnych punktach pomiarowych w mieszalniku obliczane były na podstawie 5000 pojedynczych rejestracji prędkości. Częstkami traseru przepływu w prowadzonych pomiarach były posrebrzane, sferyczne kulki szklane (wypełnione w środku powietrzem) o średniej średnicy 10 [μm].

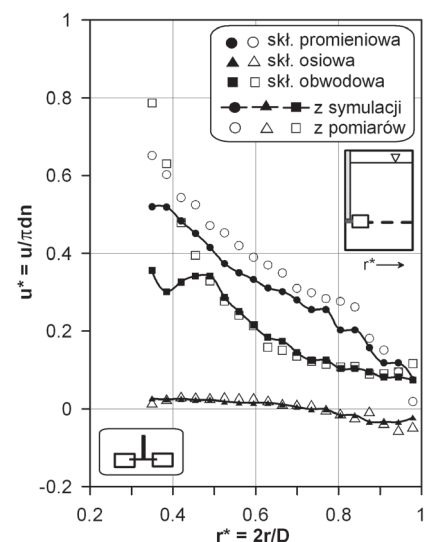
Wielkość dyssypacji kinetycznej energii turbulencji wyznaczano na podstawie równania wymiarowego  $\varepsilon = C(u^3/L)$ , w którym wartość stałej  $C$  (tzw. stałej Brodkey'a) przyjęto  $C = 5,5$  dla mieszadła turbinowego tarczowego,  $C = 3,6$  dla mieszadła z łopatkami pochylonymi oraz wielkość makroskali turbulencji  $L = D/2$  zgodnie z wynikami wcześniejszych badań własnych [6].

### Wyniki badań i ich analiza

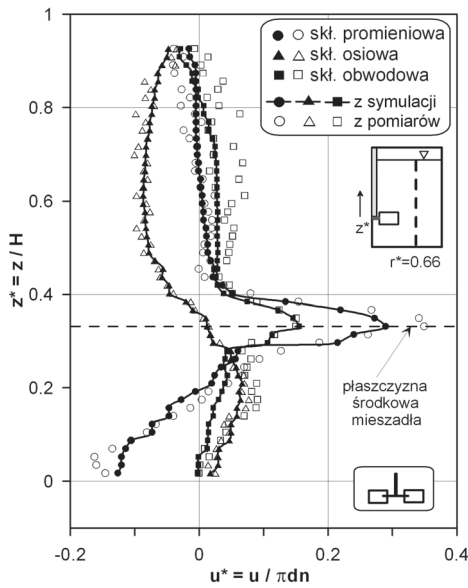
Na rys. 2, 3 i 4 przedstawiono porównanie wartości poszczególnych składowych średniej prędkości cieczy w postaci bezwymiarowej, tj. odniesionych do prędkości obwodowej na końcach łopatek mieszadła, otrzymanych na podstawie symulacji numerycznych (zaczernione symbole) z wartościami uzyskanymi z badań doświadczalnych (puste symbole).

Wykresy zamieszczone na rys. 2 obrazują porównanie wyników prędkości cieczy w strumieniu wylotowym z mieszadła turbinowego tarczowego, tj. w poziomej płaszczyźnie środkowej mieszadła, położonej w połowie wysokości łopatek. Natomiast na wykresach przedstawionych na rys. 3 porównano wartości prędkości wzdłuż bezwymiarowej wysokości cieczy  $z^* = z/H$  w mieszalniku z mieszadłem turbinowym tarczowym, przykładowo dla odległości  $r^* = 2r/D = 0,66$  od osi mieszalnika.

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić porównywalny przebieg zmian poszczególnych składowych prędkości zarówno wzdłuż promienia mieszalnika (Rys. 2), jak i wzdłuż wysokości cieczy w aparacie (Rys. 3). Zauważalne są jednak pewne różnice ilościowe zwłaszcza w przypadku wartości składowej promieniowej oraz składowej ob-



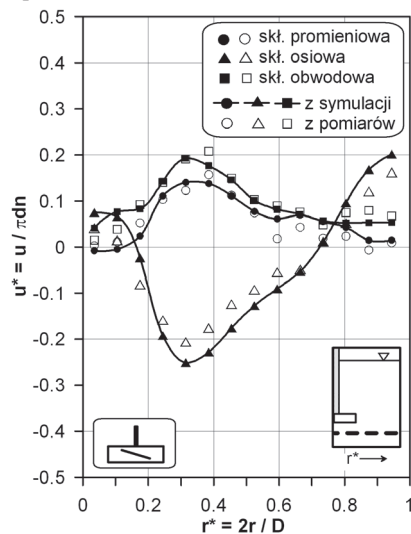
Rys. 2. Porównanie wyników średnich prędkości przepływu cieczy w strumieniu wylotowym z mieszadła turbinowego tarczowego



Rys. 3. Porównanie wyników średnich prędkości przepływu cieczy wzdłuż wysokości cieczy w mieszalniku z mieszadłem turbinowym tarczowym

wodowej w pobliżu łopatek mieszadła oraz w górnej części zbiornika. W tych przypadkach metoda symulacji numerycznych powoduje pewne niedoszacowanie wartości prędkości w porównaniu z wartościami eksperymentalnymi. W pobliżu łopatek mieszadła wartości promieniowej składowej prędkości uzyskane z pomiarów są maksymalnie 1,4 razy większe od wartości wynikających z symulacji numerycznych, natomiast składowej obwodowej są do 2,2 razy większe. Znacznie większe rozbieżności analizowanych wyników prędkości obserwuje się w górnej części zbiornika, gdzie maksymalne różnice wynoszą odpowiednio 5,2 oraz 4,4 razy. Jednocześnie należy stwierdzić, że otrzymane wyniki pomiarów prędkości są zgodne z wynikami badań eksperymentalnych innych autorów [7].

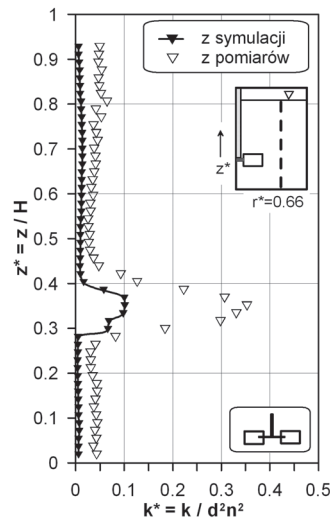
Przykładowe wyniki badań dla mieszalnika z mieszadłem turbinowym o łopatkach pochylonych przedstawiono na rys. 4. Zamieszczone na wykresie wyniki badań obrazują porównanie prędkości pod mieszadłem w odległości  $d/2$  od środkowej płaszczyzny mieszadła, tj. w obszarze tłoczenia cieczy przez to mieszadło. W tym przypadku największe różnice w wartościach prędkości wyznaczanych obiema metodami występują dla składowej osiowej przepływu. Prędkości osiowe uzyskane z modelowania numerycznego są co do wartości bezwzględnej na ogół większe – maksymalnie do 2,8 razy – od wartości otrzymanych z pomiarów.



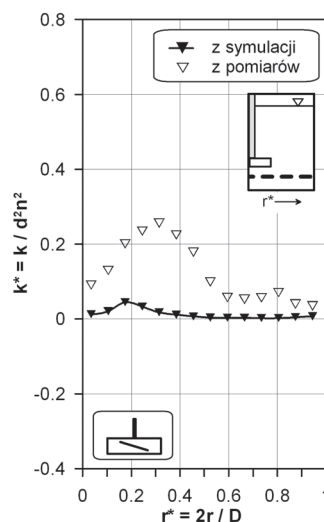
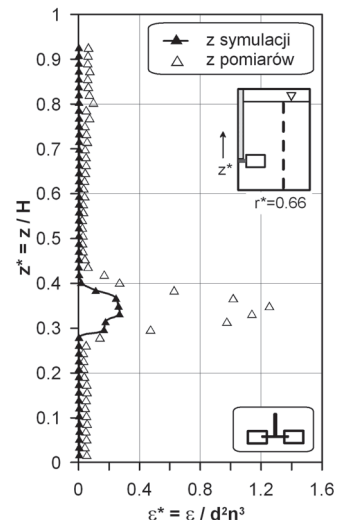
Rys. 4. Porównanie wyników średnich prędkości przepływu cieczy w obszarze pod mieszadłem turbinowym o łopatkach pochylonych

Porównanie przykładowych wyników modelowania numerycznego kinetycznej energii turbulencji i dysypacji kinetycznej energii turbulencji z wynikami uzyskanymi na drodze doświadczalnej przedstawiono na wykresach zamieszczonych na rys. 5 i 6 odpowiednio dla mieszalnika z mieszadłem turbinowym tarczowym i z mieszadłem turbinowym o łopatkach pochylonych.

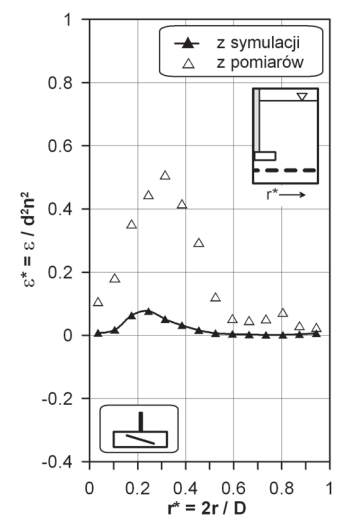
Wartości kinetycznej energii turbulencji otrzymane w wyniku symulacji numerycznych są zawsze mniejsze od wartości wynikających z pomia-



Rys. 5. Porównanie wyników kinetycznej energii turbulencji oraz wielkości jej dysypacji wzdłuż wysokości cieczy w mieszalniku z mieszadłem turbinowym tarczowym



Rys. 6. Porównanie wyników kinetycznej energii turbulencji oraz wielkości jej dysypacji w obszarze pod mieszadłem turbinowym o łopatkach pochylonych



rów zarówno w przypadku mieszadła o działaniu promieniowym, jak i osiowym. Wartości te są maksymalnie 9,3 razy mniejsze od wartości wyznaczonych doświadczalnie w przypadku mieszadła turbinowego tarczowego i do 20 razy mniejsze w przypadku mieszadła z łopatkami pochylonymi.

Podobną tendencję można również stwierdzić w przypadku analizy wyników wielkości dysypacji kinetycznej energii turbulencji. Wyniki otrzymane drogą modelowania numerycznego charakteryzują się niedoszacowaniem wielkości dysypacji, zwłaszcza w strumieniach wylotowych cieczy z mieszadła.

LITERATURA

[1] Z. Jaworski: Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej. EXIT, Warszawa 2005.  
 [2] R. Wójtowicz: Czasopismo Techniczne, nr 2-M, 371 (2008).  
 [3] MixSim 2.1 Documentation. Fluent Inc. (28.01.2010): <http://www.fluentusers.com>  
 [4] Gambit 2.4 Documentation. Fluent Inc. (28.01.2010): <http://www.fluentusers.com>  
 [5] Fluent 6.3 Documentation. Fluent Inc. (28.01.2010): <http://www.fluentusers.com>  
 [6] J. Talaga, A. Duda: Czasopismo Techniczne, nr 4-M, 277 (2004).  
 [7] M. Jahangiri: Iranian Polymer Journal, 14, nr 6, 522 (2005).