

Marta MAJOR-GODLEWSKA

e-mail: mmajor@zut.edu.pl

Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

## Rozkład współczynnika oporu w zbiorniku z niestandardowymi przegrodami i mieszadłem szybkoobrotowym

### Wstęp

W inżynierskich obliczeniach i operacji mieszania ważna jest znajomość zarówno średnich jak i lokalnych wartości współczynników oporu, wnikania ciepła lub wnikania masy. Jest to możliwe przy zastosowaniu metody pośredniej wykorzystującej analogie pomiędzy wymianą pędu, ciepła i masy [Karcz, 2001]. Metoda ta umożliwia obliczenie lokalnych wartości współczynnika wnikania ciepła lub masy przy znajomości lokalnych wartości współczynnika oporu  $f$  na powierzchni wymiany.

Jednym ze sposobów wyznaczania lokalnych wartości współczynnika oporu  $f$  jest metoda elektrochemiczna, którą w badaniach stosowali m.in. Wichterle i in. [1984; 1985], Karcz [1996], Stręk i Karcz [1999], Karcz i Michalska [2000], Karcz i in., [2001, 2005], Major-Godlewska [2004], Cudak i Karcz [2007], Broniarz-Press i Różańska [2008], Cudak i in. [2011].

Karcz i Michalska [2000] wyznaczały rozkład współczynnika oporu  $f$  na ścianie elementu rurowego (sonda), umieszczonego w zbiorniku w miejscu jednej z przegród płaskich. Do mieszania użyto mieszadła turbinowego *Rushtona*.

Wyniki doświadczalnych badań lokalnych współczynników oporu  $f$  na ścianie elementu rurowego węzownicy przy użyciu metody elektrochemicznej przedstawiono w pracy [Major-Godlewska, 2004]. Rozkład współczynnika oporu  $f$  otrzymano na jednym z dwudziestu czterech rurowych elementów pionowej węzownicy umieszczonej po obwodzie mieszalnika.

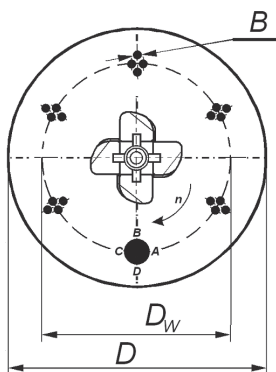
Węzownice pionowe mogą być ustawiane w mieszalniku nie tylko w postaci pojedynczych rur [Major, 2000; Michalska, 2001], lecz mogą być także grupowane w bloki [Havas i in., 1982; Major, 2000; Michalska, 2001]. Należałoby zatem wyznaczyć rozkłady współczynnika oporu  $f$ , gdy w zbiorniku zamontowane są pojedyncze węzownice w postaci zblokowanych elementów.

Badania przedstawione w niniejszej pracy miały na celu określenie rozkładu współczynnika oporu  $f$  oraz bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n$  na powierzchni rurowego modułu stanowiącego element niestandardowych przegród rurowych w mieszalniku z mieszadłem szybkoobrotowym.

### Badania doświadczalne

#### Stanowisko i zakres badań

Badania doświadczalne wykonano w zbiorniku o średnicy wewnętrznej  $D = 0,3$  m wyposażonym w pionowe przegrody rurowe zgrupowane w sześć bloków po cztery rurki w bloku. Średnica podziałowa pionowych



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia pionowych przegród rurowych oraz ustawienia sondy pomiarowej

wych bloków rurowych stanowiących przegrody wynosiła  $D_w = 0,65D$ , a średnica pojedynczej rurki w bloku była równa  $B = 0,017D$ . Schemat rozmieszczenia pionowych przegród rurowych oraz ustawienie sondy pomiarowej pokazano na rys. 1.

Zbiornik napełniano roztworem elektrolitu  $H_2O-NaOH-K_4Fe(CN)_6-K_3Fe(CN)_6$  do wysokości  $H = 0,3$  m. Roztwór ten mieszano mieszadłem turbinowym *Rushtona* lub mieszadłem A 315, o średnicy obu mieszadeł  $d = 0,33D$ .

Pomiary przeprowadzono w zakresie przepływu burzliwego  $Re \in <2,92 \cdot 10^4, 6,72 \cdot 10^4>$ .

#### Metodyka pomiaru

Do badań rozkładu współczynnika oporu  $f$  oraz bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n$ , zastosowano metodę elektrochemiczną mierząc natężenie prądu dyfuzyjnego  $I_d$  na powierzchni cylindrycznej sondy pomiarowej (o średnicy  $d_s = 0,024$  m), na której były umieszczone okrągłe elektrody niklowe o średnicy  $d_e = 4$  mm. Sonda była zamontowana w miejscu jednego z bloków rurowych. Pomiary wykonano dla czterech różnych położań katodowych (A, B, C, D – Rys. 1) katody pomiarowej.

#### Metodyka obliczeń

Wartości prądu dyfuzyjnego  $I_d$  uzyskane z pomiarów umożliwiają obliczenie:

– lokalnych wartości szybkości ścinania [Wichterle i in., 1984]:

$$\gamma = \left( \frac{I_d}{2,156z_e F D_A^{2/3} C_{A0} R_K^{5/3}} \right)^3 \quad (1)$$

– współczynnika oporu [Wichterle i in., 1985]:

$$f = \frac{\tau D^2}{\rho n^2 d^4} \quad (2)$$

gdzie:

$C_{A0}$  – stężenie składnika A w rdzeniu fazy ciekłej [ $\text{kmol} \cdot \text{A} / \text{m}^3$ ]

$D_A$  – kinematyczny współczynnik dyfuzji [ $\text{m}^2 / \text{s}$ ]

$F$  – stała Faradaya [ $\text{C} / \text{kmol}$ ]

$R_K$  – promień katody [ $\text{m}$ ]

$z_e$  – liczba elektronów biorących udział w reakcji

$\rho$  – gęstość cieczy [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ]

$\tau = \eta \gamma$  – naprężenie ścinające [ $\text{N} / \text{m}^2$ ]

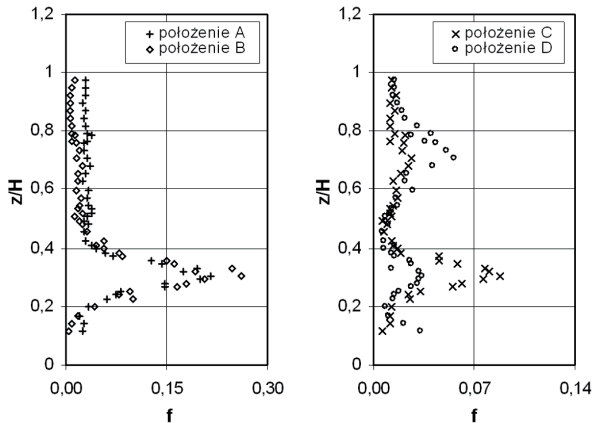
Metodyka pomiaru i obliczeń zostały szczegółowo omówione w pracy [Karcz, 1996].

### Wyniki badań

#### Mieszadło turbinowe *Rushtona*

Na rys. 2 przedstawiono profile osiowe oraz profile kątowe, czyli zależności  $f = F(z/H)$  oraz  $f = F(A, B, C, D)$ , współczynnika oporu  $f$ , dla zbiornika z pionowymi przegrodami rurowymi zgrupowanymi w sześć bloków po cztery rurki w bloku oraz mieszadła turbinowego *Rushtona*.

Największe wartości współczynnika oporu  $f$  w funkcji współrzędnej osiowej  $z/H$  uzyskano na wysokości zawieszenia mieszadła ( $z/H = 0,33$ ), gdzie sonda pomiarowa jest najintensywniej omywana przez strumień cieczy. Wytwarzana przez mieszadło cyrkulacja cieczy wpływa także na kątowe rozkłady współczynnika oporu  $f$ . Świadczą o tym największe wartości  $f$  dla położenia B sondy pomiarowej, w którym to położeniu jest ona najsilniej omywana przez ciecz na wysokości zawieszenia mie-



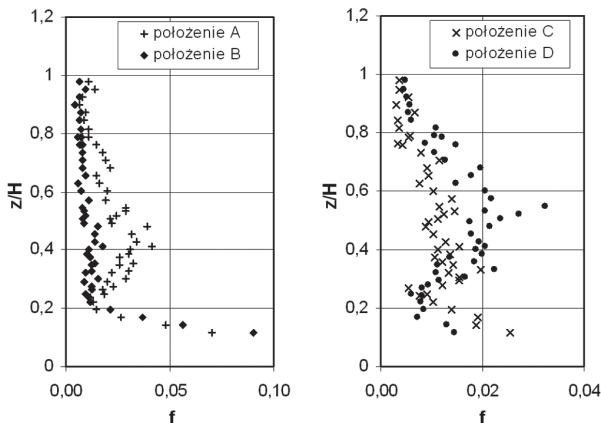
Rys. 2. Rozkład współczynnika oporu  $f = F(z/H)$  na rurowym elemencie dla czterech położen sondy pomiarowej i mieszadła turbinowego *Rushtona*;  $Re = 2,99 \cdot 10^4$

szadła ( $z/H = 0,33$ ). Gdy  $z/H > 0,5$  najintensywniej omywana jest sonda w położeniu A.

Najmniejsze wartości współczynnika oporu  $f$  uzyskano dla położenia D sondy pomiarowej, w którym utrudniony jest opływ sondy cieczą, przez ustawienie jej w kierunku do ściany zbiornika. Wpływ wytwarzanej przez mieszadło cyrkulacji powoduje w położeniu D występowanie trzech obszarów, w których można zaobserwować wzrost wartości współczynnika oporu  $f$ . Dwa z obszarów występują w pobliżu mieszadła, to jest pod nim, gdy  $z/H = 0,1$  oraz na wysokości zawieszenia mieszadła ( $z/H = 0,33$ ). Trzeci obszar, w którym występuje wzrost wartości  $f$  zaobserwowano dla  $z/H = 0,7$ .

**Mieszadło A 315**

Inne rozkłady współczynnika oporu  $f$  zaobserwowano, gdy w zbiorniku z pionowymi przegrodami rurowymi ustawionymi w postaci sześciu bloków po cztery rurki w bloku ciecz mieszana była mieszadłem A 315 (Rys. 3). Uzyskano łagodniejsze rozkłady współczynnika  $f$  w funkcji współrzędnej osiowej  $z/H$ , na co miał wpływ łagodniejszy opływ sondy cieczą.

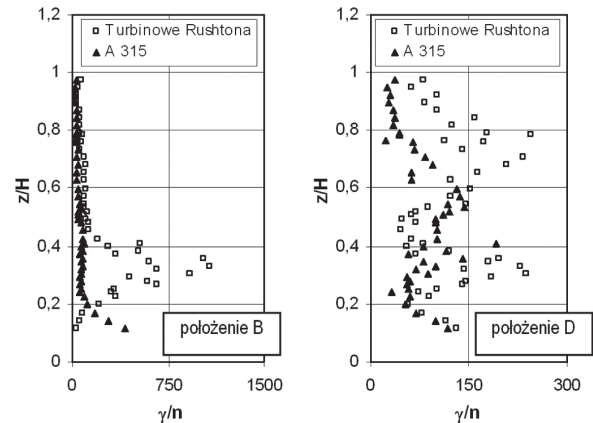


Rys. 3. Rozkład współczynnika oporu  $f = F(z/H)$  na rurowym elemencie dla czterech położen sondy pomiarowej i mieszadła A 315;  $Re = 2,92 \cdot 10^4$

Największe wartości współczynnika oporu (analizując rozkłady kątowe) stwierdzono dla położenia A sondy pomiarowej. Jedynie pod mieszadłem, to jest dla  $z/H < 0,2$ , większe wartości  $f$  uzyskano dla położenia B sondy pomiarowej. Kierunek cieczy generowany przez mieszadło A 315 nie jest tu bez znaczenia. W położeniu B sondy pomiarowej zaobserwowano równomierny rozkład współczynnika oporu  $f$  w funkcji współrzędnej osiowej  $z/H$ . Wzrost wartości współczynnika  $f$ , dla położenia B sondy, występuje jedynie na wysokości  $z/H < 0,2$ , gdzie wartości  $f$  są największe. W pozostałych trzech A, C, D położeniach sondy widoczny jest wzrost współczynnika oporu  $f$  w funkcji współrzędnej osiowej  $z/H$  dla dwóch obszarów, gdy  $z/H < 0,2$  oraz  $z/H \approx 0,5$ .

**Porównanie rozkładów bezwymiarowej szybkości ścinania i współczynnika oporu**

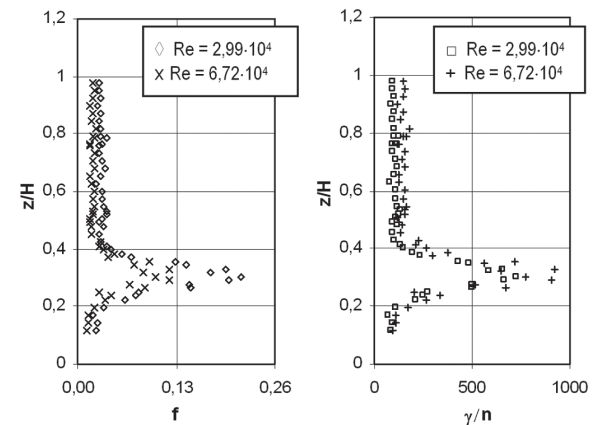
Porównanie rozkładów bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n$  uzyskanych na rurowym elemencie, dla dwóch przeciwległych położen, sondy pomiarowej przedstawiono na rys. 4. Do porównania wybrano położenie B sondy, gdzie w przypadku mieszadła turbinowego *Rushtona* była ona najintensywniej omywana na wysokości zawieszenia mieszadła oraz położenie D ze względu na ustawienie sondy w kierunku do ścianki zbiornika, gdzie opływ sondy cieczą był utrudniony. Jak wskazują uzyskane dane, na bezwymiarową szybkość ścinania  $\gamma/n$  ma znaczący wpływ typ użytego mieszadła, a w szczególności cyrkulacja cieczy, jaką dane mieszadło wywołuje.



Rys. 4. Porównanie rozkładów bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n = F(z/H)$  na rurowym elemencie dla położenia B oraz D sondy pomiarowej i mieszadła turbinowego *Rushtona* oraz mieszadła A 315;  $Re = \text{const}$

Porównano wartości współczynnika oporu  $f$  oraz bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n$  uzyskane dla różnych wartości liczby *Reynoldsa* oraz obu mieszadeł.

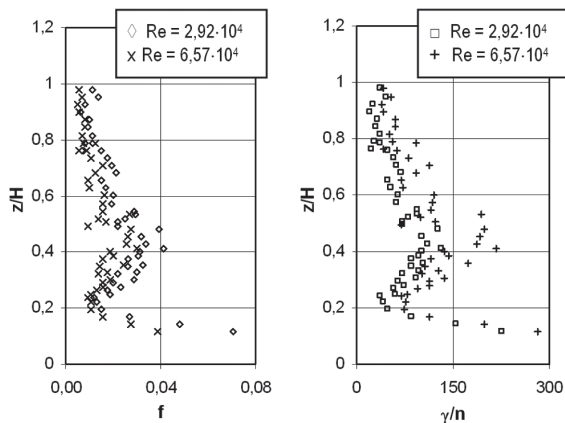
Lokalne rozkłady współczynnika oporu  $f$  oraz bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n$  dla dwóch wartości liczby *Reynoldsa* ( $Re = 2,99 \cdot 10^4$ ,  $Re = 6,72 \cdot 10^4$ ) oraz położenia A sondy pomiarowej przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Porównanie rozkładów współczynnika oporu  $f = F(z/H)$  oraz bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n = F(z/H)$  na rurowym elemencie w położeniu A sondy pomiarowej i mieszadła turbinowego *Rushtona* dla dwóch wartości liczby  $Re = 2,99 \cdot 10^4$  oraz  $Re = 6,72 \cdot 10^4$

Zaobserwowano, że w zbiorniku z mieszadłem turbinowym *Rushtona* wartości współczynnika oporu  $f$  w funkcji współrzędnej osiowej  $z/H$  dla położenia A sondy pomiarowej maleją wraz ze wzrostem wartości liczby *Re*, natomiast wartości bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n$  wznoszą się wraz ze wzrostem liczby *Reynoldsa*.

Podobne tendencje zaobserwowano (Rys. 6) podczas analizy rozkładu współczynnika oporu  $f$  i bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n$  w zbiorniku ze zblokowanymi pionowymi przegrodami rurowymi i mieszadłem A 315, gdzie sonda pomiarowa ustawiona była w pozycji A. Większe wartości współczynnika  $f$  otrzymano dla mniejszych warto-



Rys. 6. Porównanie rozkładów współczynnika oporu  $f = F(z/H)$  oraz bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n = F(z/H)$  na rurowym elemencie w położeniu A sondy pomiarowej i mieszadła A 315 dla dwóch wartości liczby Reynoldsa  $Re = 2,92 \cdot 10^4$ ,  $Re = 6,57 \cdot 10^4$

ści liczby  $Re = 2,92 \cdot 10^4$ . Porównując osiowe rozkłady bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n$ , większe wartości bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n$  uzyskano dla większych wartości liczby  $Re = 6,57 \cdot 10^4$ .

### Wnioski

Z przeprowadzonej analizy danych doświadczalnych wynika, że na wartości współczynnika oporu  $f$  oraz bezwymiarowej szybkości ścinania  $\gamma/n$  ma wpływ położenie punktu pomiarowego na rurowym elemencie sondy pomiarowej oraz typ mieszadła generującego określony rodzaj cyrkulacji cieczy w zbiorniku.

Na podstawie analogii między wymianą pędu a masy uzyskane wyniki mogą posłużyć do przewidywania rozkładów współczynnika wnikania ciepła.

### LITERATURA

Broniarz-Press L., Rozanska S, 2008. Determination of the flow and heat transfer characteristics in non-Newtonian media agitated using the electrochemical technique. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **51**, 910-919. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.003

- Cudak M., Karcz J., 2007. Przenoszenie pędu w mieszalniku z niecentrycznie umieszczonym wałem. *Inż. Ap. Chem.*, **46**, nr 4-5, 34-38
- Cudak M., Karcz J., Kielbus-Rapała A., 2011. Transport phenomena in an agitated vessel with an eccentrically located impeller. *Chem. Pap.*, **65**, 147-155. DOI: 10.2478/s11696-010-0086-7
- Havas G., Deak A., Sawinsky J., 1982. Heat transfer coefficients in an agitated vessels using vertical tube baffles. *Chem. Eng. J.*, **23**, 161-165. DOI: 10.1016/0300-9467(82)80007-5
- Karcz J., 1996. Momentum transfer in a region of an agitated vessel wall. *Inż. Chem. Proc.*, **17**, nr 3, 403-421
- Karcz J., 2001. Modelling of local heat transfer in a jacketed slender agitated vessel. *Inż. Chem. Proc.*, **22**, nr 3, 409-426
- Karcz J., Cudak M., Szoplík J., 2005. Stirring of a liquid in a stirred tank with an eccentrically located impeller. *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 2369-2380. DOI: 10.1016/j.ces.2004.11.018
- Karcz J., Michalska M., 2000. *Distributions of the transport coefficients on the wall of the tubular baffles in a stirred tank*. Míchání stavba a provoz míchacích zařízení ucpávky a těsnění: 13. Celostátní Konference, Paper C7: 12 (CD-ROM). Brno, 8-10 September 2000
- Karcz J., Stręk F., Michalska M., 2001. Badania procesów przenoszenia w obszarze przyściennym pionowej rurowej przegrody w mieszalniku cieczy. *Inż. Chem. Proc.*, **22**, nr 3C, 657-662
- Major M., 2000. *Badania wnikania ciepła od pionowej wężownicy do cieczy pseudoplastycznej poddawanej mieszaniu w zbiorniku z mieszadłem obrotowym*. Praca doktorska. Pol. Szczecińska, Szczecin
- Major-Godlewska M., 2004. Badania rozkładu współczynnika oporu na rurowym elemencie pionowej wężownicy w mieszalniku. *Inż. Ap. Chem.*, **43**, nr 3s, 98-100
- Michalska M., 2001. *Wnikanie ciepła w mieszalniku zaopatrzone w rurową wężownicę pionową oraz mieszadło obrotowe*. Praca doktorska. Pol. Szczecińska, Szczecin
- Stręk F., Karcz J., 1999. Zastosowanie metody elektrochemicznej do badania transportu masy w obszarze przyściennym mieszalnika cieczy. *Inż. Chem. Proc.*, **20**, nr 1, 3-22
- Wichterle K., Kadlec M., Zak L., Mitschka P., 1984. Shear rates on turbine impeller blades. *Chem. Eng. Commun.*, **26**, 25-32. DOI: 10.1080/00986448408940200
- Wichterle K., Zak L., Mitschka P., 1985. Shear stresses on the wall of agitated vessel. *Chem. Eng. Commun.*, **32**, 289-305. DOI: 10.1080/00986448508911652

## CZASOPISMO NAUKOWO-TECHNICZNE

# INŻYNIERIA I APARATURA CHEMICZNA

ukazuje się od 1961 roku

Czasopismo jest poświęcone problemom obliczeń procesowych i zagadnieniom projektowo-konstrukcyjnym aparatury i urządzeń stosowanych w przemysłach przetwórczych, w tym szczególnie w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, rolno-spożywczym, jak również w energetyce, gospodarce komunalnej i w ochronie środowiska.

Przeznaczone jest zarówno dla pracowników badawczych, projektantów, konstruktorów, jak i dla menadżerów oraz inżynierów ruchomych.

W czasopiśmie publikowane są artykuły o szerokim spektrum tematycznym, obejmującym problematykę procesów i operacji jednostkowych inżynierii chemicznej, bio- i nanotechnologii, inżynierii biomedycznej, recykling, bezpieczeństwo procesowe oraz obliczenia i projektowanie aparatów w aspekcie poprawy wydajności, lepszego wykorzystania surowców, oszczędności energii i ochrony środowiska.