

Jan TALAGA

e-mail: jtalaga@usk.pk.edu.pl

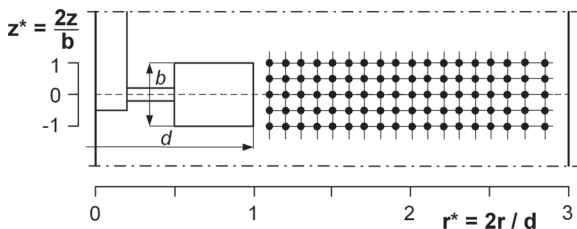
Katedra Aparatury Przemysłowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

Badania prędkości przepływu w strumieniu wylotowym cieczy dla mieszadła turbinowego tarczowego

Przedmiot pracy

Hydrodynamika przepływu cieczy w zbiorniku mieszalnika uwarunkowana jest w znacznym stopniu polem prędkości generowanym przez mieszadło, tj. ich rozkładem w strumieniu cieczy tłoczonym przez łopatki mieszadła. Przedmiotem prezentowanej pracy są badania prędkości przepływu w obszarze tłoczenia cieczy przez mieszadło turbinowe tarczowe z sześcioma łopatkami prostymi. Analizowany był rozkład wszystkich trzech składowych prędkości, tj. składowej promieniowej, osiowej i obwodowej, wzdłuż promienia zbiornika oraz wzdłuż wysokości łopatek mieszadła. Badania prowadzono dla dwóch różnych wysokości h usytuowania mieszadła nad dnem zbiornika, a mianowicie dla odległości $h = d$ oraz $h = 0,5d$ (d – średnica mieszadła). Porównanie wyników pozwoliło na ocenę wpływu wysokości zawieszenia mieszadła nad dnem na rozkład prędkości cieczy w strumieniu wylotowym z mieszadła turbinowego tarczowego.

Badania doświadczalne prowadzono w mieszalniku o średnicy wewnętrznej $D = 286$ mm z dnem płaskim i wyposażonym w cztery standardowe przegrody. Mieszadło posiadało standardową geometrię i średnicę równą $d = 1/3D$. Wartości prędkości cieczy wyznaczane były na podstawie wyników pomiarów prędkości chwilowych dokonanych za pomocą dopplerowskiego anemometru laserowego. Położenie punktów pomiarowych w obszarze wypływu cieczy z mieszadła przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Położenie punktów pomiarowych w obszarze wypływu cieczy z mieszadła

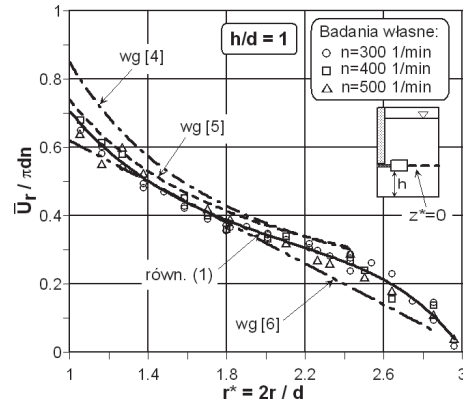
Wyniki badań

Badania rozkładu prędkości były już wprawdzie przedmiotem licznych prac, między innymi [1–6], lecz dotyczyły głównie składowej promieniowej prędkości i mieszalnika z mieszadłem umieszczonym w standardowej odległości $h = d$ od dna. Brak jest jednak pełnej zgodności i jednoznaczności wyników, co implikuje konieczność dalszych badań w tej dziedzinie. Dotyczy to zwłaszcza mieszalników z niestandardowym usytuowaniem mieszadła.

Na wykresie zamieszczonym na rys. 2 przedstawiono wyniki badań obrazujące zależność bezwymiarowej składowej promieniowej prędkości średniej $\bar{U}_r/\pi dn$ od odległości od łopatek mieszadła, tj. wzdłuż bezwymiarowego promienia zbiornika r^* dla standardowej wysokości zawieszenia mieszadła nad dnem, tj. $h = d$, i dla różnych częstości obrotów n . Uzyskane wyniki pomiarów zostały uogólnione w postaci następującej zależności ilościowej, słusznej w całym zakresie zmian bezwymiarowego promienia $r^* = 2r/d = (1 \div 3)$:

$$\frac{\bar{U}_r}{\pi dn} = 0,71 \left(\frac{2r}{d}\right)^{-1,02} - 5,55 \cdot 10^{-5} \left(\frac{2r}{d}\right)^{7,58} \quad (1)$$

Na wykresie (Rys. 2) przedstawiono także porównanie wyników badań własnych z wynikami prac innych autorów. Uzyskane wyniki nie potwierdzają liniowego przebiegu zmian składowej promieniowej prędkości prezentowanego między innymi w pracy [6] zwłaszcza w przedziale zmian promienia $r^* = (2 \div 3)$.

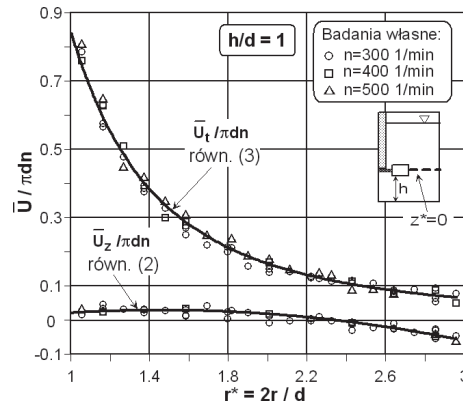


Rys. 2. Zmiany składowej promieniowej prędkości w funkcji promienia zbiornika w płaszczyźnie symetrii mieszadła dla $h = d$

Wyniki pomiarów składowych osiowej i obwodowej prędkości zostały przedstawione na rys. 3 i uogólnione w postaci następujących zależności ilościowych, odpowiednio:

$$\frac{\bar{U}_z}{\pi dn} = 0,052 - 0,011 \left(\frac{2r}{d}\right)^{2,18} \quad (2)$$

$$\frac{\bar{U}_t}{\pi dn} = 0,84 \left(\frac{2r}{d}\right)^{-2,35} \quad (3)$$



Rys. 3. Zmiany składowej osiowej \bar{U}_z i obwodowej \bar{U}_t prędkości w funkcji promienia zbiornika w płaszczyźnie symetrii mieszadła dla $h = d$

Wartości składowej osiowej są kilkadziesiąt razy mniejsze w porównaniu ze składowymi promieniowymi i obwodowymi, co potwierdza dominujący w obszarze mieszadła turbinowego tarczowego promieniowy przepływ cieczy w przypadku odległości mieszadła od dna równej $h = d$. Przedstawiony na rys. 2 i 3 przebieg zmian składowych prędkości w funkcji promienia zbiornika otrzymany na drodze eksperymentalnej jest zgodny z wynikami wcześniejszych symulacji numerycznych [7].

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów rozkład składowej promieniowej prędkości wzdłuż wysokości łopatki mieszadła można opisać za pomocą następującej funkcji eksponencjalnej:

$$\frac{\bar{U}_r}{\pi dn} = \exp(A_1 + B_1 z^* + C_1 z^{*2}) \quad (4)$$

w której $z^* = 2z/b$ jest bezwymiarową współrzędną wzdłuż wysokości b łopatki mieszadła. Występujące w równaniu (4) współczynniki A , B i C uwzględniają odległość od końca łopatek mieszadła, tj. są funkcją

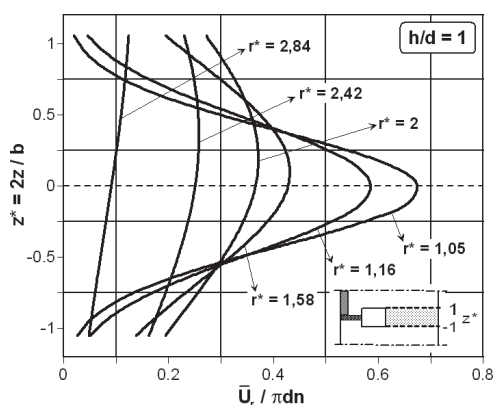
bezwymiarowego promienia zbiornika r^* , i określone są za pomocą następujących zależności ilościowych:

$$A_1 = 3,36 - 5,56r^* + 3,57r^{*2,5} - 1,68r^{*3} \quad (5)$$

$$B_1 = -1,41 + 6,27r^{*2} - 7,14r^{*2,5} + 2,11r^{*3} \quad (6)$$

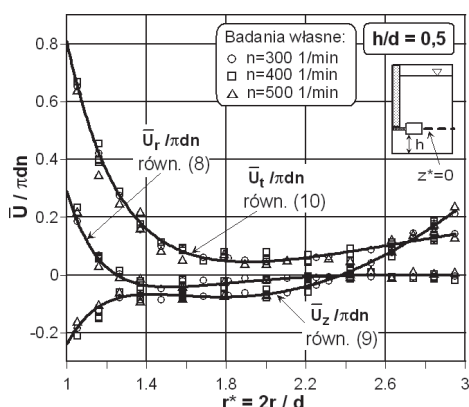
$$C_1 = (0,02 - 0,3r^{*3})^{-1} \quad (7)$$

Na wykresie zamieszczonym na rys. 4 przedstawiono rozkłady składowej promieniowej prędkości wzdłuż wysokości łopatki mieszadła – wyznaczone na podstawie równania (4) – dla różnych odległości r^* od końca łopatek. W przypadku standardowej odległości mieszadła od dna ($h = d$) rozkład prędkości promieniowych w obszarze wypływu cieczy z mieszadła jest w pobliżu łopatek praktycznie symetryczny wzdłuż całej wysokości łopatki a maksymalne prędkości występują w połowie jej wysokości, natomiast w dalszej odległości od łopatek maksymalne wartości prędkości przesunięte są w stronę górnej połowy łopatki.



Rys. 4. Rozkład składowej promieniowej prędkości wzdłuż wysokości łopatki mieszadła dla różnych odległości od mieszadła; $h = d$

Mieszalniki z mieszadłem usytuowanym blisko dna aparatu stosowane są często dla mieszania układów wielofazowych, a w szczególności układów ciecz – ciało stałe [8]. Dane literaturowe na temat rozkładu prędkości w obszarze mieszadła są jednak w tym przypadku bardzo fragmentaryczne. Na wykresie zamieszczonym na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów wszystkich trzech składowych prędkości średniej w płaszczyźnie symetrii mieszadła przy jego usytuowaniu w odległości $h = 0,5d$ od dna.



Rys. 5. Przebieg zmian poszczególnych składowych prędkości w płaszczyźnie symetrii mieszadła dla odległości mieszadła od dna $h = 0,5d$

Wyniki pomiarów zostały uogólnione w postaci następujących zależności ilościowych:

$$\frac{\bar{U}_r}{\pi dn} = -0,42 + 2,76\left(\frac{2r}{d}\right)^{-1} - 5,77\left(\frac{2r}{d}\right)^{-2} + 3,72\left(\frac{2r}{d}\right)^{-3} \quad (8)$$

$$\frac{\bar{U}_z}{\pi dn} = -10,20 + 1,40\left(\frac{2r}{d}\right) + 11,36\left(\frac{2r}{d}\right)^{-0,5} - 2,80\left(\frac{2r}{d}\right)^{-2} \quad (9)$$

$$\frac{\bar{U}_t}{\pi dn} = 0,60 - 5,85\left(\frac{2r}{d}\right)^{-1,5} + 6,06\left(\frac{2r}{d}\right)^{-2} \quad (10)$$

Przeprowadzone badania rozkładu promieniowej prędkości średniej wzdłuż wysokości łopatki mieszadła w funkcji promienia zbiornika pozwoliły z kolei na ustalenie następującej korelacji:

$$\frac{\bar{U}_r}{\pi dn} = A_2 + B_2 z^* C_2 z^{*2} + D_2 \exp(-z^*) \quad (11)$$

w której poszczególne współczynniki $A_2, B_2, C_2,$ i D_2 są następującymi funkcjami bezwymiarowego promienia:

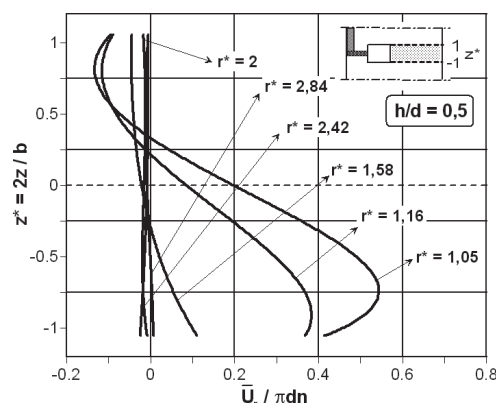
$$A_2 = -1,92 + 14,21r^{*-1} - 33,16r^{*-2} + 24,08r^{*-3} \quad (12)$$

$$B_2 = 1,25 - 10,88r^{*-1} + 28,30r^{*-2} - 22,41r^{*-3} \quad (13)$$

$$C_2 = -0,12 + 2,27r^{*-1} - 7,80r^{*-2} + 7,14r^{*-3} \quad (14)$$

$$D_2 = 1,62 - 12,32r^{*-1} + 29,13r^{*-2} - 21,36r^{*-3} \quad (15)$$

Wykres na rys. 6 obrazuje rozkłady badanej składowej promieniowej prędkości wyznaczone na podstawie równania (11).



Rys. 6. Rozkład składowej promieniowej prędkości wzdłuż wysokości łopatki mieszadła dla różnych odległości od mieszadła; $h = 0,5d$

Wnioski

Porównując uzyskane wyniki badań rozkładów średnich prędkości cieczy w strumieniu wylotowym z mieszadła turbinowego tarczowego dla dwóch różnych odległości jego usytuowania nad dnem mieszalnika należy stwierdzić, że wraz ze zmniejszaniem odległości mieszadła od dna następuje istotna zmiana jakościowa i ilościowa składowych promieniowych i osiowych prędkości. W płaszczyźnie symetrii mieszadła składowa promieniowa ulega znacznemu zmniejszeniu i już w pobliżu łopatek mieszadła jest około 2,8 razy mniejsza od prędkości dla standardowej odległości mieszadła od dna. Wraz ze wzrostem promienia zbiornika prędkość ta maleje praktycznie do zera. Natomiast składowa osiowa prędkości w przypadku $h = 0,5d$ przyjmuje znacznie większe wartości w porównaniu z prędkościami dla $h = d$, co świadczy o dominującym przepływie osiowym generowanym w tym przypadku przez mieszadło turbinowe tarczowe. Taki przepływ cieczy jest szczególnie pożądany np. dla wytwarzania zawiesiny w mieszalniku. Odpowiednie zmiany ilościowe poszczególnych składowych prędkości zostały opisane równaniami korelacyjnymi (1–3) oraz (8–10).

Wraz ze zmniejszającą się odległością mieszadła od dna istotnym zmianom ulega również rozkład promieniowej składowej prędkości wzdłuż wysokości łopatki mieszadła. W przypadku odległości mieszadła od dna $h = d$ maksymalne wartości prędkości występują w płaszczyźnie symetrii mieszadła, natomiast przy odległości $h = 0,5d$ maksimum prędkości ma miejsce w obszarze dolnej połowy łopatki. W obszarze górnej połowy łopatki składowe promieniowe prędkości przyjmują wartości ujemne, a więc przepływ cieczy skierowany jest do mieszadła.

LITERATURA

- [1] R. Escudé, A. Liné: *AIChE Journal*, **49**, 585 (2003).
- [2] K. N. Dyster, E. Koutsakos, Z. Jaworski, A. W. Nienow: *Trans. Inst. Chem. Eng.* **71**, Part A, 11 (1993).
- [3] C. Stoots, R. V. Calabrese: *AIChE Journal*, **41**, 1 (1995).
- [4] M. Jahangiri: *Iranian Polymer Journal*, **14**, nr 6, 521 (2005).
- [5] K. C. Lee, M. Yianneskis: *AIChE Journal*, **44**, 13 (1998).
- [6] J. Drbohlav, I. Fořt, J. Kratky: *Chem. Commun.* **43**, 696 (1978).
- [7] J. Talaga, R. Wójtowicz: *Inż. Ap. Chem.* **49**, nr 4, 80 (2010).
- [8] J. Kamiński: *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa 2004.