

---

**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

## Wymiana ciepła w obszarze przyściennym pionowego wkładu grzewczego w mieszalniku

### Wstęp

Wymiana ciepła, w zbiornikach zaopatrzonych w wężownicę, występuje w wielu instalacjach w różnych gałęziach przemysłu. Różne układy grzewcze/chłodzące z rurami pionowymi testowali *Dunlap i Rushton* [1], *Havas* i wsp. [2], *Kai* i wsp. [3]. Problem wnikanie ciepła, dla zmiennych ustawień pionowych elementów rurowych w mieszalniku oraz różnych typów mieszadeł, był badany przez *Major* [4] i *Michalską* [5]. Zaproponowały one korelacje do obliczeń średniego współczynnika wnikanie ciepła dla cieczy niutonowskiej [5] i nieniu-tonowskiej [4] dla burzliwego [5] oraz przejściowego reżimu przepływu cieczy [4]. Średnie współczynniki wnikanie ciepła zależą od kształtu oraz parametrów geometrycznych układu grzewczego. Przesunięcie elementu grzewczego w kierunku mieszadła wpływa na zmianę intensywności wnikanie ciepła, co z kolei sugeruje występowanie znacznych różnic wartości współczynnika wnikanie ciepła na powierzchni rury grzejnej.

Badania współczynnika wnikanie ciepła można między innymi przeprowadzić za pomocą metody elektrochemicznej stosowanej w pracach [6–14]. W metodzie tej do obliczeń wykorzystuje się analogię pomiędzy wymianą pędu, masy a ciepła. *Post* [6], *Bourne* i wsp. [7, 9], *Man* [8, 10], *Stręk* i wsp. [11] stosowali metodę elektrochemiczną do wy-

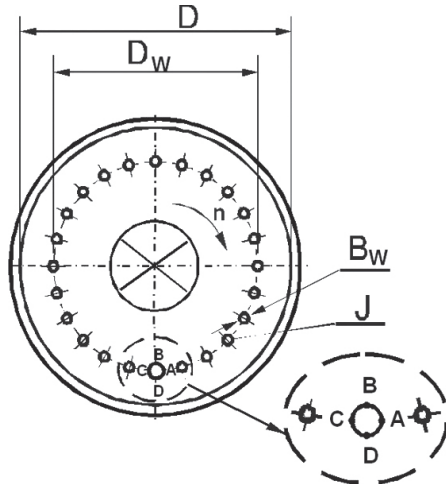
znaczania lokalnych wartości współczynnika wnikanie ciepła wzdłuż pionowej ścianki mieszalnika lub na jego dnie. Można przypuszczać, że podobnie jak na ściance zbiornika [6–11], tak i na ścianie przegrody rurowej umieszczonej wewnątrz mieszalnika występować będą rozkłady współczynnika wnikanie ciepła zależnie od rodzaju użytego mieszadła. W pracy [13] analizowano rozkłady współczynników wnikanie ciepła na pojedynczym elemencie rurowym umieszczonym w zbiorniku z mieszadłem. Natomiast w pracy [14] opisano wyniki badań dotyczące lokalnych wartości szybkości ścinania i współczynnika oporu na ścianie pionowej wężownicy rurowej.

Prezentowane w niniejszej pracy badania miały na celu zidentyfikowanie osiowych i kątowych rozkładów wartości współczynnika wnikanie ciepła w obszarze przyściennym pionowego wkładu rurowego zabudowanego w mieszalniku z mieszadłem turbinowym *Rushtona* lub mieszadłem A 315. Na podstawie otrzymanych danych można, w mieszalniku z mieszadłem i układem grzewczym/chłodzącym z rurami pionowymi, określić strefy o różnej intensywności wymiany ciepła.

### Badania doświadczalne

Badania współczynnika wnikanie ciepła przeprowadzono w mieszalniku o średnicy wewnętrznej  $D = 0,3$  m, napełnionym cieczą do

wysokości  $H = D$ . Mieszalnik wyposażono w układ grzewczy/chłodzący z rurami pionowymi i mieszadło turbinowe *Rushtona* lub mieszadło A 315 ( $d = 0,33D$ ). Wkład grzewczy z rurami pionowymi o średnicy podziałowej  $D_w = 0,7D$ , składała się z dwudziestu czterech pojedynczych rur  $J = 24$  o średnicy  $B_w = 0,017D$  (Rys. 1). W miejscu jednego z elementów rurowych umieszczona była sonda pomiarowa. Na powierzchni sondy znajdowało się 12 elektrod niklowych o średnicy 4 mm. Badania doświadczalne przeprowadzono metodą elektrochemiczną [12], w zakresie burzliwego przepływu płynu ( $Re \in < 2,8 \cdot 10^4; 6,7 \cdot 10^4 >$ ).



Rys. 1. Położenie wkładu grzewczego z rurami pionowymi oraz sondy pomiarowej w mieszalniku

Mierzono rozkład prądu dyfuzyjnego  $I_d$  na ścianie pionowego elementu rurowego dla danych częstości obrotów mieszadła  $n$ . Na podstawie danych doświadczalnych obliczano lokalny współczynnik wnikania masy  $k_A$ , [m/s] [12]:

$$k_A = f(I_d) = \frac{I_d}{z_e F S C_{A0}} \quad (1)$$

gdzie:

- $I_d$  – natężenie prądu dyfuzyjnego, [A],
- $z_e$  – liczba elektronów biorących udział w reakcji,
- $S$  – powierzchnia elektrody, [m<sup>2</sup>],
- $F$  – stała Faradaya, [C/mol],
- $C_{A0}$  – stężenie składnika A, [kmol/m<sup>3</sup>].

Przy założeniu analogii pomiędzy procesami wnikania masy i ciepła współczynnik  $\alpha$  obliczano z równania [11]:

$$\alpha = f(k_A) = c_p \rho \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} k_A \quad (2)$$

gdzie:

- $c_p$  – ciepło właściwe, [J/kgK],
- $\rho$  – gęstość cieczy, [kg/m<sup>3</sup>],
- $Sc$  – liczba Schmidta ( $Sc = \nu/D_A$ ),
- $Pr$  – liczba Prandtla ( $Pr = c_p \eta / \lambda$ ).

W obliczeniach współczynnika wnikania ciepła  $\alpha_1$  uwzględniano współczynnik korekcyjny stosowany wówczas, gdy badania prowadzone są przy użyciu katod o małych wymiarach [11]:

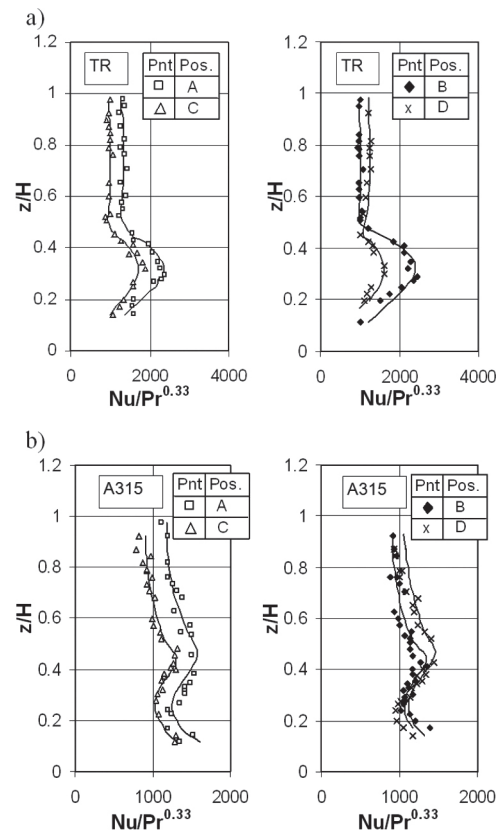
$$\alpha_1 = p\alpha = p \frac{I_d c_p \rho}{z_e F S C_{A0}} \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (3)$$

gdzie:  $p$  – współczynnik korekcyjny.

### Wyniki badań

Na podstawie otrzymanych danych określono kątowe i osiowe rozkłady współczynnika wnikania ciepła  $\alpha_1 = f(\varphi/2\pi, z/H)$  w zbiorniku wyposażonym w mieszadło turbinowe *Rushtona* lub mieszadło A 315.

Rozkłady współczynnika wnikania ciepła  $\alpha_1$ , dla stałej wartości liczby Reynoldsa ( $Re = 5,1 \cdot 10^4$ ), przedstawiono na rys. 2 w postaci funkcji  $Nu/Pr^{0,33} = f(z/H)$ , gdzie poszczególne liczby bezwymiarowe definiowano jako  $Nu = (\alpha_1 D)/\lambda$ ,  $Pr = c_p \eta / \lambda$ ,  $Re = nd^2 \rho / \eta$ .



Rys. 2. Rozkłady współczynnika wnikania ciepła  $Nu/Pr^{0,33} = f(z/H)$  w zależności od położenia punktu pomiaru (A, B, C, D (Rys. 1)) na powierzchni pionowego elementu rurowego;  $Re = 5,1 \cdot 10^4$ ; a) mieszadło turbinowe *Rushtona* (TR), b) mieszadło A 315

Współczynniki wnikania ciepła zmieniają się w zależności od bezwymiarowych współrzędnych kątowej  $\varphi/2\pi$  oraz osiowej  $z/H$  w zależności od typu użytego mieszadła, a w szczególności od wytwarzanej przez nie cyrkulacji cieczy. W zbiorniku z mieszadłem turbinowym *Rushtona* znaczące rozkłady współczynnika wnikania ciepła  $\alpha_1$  występują dla bezwymiarowej współrzędnej osiowej  $z/H$  (Rys. 2a). Największe wartości współczynnika wnikania ciepła otrzymano, w tym przypadku na wysokości zawieszenia mieszadła turbinowego *Rushtona* ( $z/H = 0,33$ ) w pozycji B oraz A sondy pomiarowej, gdzie występował najsilniejszy opływ elektrod cieczą. Na poziomie zmiennej  $z/H = 0,33$  najmniejsze wartości lokalnego współczynnika wnikania ciepła  $\alpha_1$  charakteryzują położenie D sondy pomiarowej. W tej pozycji opływ cieczą elektrod na sondzie może być utrudniony, ponieważ są one ustawione przodem do ścianki zbiornika.

Łagodniejsze dwuwymiarowe profile współczynnika wnikania ciepła otrzymano dla mieszalnika z mieszadłem A 315 (Rys. 2b). W tym przypadku, większe wartości współczynnika wnikania ciepła odpowiadają ustawieniu sondy pomiarowej w pozycji B oraz A w obszarze pod mieszadłem ( $z/H = 0,2$ ). Wskazuje się, że w obszarze nad mieszadłem ( $z/H = 0,5$ ) wyższe współczynniki wnikania ciepła uzyskano w pozycji D sondy. Sugeruje to, że pomiędzy pionowym elementem rurowym a ścianką zbiornika występuje silne zawirowanie cieczy. Powyżej wysokości  $z/H > 0,5$  lokalne współczynniki wnikania ciepła  $\alpha_1$  zmieniają się, stopniowo malejąc. Wyniki badań, dla zbiornika z pionowymi przegrodami rurowymi i mieszadłem turbinowym *Rushtona* lub mieszadłem A 315 opisano równaniem:

$$Nu = \frac{\alpha_1 D}{\lambda} = C \left( \frac{\varphi}{2\pi}, \frac{z}{H} \right) Re^A Pr^{0,33} = C_o Re^A Pr^{0,33} f \left( \frac{\varphi}{2\pi}, \frac{z}{H} \right) \quad (4)$$

gdzie funkcja rozkładu  $f(\varphi/2\pi, z/H)$  dana jest zależnością

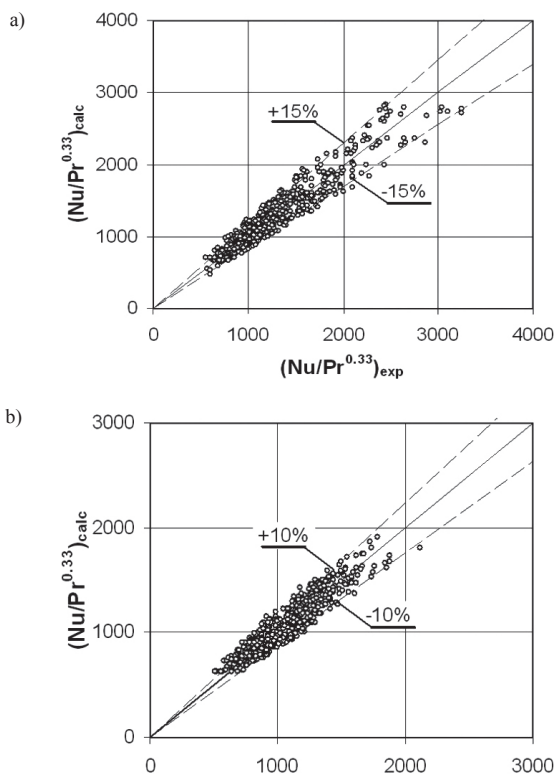
$$f\left(\frac{\varphi}{2\pi}, \frac{z}{H}\right) = \left[ b_1 \left( \frac{z}{H} \right) + 1 \right] \left[ b_2 \left( \frac{\varphi}{2\pi} \right) + 1 \right] \exp \left[ b_3 \left( \frac{z}{H} \right)^2 + b_4 \left( \frac{z}{H} \right) + 1 \right] \times \exp \left[ b_5 \left( \frac{\varphi}{2\pi} \right)^2 + b_6 \left( \frac{\varphi}{2\pi} \right) + 1 \right] \quad (5)$$

Współczynniki w równaniu (4) dla przepływu burzliwego płynu ( $Re \in <2,8 \cdot 10^4, 6,7 \cdot 10^4>$ ) zamieszczono w tab. 1.

Tab. 1. Zestawienie wartości  $C_o$ ,  $A$  oraz  $b_i$  w równaniu (4), zakresów stosowalności oraz średnich błędów względnych  $\Delta$  dla mieszalnika wyposażonego w układ grzewczy z rurami pionowymi

Mieszadło	Turbinowe <i>Rushtona</i>		A 315	
Zakres $z/H$	<0; 0,5>	(0,5; 1>	<0; 0,5>	(0,5; 1>
Zakres $\varphi/2\pi$	<0; 1>	<0; 1>	<0; 1>	<0; 1>
$C_o$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$6,44 \cdot 10^{-2}$	0,303	0,316
$A$	0,67	0,67	0,67	0,67
$b_i$	$b_1 = -1,818$ $b_2 = 12,396$ $b_3 = -9,182$ $b_4 = 10,353$ $b_5 = 3,937$ $b_6 = -6,545$	$b_1 = 6,13 \cdot 10^{-4}$ $b_2 = -0,864$ $b_3 = -1,213$ $b_4 = 1,816$ $b_5 = 2,858$ $b_6 = -0,86$	$b_1 = -1,849$ $b_2 = -0,709$ $b_3 = 18,248$ $b_4 = -5,771$ $b_5 = 1,468$ $b_6 = -0,235$	$b_1 = 2,338$ $b_2 = -0,849$ $b_3 = 1,703$ $b_4 = -3,922$ $b_5 = 2,602$ $b_6 = -0,716$
Zakres $Re$	$2,9 \cdot 10^4$ $6,7 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^4$ $6,7 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$ $6,4 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$ $6,4 \cdot 10^4$
$\pm \Delta, \%$	$\pm 15,1$	$\pm 11,2$	$\pm 10,1$	$\pm 10,0$

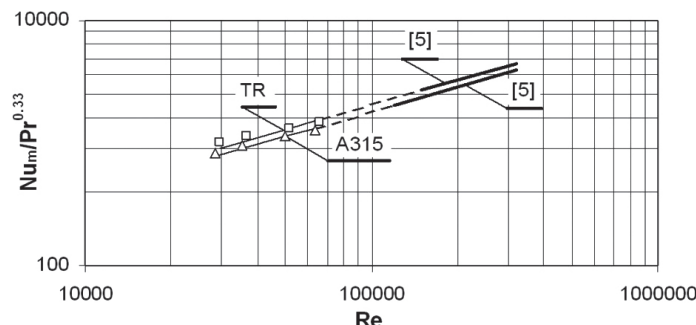
Wyniki doświadczalnych badań lokalnego współczynnika wnikania ciepła otrzymane dla zbiornika z mieszadłem turbinowym *Rushtona* lub mieszadłem A 315, porównano na rys. 3 z odpowiednimi danymi obliczonymi z równania (4).



Rys. 3. Porównanie wartości doświadczalnych  $(Nu/Pr)^{0.33}_{exp}$  z wartościami obliczonymi  $(Nu/Pr)^{0.33}_{calc}$ ;  $Re \neq const$ ; a) mieszadło turbinowe *Rushtona*, b) mieszadło A 315

Rozrzut punktów zależności  $(Nu/Pr)^{0.33}_{calc} = f((Nu/Pr)^{0.33}_{exp})$  na rys. 3 potwierdza stosunkowo dobrą zgodność zaproponowanego równ. (4) z wynikami badań doświadczalnych.

Wyniki pomiarów lokalnych wartości współczynnika wnikania ciepła uśredniono numerycznie po powierzchni pionowego elementu rurowego otrzymując zbiór wartości  $Nu_m/Pr^{0.33}$  w zakresie  $Re \in <2,8 \cdot 10^4, 6,7 \cdot 10^4>$ . Zależność  $Nu_m/Pr^{0.33} = f(Re)$  dla obu mieszadeł porównano na rys. 4 z literaturowymi [5] wartościami otrzymanymi metodą termiczną.



Rys. 4. Porównanie zależności  $Nu_m/Pr^{0.33} = f(Re)$  uzyskanej przy użyciu metody elektrochemicznej oraz termicznej [5]; mieszadło turbinowe *Rushtona* (TR) lub A 315

Wyniki otrzymane obiema metodami dotyczą burzliwego reżimu przepływu cieczy w mieszalniku, chociaż zakresy przepływu w obu metodach nie pokrywają się, co jest spowodowane inną skalą mieszalników. Pomiary w metodzie elektrochemicznej zostały przeprowadzone w zbiorniku o średnicy wewnętrznej  $D = 0,3$  m, a w termicznej  $D = 0,6$  m. Jednak ułożenie punktów doświadczalnych, otrzymanych z metody elektrochemicznej wzdłuż linii opisanych równaniami uzyskanymi z metody termicznej [5], świadczy o stosunkowo dobrej zgodności wyników otrzymanych obiema metodami.

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski, obowiązujące w zakresie wykonanych pomiarów:

- lokalne wartości współczynnika wnikania ciepła zależą od generowanej przez dane mieszadło cyrkulacji cieczy oraz położenia punktu pomiaru ( $\varphi, z$ ) na powierzchni pionowego elementu rurowego.
- na podstawie zaproponowanego równania (4) można określić różnicę wartości współczynnika wnikania ciepła w obszarze przysięcinnym pionowego elementu rurowego w zbiorniku z mieszadłem turbinowym *Rushtona* lub mieszadłem A 315.
- wyniki badań mogą mieć zastosowanie przy projektowaniu aparatów zbiornikowych do prowadzenia procesów z wykorzystaniem układu grzewczego/chłodzącego z rurami pionowymi.

## LITERATURA

- [1] I. Dunlap, J. H. Rushton: Chem. Eng. Progr., **49**, 5, 137 (1953).
- [2] G. Havas, A. Deak, J. Sawinsky: Chem. Eng. J., **28**, 161 (1982).
- [3] W. Kai, Y. Shengyao: Chem. Eng. Sci., **44**, nr 1, 33 (1989).
- [4] M. Major: Badania wnikania ciepła od pionowej wężownicy do cieczy pseudoplastycznej poddawanej mieszanin w zbiorniku z mieszadłem obrotowym. PS, Szczecin, 2000.
- [5] M. Michalska: Wnikanie ciepła w mieszalniku zaopatrzonym w rurę wężownicę pionową oraz mieszadło obrotowe. PS, Szczecin, 2001.
- [6] T. A. Post: Diss. ETH No 7249, Switzerland, Zurich, 1983.
- [7] J. R. Bourne, O. Dossenbach, T. A. Post: ICHEME Symp. Series, **89**, 177 (1984).
- [8] K. L. Man, M. F. Edwards, G. T. Polley: ICHEME Symp. Series, **89**, 193 (1984).
- [9] J. R. Bourne J.R., O. Dossenbach, T. A. Post: The 5<sup>th</sup> European Conf. on Mixing, Wuerzburg, Germany, (1985).
- [10] K. L. Man K. L.: The 5<sup>th</sup> European Conf. on Mixing, Wuerzburg, Germany, 1985.
- [11] F. Stręk, J. Karcz, M. Kaznowska: ICHEME Symp. Series, 136, 407 (1994).
- [12] F. Stręk, J. Karcz: Inż. Chem. i Proc., **20**, 3 (1999).
- [13] J. Karcz, F. Stręk, M. Michalska: Inż. Chem. i Proc., **22**, nr 3C, 657 (2001).
- [14] M. Major-Godłowska, J. Karcz: Inż. Ap. Chem., **43**, nr 3s, 98 (2004).