

Badania wymiany ciepła w układzie wodne roztwory CMC — powietrze dla reaktora z dwoma mieszadłami

Joanna Karcz
Instytut Inżynierii Chemicznej
i Chemii Fizycznej
Politechnika Szczecińska
Szczecin

W celu zapewnienia optymalnych warunków produkcji większość procesów realizowanych w bioreaktorach przeprowadzana jest w wąskim zakresie temperatur. Wymagana jest ponadto ścisła kontrola temperatury układu, zwykle z dokładnością — 1°C . Systemy chłodzące bioreaktora powinny być wobec tego tak zaprojektowane, aby możliwe było efektywne usunięcie ciepła wytworzonego w wyniku metabolizmu mikroorganizmów. Powierzchnia wymiany ciepła (płaszcz lub węzownicy) obliczana jest na podstawie równań, opisujących proces wymiany ciepła w funkcji parametrów hydrodynamicznych i geometrycznych układu oraz właściwości fizycznych płynu. Jeśli bioreaktor zaopatrzony jest w mieszadło, to w takim przypadku współczynnik wnikania ciepła α , liczony po stronie płynu wypełniającego aparat, zależy od natężenia przepływu gazu, częstości obrotów mieszadła, typu mieszadła, geometrii układu zbiornik — mieszadło, a także rodzaju płynu, który z reguły charakteryzuje się złożonymi właściwościami reologicznymi. Z uwagi na specyficzną geometrię bioreaktora (bardziej smukły zbiornik, więcej niż jedno mieszadło na wspólnym wale) oraz właściwości płynu, występują trudności z doбором odpowiedniego równania do obliczenia współczynnika wnikania ciepła na podstawie danych literaturowych [4, 3], gdyż dotychczasowe wyniki badań nie uwzględniały wpływu tych czynników na wartość współczynnika α .

W celu uzupełnienia tych braków, uzasadnione było podjęcie doświadczalnych badań wnikania ciepła dla ogrzewanego płaszczowo niestandardowego reaktora z dwoma mieszadłami i układu dwufazowego ciecz nienewtonowska — powietrze.

2. Cel i zakres badań

Celem badań było uzyskanie doświadczalnych korelacji, opisujących proces wnikania ciepła w układzie wodne roztwory soli sodowej karboksymetylocelulozy (CMC) — powietrze, poddawany mieszaniu za pomocą mieszadeł

obrotowych. Płyn modelowy, wodny roztwór CMC należy do grupy cieczy pseudoplastycznych, których właściwości reologiczne można opisać równaniem potęgowym Ostwalda.

W badaniach wykorzystano technikę pomiaru wartości lokalnych współczynnika wnikania ciepła za pomocą źródła ciepła, w związku z czym możliwe stało się określenie rozkładów tego współczynnika na powierzchni wymiany ciepła.

Badania przeprowadzono w reaktorze o średnicy wewnętrznej $D = 0,3$ m, zaopatrzonym w przegrody i dwa standardowe mieszadła turbinowe tarczowe. Wysokość napełnienia cieczą zbiornika wynosiła $H = 2D$. Parametry geometryczne aparatu przedstawione są na rys. 1.

Pomiary wykonywano zarówno dla ciekłego układu jednofazowego jak i układu ciecz-gaz w zakresie częstości obrotów mieszadła $n[1/s] \in <5; 10>$. W przypadku układu dwufazowego dolny zakres częstości obrotów mieszadła ustalano na podstawie wizualnej oceny charakteru przepływu pęcherzyków gazu w obszarze dolnego mieszadła. Jako najmniejsze, przyjmowano takie częstości obrotów mieszadła n , przy których pęcherzyki gazu utrzymują się w przepływie promieniowym w obszarze mieszadła [2, 7].

Natężenie przepływu powietrza \dot{V}_g zmieniano w przedziale $<0; 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}>$, co odpowiada zakresowi zmian umownej liniowej prędkości gazu $w_{og} [\text{m/s}] \in <0; 5,1 \cdot 10^{-3}>$ (prędkość w_{og} jest zdefiniowana jako $w_{og} = \dot{V}_g / (\pi D^2 / 4)$).

Badania wykonywano dla roztworów CMC o dwóch stężeniach 1% oraz 2% mas. Równanie krzywych płynięcia dla tych roztworów określano na podstawie wyników pomiarów naprężenia stycznego τ w funkcji szybkości ścinania $\dot{\gamma}$, w różnych temperaturach, przy użyciu wiskozymetru „Rheotest”. Wyniki pomiarów aproksymowano równaniem typu

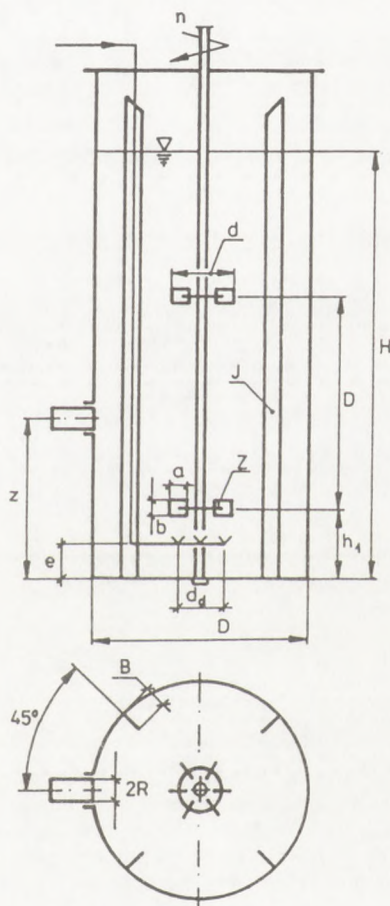
$$\tau = a \cdot \dot{\gamma}^b \quad (1)$$

W temperaturze 20°C stałe mają następujące wartości:

$a = 1,1205$; $b = 0,58$ — dla roztworu 1% CMC oraz $a = 4,1327$;

$b = 0,58$ — dla roztworu 2% CMC.

Rys. 1. Parametry geometryczne reaktora z mieszadłem: $D = 0,3$ m; $H = 2D$; $d = 0,33D$; $a = 0,25d$; $b = 0,2d$; $Z = 6$; $h_1 = 0,33D$; $h_2 = 1,33D$; $J = 4$; $B = 0,1D$; $d_d = 0,7d$; $e = 0,5h$.



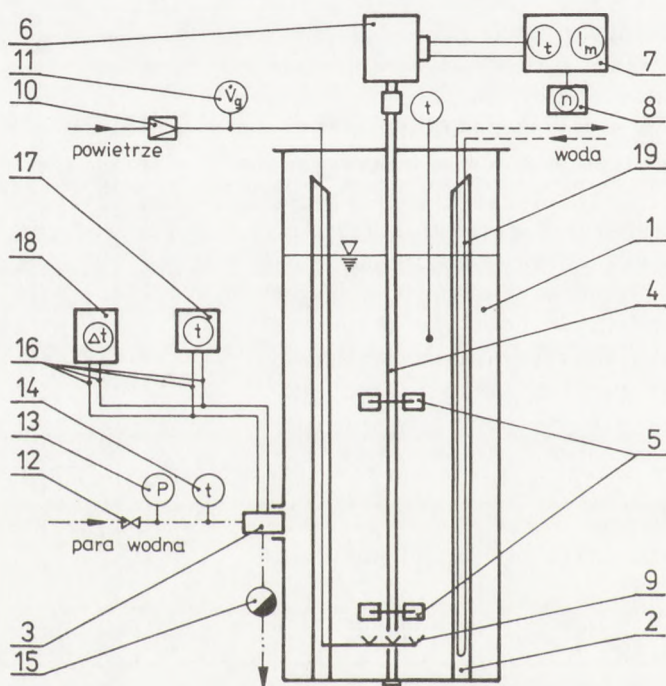
3. Część doświadczalna

Schemat aparatury doświadczalnej przedstawiono na rys. 2.

Zbiornik reaktora (1) wykonano ze szkła organicznego o grubości 6 mm. Reaktor zbudowano z segmentów o różnych wysokościach tak dobranych, aby dzięki ich przestawianiu możliwe było usytuowanie źródła ciepła na ścianie aparatu, w różnych odległościach od dna reaktora. Do jednej z przegród (2) przymocowano chłodnicę, co pozwalało na utrzymanie stałej temperatury mieszanego układu.

Na wale (4) napędzanym bocznikowym silnikiem prądu stałego (6) zamontowano dwa mieszadła turbinowe tarczowe (5). Do regulacji i kontroli pracy silnika służyło urządzenie sterujące (7). Liczbę obrotów mieszadła rejestrowano metodą fotoelektryczną za pomocą elektronicznego licznika obrotów (8) z odczytem cyfrowym.

Do reaktora doprowadzano powietrze z sieci poprzez dystrybutor gazu (9) w kształcie pierścienia o średnicy 0,07 m. Ciśnienie powietrza regulowano



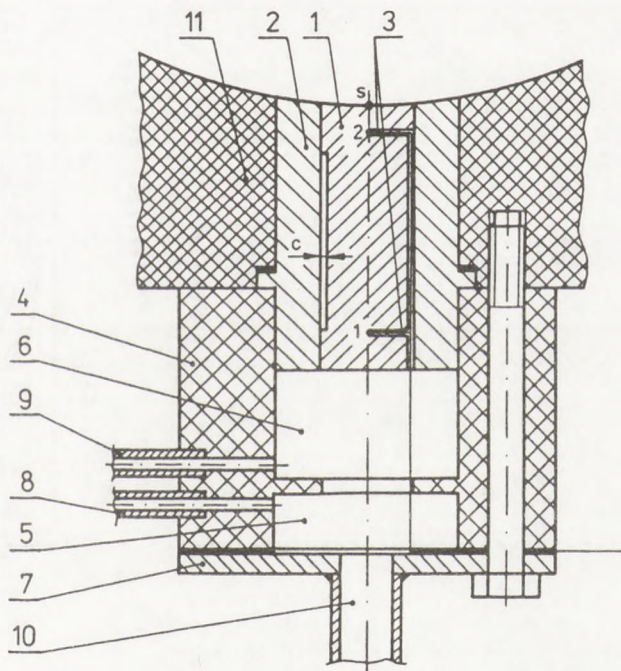
Rys. 2. Schemat aparatury doświadczalnej: 1 — zbiornik reaktora, 2 — przegroda, 3 — lokalne źródło ciepła, 4 — wał mieszadła, 5 — mieszadło, 6 — silnik, 7 — urządzenie sterujące, 8 — elektroniczny licznik obrotów, 9 — dystrybutor gazu, 10 — zawór redukcyjny, 11 — rotametr, 12 — zawór, 13 — manometr, 14 — termometr, 15 — garnek kondensacyjny, 16 — termoelementy, 17 — termostat, 18 — rejestrator Mk6.

zaworem redukcyjnym (10), a natężenie przepływu gazu odczytywano na rotametrze (11).

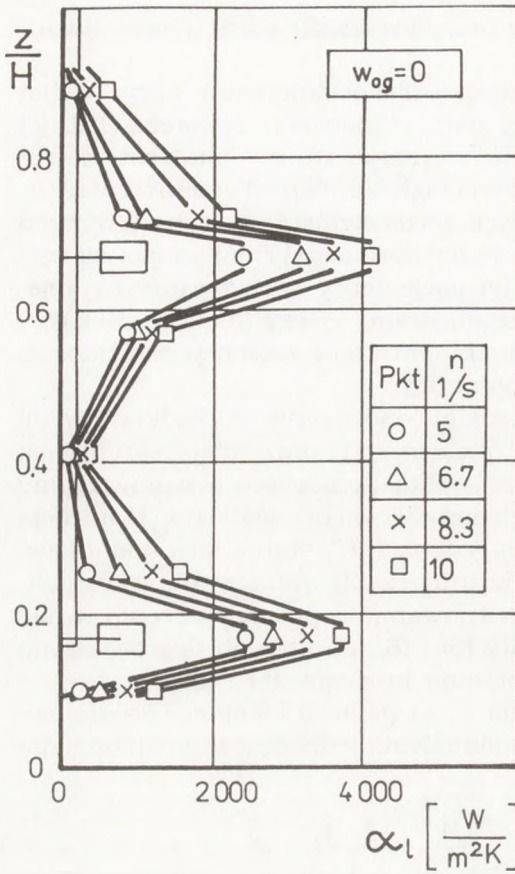
Lokalne źródło ciepła (3) [5] ogrzewano niskociśnieniową parą wodną o temperaturze ok. 102°C. Przepływ tej pary regulowano zaworem (12), jej ciśnienie odczytywano na manometrze (13), a temperaturę — na termometrze laboratoryjnym (14). Odpyływający w sposób ciągły kondensat zbierano w garnku kondensacyjnym (15). „Zimne” końce termoelementów, zabudowanych w lokalnym źródle ciepła, umieszczono w termostacie (17). Wartości sił termoelektrycznych wskazywanych przez termoelementy odczytywano na rejestratorze MK6 (18). Średnią temperaturę mieszanej cieczy (układu ciecz-gaz) mierzono za pomocą sondy pomiarowej, zbudowanej z trzech par różnicowo połączonych termoelementów miedz-konstantan.

Schemat lokalnego źródła ciepła przedstawiono na rys. 3. Podstawowymi częściami tego urządzenia były wałek pomiarowy (1) oraz tuleja ekranująca (2), które wykonano z miedzi. W otwory wałka pomiarowego wprowadzono dwa termoelementy nikiel — chromonikielina (3). Między wałkiem (1) a tuleją (2) istniała wąska szczelina powietrzna o grubości „c”, stanowiąca dodatkową izolację. Wałek pomiarowy (1) i tuleję ekranującą (2) wbudowano w tekstolitową obudowę kołnierzową (4), tak skonstruowaną, że po umieszczeniu w niej elementów (1) i (2) powstają dwie komory (5) i (6), do których doprowadzono parę wodną. Powstający kondensat odbierano króćcami (8) i (9).

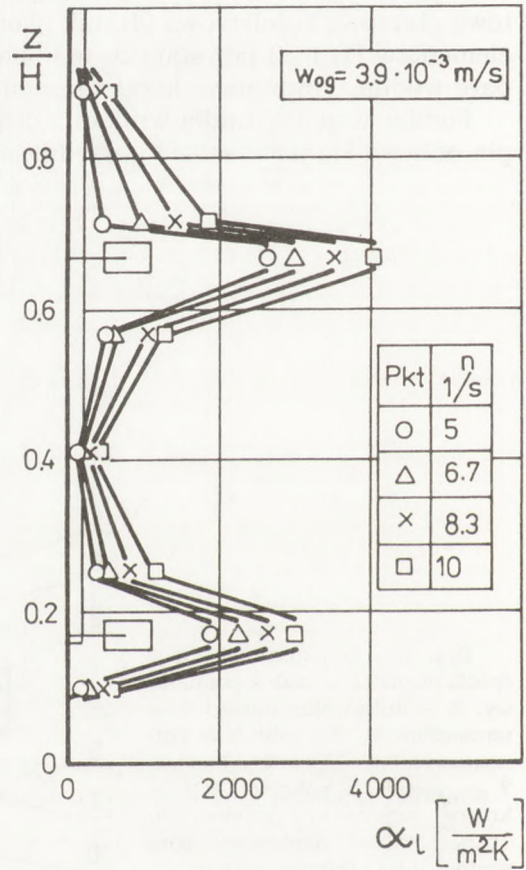
Pomiar współczynnika wnikania ciepła α_1 za pomocą lokalnego źródła ciepła odbywa się na zasadzie pośredniego określenia jednostkowego strumienia



Rys. 3. Schemat lokalnego źródła ciepła: 1 — wałek pomiarowy, 2 — tuleja ekranująca, 3 — termoelementy, 4 — obudowa kołnierzowa, 5,6 — komory grzejne, 7 — metalowa pokrywa, 8,9 — króćce odpływowe kondensatu, 10 — króciec dopływowy pary wodnej, 11 — ściana reaktora.



Rys. 4. Zależność $\alpha_1 = f(z/H)$; 1% roztwór CMC, ($w_{og} = 0$).



Rys. 5. Zależność $\alpha_1 = f(z/H)$; 1% roztwór CMC — powietrze, $w_{og} = 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

ciepła q oraz napędowej różnicy temperatur ΔT_1 między zewnętrzną ścianką elementu pomiarowego T_s a mieszaną cieczą T_m

$$\alpha_1 = \frac{q}{\Delta T_1} = \frac{q}{T_s - T_m} \quad (2)$$

Szczegółowy opis metody pomiaru współczynnika α_1 za pomocą lokalnego źródła ciepła znajduje się w pracy [1].

4. Opracowanie i dyskusja wyników badań

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano zbiór lokalnych wartości współczynnika wnikania ciepła α_1 w funkcji częstości obrotów mieszadła n , umownej liniowej prędkości gazu w_{og} oraz osiowej współrzędnej położenia z/H .

Rozkłady współczynnika wnikania ciepła α_1 wzdłuż ściany reaktora dla 1% wodnego roztworu CMC (bez gazu) ilustruje rys. 4. Analogiczne rozkłady $\alpha_1 = f(z/H)$ dla układu 1% wodny roztwór CMC — powietrze, wybranej wartości umownej liniowej prędkości gazu $w_{og} = 3,9 \cdot 10^{-3}$ m/s i różnych częstości obrotów mieszadła n pokazane są na rys. 5. W przypadku płynu pseudoplastycznego jakim jest CMC, intensywność wnikania ciepła w centrum strefy między mieszadłami jest znacznie mniejsza, aniżeli w strefie mieszadeł. Wprowadzenie gazu do reaktora zdecydowanie redukuje współczynnik wnikania ciepła w obszarze dolnego mieszadła. Wpływ na to ma niewątpliwie wielkość powietrznych kawern za łopatkami mieszadła, które w porównaniu z płynami o małej lepkości są większe, mają nieco inny kształt. W literaturze [6] określa się je mianem *anvil cavities* (kawerny te mają powierzchnię za łopatką w kształcie kowadła). Porównanie wpływu obecności gazu na rozkład współczynnika α_1 w układzie 1% CMC — powietrze dla wybranej częstości obrotów mieszadła $n = 10$ 1/s i różnych prędkości w_{og} przedstawiono na rys. 6, z którego wynika, że w dolnej części reaktora, zaopatrzonego w dwa mieszadła turbinowe tarczowe, wpływ ten jest większy.

Tak jak wynika z rys. 4 + 6, strefy najintensywniejszej wymiany ciepła umiejscowione są na wysokości zawieszenia mieszadeł.

Średnie wartości współczynnika wnikania ciepła α w jedno- i dwufazowych roztworach CMC określono metodą całkowania numerycznego. Zależność średniej wartości współczynnika α od umownej liniowej prędkości w_{og} ilustruje rys. 7. Współczynnik α zmniejsza się ze wzrostem prędkości w_{og} zarówno w układzie 1% CMC — powietrze (rys. 7a), jak i w układzie 2% CMC — powietrze (rys. 7b). Spadek ten wynosi maksymalnie 20%.

Rezultaty pomiarów, otrzymane zarówno dla cieczy, jak i dwufazowych układów 1% oraz 2% wodne roztwory CMC — powietrze aproksymowano ze średnim błędem względnym $\pm 5,5\%$ następującym równaniem:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} = 0,73 \cdot Re^{0,67} \cdot Pr^{0,33} \cdot Vi^{0,14} \cdot [1 - 73,57 \cdot Fr_g^{0,5}]$$

$$\text{gdzie } Fr_g = \frac{w_{og}}{g \cdot D} \quad (3)$$

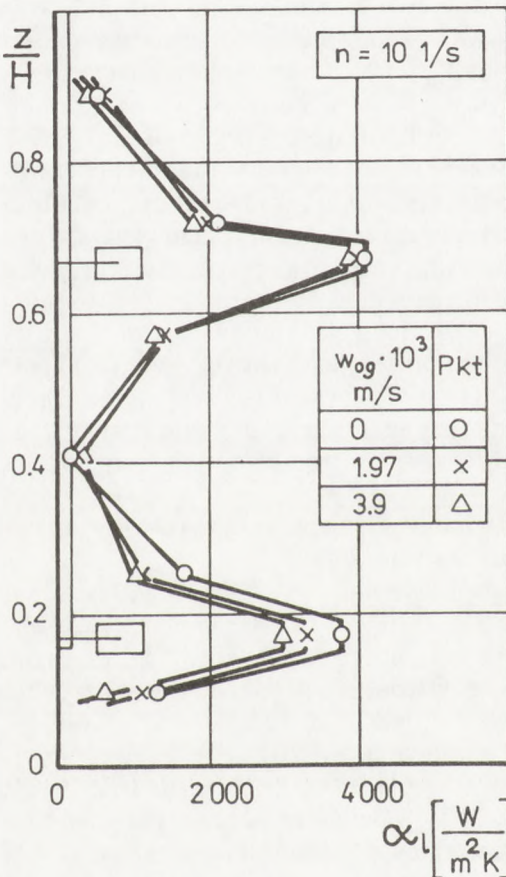
Równanie (3) obowiązuje w zakresie liczb kryterialnych z przedziału $Re \in <140; 650>$; $Pr \in <1100; 4500>$ oraz $Fr_g \in <0; 8,8 \cdot 10^{-6}>$.

Liczby kryterialne w równaniu (3) definiowane są na podstawie właściwości fizycznych fazy ciągłej. Ciecze pseudoplastyczne charakteryzują się dużymi wartościami zastępczej lepkości pozornej η_{ae} . W przypadku obu badanych roztworów CMC lepkość tę obliczano ze wzoru:

$$\eta_{ae} = k \cdot \bar{\dot{\gamma}}^{m-1} \quad (4)$$

gdzie k oraz m są odpowiednio współczynnikiem i wykładnikiem w równaniu krzywej płynięcia, natomiast zastępczą szybkość ścinania $\bar{\dot{\gamma}}$ określano z równania:

$$\bar{\dot{\gamma}} = B \cdot n \quad (5)$$



przyjmując dla mieszadła turbino-
wego tarczowego $B = 11,5$ [4].
W temperaturze 20°C i w zakresie
przeprowadzonych pomiarów zastę-
pcza lepkość pozorna zmieniała się
w przedziale $\eta_{ae} <0,15 \text{ Pa} \cdot \text{s}; 0,65$
 $\text{Pa} \cdot \text{s}>$.

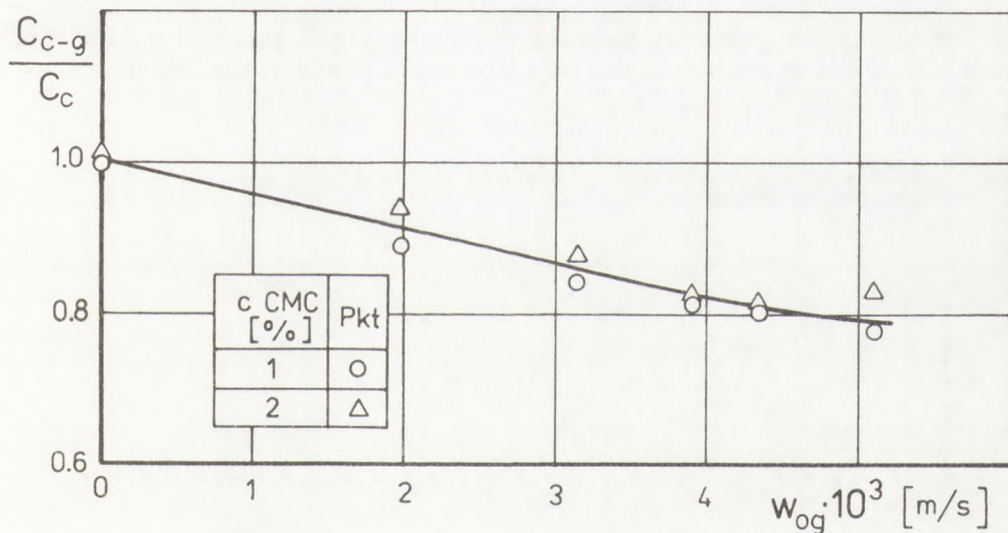
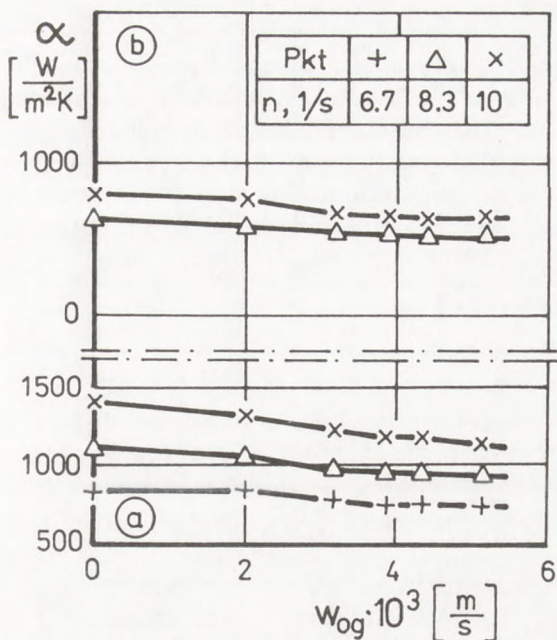
Jeżeli do reaktora nie jest dopro-
wadzany gaz ($Fr_g = w_{og}^2/D \cdot g = 0$),
wówczas zależność (3) przyjmuje
praktycznie postać równania, opisu-
jącego współczynnik wnikania ciepła
dla cieczy newtonowskiej (4).

Badania wykazały, że w ukła-
dach wodne roztwory CMC — po-
wietrze spadek średniej wartości
współczynnika wnikania ciepła wy-
niósł maksymalnie 20%, w zakresie
stosowanych umownych prędkości
gazu w_{og} . Wyniki zamieszczono na
rys. 8. Dla układów roztwory CMC
— powietrze w postaci C_{c-g}/C_c

Rys. 6. Zależność $\alpha_1 = f(z/H)$; 1% roztwór
CMC — powietrze, $n = 10 \text{ 1/s}$.

Rys. 7. Zależność $\alpha = f(w_{og})$; a) układ 1% CMC — powietrze, b) układ 2% CMC — powietrze.

$\alpha = f(w_{og})$, gdzie $C_{c-g} = C_c \cdot f(w_{og})$, a C_c oznacza stałą w równaniu (3). Wielkość zmiany współczynnika wnikania ciepła w układzie ciecz-gaz świadczy o tym, że faza gazowa oddziałuje na hydrodynamikę cieczy głównie w objętości (rdzeniu) reaktora z mieszadłem. Jej wpływ w obszarze przyscienym jest natomiast znacznie mniejszy.



Rys. 8. Funkcja $C_{c-g}/C_c = f(w_{og})$ dla układów wodne roztwory CMC — powietrze.

5. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że:

— największa intensywność wnikania ciepła w obszarze przyściennym reaktora występuje w obszarach mieszadeł,

— obecność powietrza w mieszanych mechanicznie roztworach soli sodowej CMC wpływa na zmniejszenie średniej wartości współczynnika wnikania ciepła maksymalnie o ok. 20%.

Wyniki pomiarów opracowano w postaci zależności opisującej średnią wartość współczynnika wnikania ciepła — równanie (3).

Wykaz oznaczeń

a — długość łopatki mieszadła, m; B — szerokość przegrody, m; b — szerokość łopatki mieszadła, m; c_p — ciepło właściwe, J/kg · deg; D — średnica wewnętrzna reaktora, m; d — średnica mieszadła, m; d_d — średnica dystrybutora gazu, m; e — odległość dystrybutora gazu od dna zbiornika, m; g — przyspieszenie ziemskie, m/s²; H — wysokość napełnienia cieczą zbiornika, m; h_1 — odległość tarczy dolnego mieszadła od dna zbiornika, m; h_2 — odległość między mieszadłami, m; J — liczba przegród; n — częstość obrotów mieszadła, 1/s; q — jednostkowy strumień ciepła, W/m²; T_s — temperatura ścianki, K; T_m — temperatura płynu mieszanego, K; \dot{V}_g — natężenie przepływu gazu, m³/s; w_{og} — umowna liniowa prędkość gazu, m/s; z — współrzędna osiowa, m; α — średnia wartość współczynnika wnikania ciepła, W/m² · K; α_1 — lokalna wartość współczynnika wnikania ciepła, W/m² · K; $\dot{\gamma}$ — szybkość ścinania, 1/s; $\dot{\gamma}$ — zastępcza szybkość ścinania, 1/s; η_{ae} — zastępcza lepkość pozorna, Pa · s; λ — współczynnik przewodzenia ciepła, W/m · K; ρ — gęstość cieczy, kg/m³; τ — naprężenie styczne, N/m²;

Moduły bezwymiarowe

$$Fr_g = \frac{w_{og}^2}{g \cdot D}$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda}$$

$$Nu_1 = \frac{\alpha_1 \cdot D}{\lambda}$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta_{ae}}{\lambda}$$

$$Re = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\eta_{ae}}$$

$$Vi = \frac{\eta_{ae}}{\eta_{ae(s)}}$$

Literatura

1. Karcz J., (1991), Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej 447, 29, 1 - 168.
2. Nienow A. W., Warmoeskerken M. M. C. G., Smith J. M., Konno M., (1985), Paper 15, 5th European Conf. on Mixing, Wuerzburg, FRG.
3. Oldshue J. Y., (1983), Fluid Mixing Technology, McGraw — Hill Publ., New York.
4. Stręk F., (1981), Mieszanie i mieszalniki, wyd. II, WNT, Warszawa.
5. Stręk F., Karcz J., Góra W., (1991), Patent RP 153129.
6. Ulbrecht J. J., Patterson G. K., (wyd.), (1985), Mixing of Fluids by Mechanical Agitation, Gordon Breach Science Publ., New York.
7. Warmoeskerken M. M. C. G., (1986), Thesis, TH Delft.

Experimental studies of heat transfer in system CMC solutions — air for reactor equipped with two stirrers

Summary

Distributions of the heat transfer coefficient in systems aqueous solutions CMC — air were experimentally evaluated along the wall of the jacketed, baffled nonstandard stirred tank equipped with two Rushton disc turbines. Local values of the heat transfer coefficient were measured by means of a special heat flux meter. Measurements were carried out for stirred tank with inner diameter $D = 0,3$ m (liquid height in the tank $H = 2D$). Results of the investigations were approximated analytically.

key words:

stirring, heat transfer, gas-liquid system, nonnewtonian fluid, Rushton disc turbine.

Adres dla korespondencji:

Joanna Karcz, Instytut Inżynierii Chemicznej i Chemii Fizycznej, Politechnika Szczecińska, al. Piastów 42, 71-065 Szczecin.