

Jacek RÓŻAŃSKI

e-mail: jacek.rozanski@put.poznan.pl

Zakład Inżynierii i Aparatury Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

Wnikanie ciepła w odcinku rozbiegowym rury przy przepływie roztworów środków powierzchniowo czynnych

Wstęp

Znanym efektem towarzyszącym przepływowi roztworów środków powierzchniowo czynnych wykazującym zjawisko redukcji oporów przepływu jest znaczne obniżenie wartości współczynnika wnikania ciepła. Ze względu na potencjalne praktyczne wykorzystanie zjawiska redukcji oporów przepływu w zamkniętych układach centralnego ogrzewania znaczne obniżenie współczynnika wnikania ciepła jest niekorzystne, dlatego problem wymiany ciepła przy przepływie roztworów środków powierzchniowo czynnych budzi znaczne zainteresowanie. Uzyskanie informacji nad rozkładem lokalnych wartości współczynnika wnikania ciepła wzdłuż ścianki rury jest konieczne dla zrozumienia zjawiska i opracowania metod intensyfikacji tego procesu. Tematyka przedstawiona w prezentowanej pracy była wcześniej poruszana w pracach *Gasljevica* i *Matthysa* [1], *Li* i in. [2] oraz *Sersa* i *Yanga* [3].

Część doświadczalna

Metodyka badań

Lokalne wartości współczynników wnikania ciepła zostały wyznaczone metodą grzania elektrycznego. W badaniach wykorzystano odcinek rury wykonanej z miedzi ułożonej poziomo o długości 3,6 m i średnicy wewnętrznej $d = 2,499 \cdot 10^{-2}$ m. Umożliwiło to przeprowadzenie badań w zakresie bezwymiarowej odległości od wlotu x/d od 3 do 130. Pomiar temperatury powierzchni ścianki prowadzono przy użyciu czujników termoparowych umieszczonych na szczycie i dole rury, co dodatkowo pozwoliło przeprowadzić analizę wpływu konwekcji swobodnej na wartość współczynnika wnikania ciepła. W prezentowanych badaniach wlot do rury miał kształt dyszy *Witoszańskiego*, która w przypadku przepływu płynów newtonowskich zapewnia prawie prostokątny profil prędkości.

Wartość lokalnego współczynnika wnikania ciepła obliczano z zależności:

$$\alpha_x = \frac{q}{T_{w,x} - T_{b,x}} \quad (1)$$

gdzie: q W/m^2 jest gęstością strumienia ciepła, $T_{w,x}$ i $T_{b,x}$ to odpowiednio temperatura ścianki i średnia temperatura płynu w odległości x od wlotu do rury. Ponieważ w przypadku ogrzewania elektrycznego ścianki rury mamy do czynienia ze stałą gęstością strumienia ciepła, wartość temperatury $T_{b,x}$ obliczano z przekształcenia równania bilansu cieplnego.

Stopień redukcji współczynnika wnikania ciepła charakteryzowano za pomocą parametru HTR_x zdefiniowanego równaniem:

$$HTR_x = \frac{Nu_{x,t} - Nu_{x,s}}{Nu_{x,t}} 100 \quad (2)$$

w którym $Nu_{x,t}$ jest lokalną wartością liczby *Nusselta* obliczoną z równania zaproponowanego dla przepływu burzliwego płynów newtonowskich przez *Ghajara* i *Tama* [4]:

$$Nu_{x,t} = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,385} (x/d)^{-0,0054} (\eta/\eta_w)^{0,14} \quad (3)$$

a $Nu_{x,s}$ wyznaczoną doświadczalnie dla roztworów surfaktantów.

Dla analizy długości termicznego odcinka rozbiegowego zastosowano definicję bezwymiarowej temperatury *Toha* i *Ghajara* [5]:

$$\theta = \frac{T_{w,k} - T_{b,k}}{T_{w,k} - T_{b,k}} \quad (4)$$

W równaniu (4) $T_{w,k}$ i $T_{b,k}$ są wartościami temperatur uzyskanymi przy $x/d = 130$.

Jako płyn modelowy zastosowano wodne roztwory chlorku heksacylotrimetyloamoniowego (HTAC) o stężeniach $C_{p,s}$ równych 0,01; 0,02 i 0,04% z dodatkiem salicylanu sodu (NaSal). Stosunek molowy HTAC do NaSal wyniósł we wszystkich roztworach 1:2. Badania doświadczalne prowadzono w zakresie temperatur od 313 do 333K.

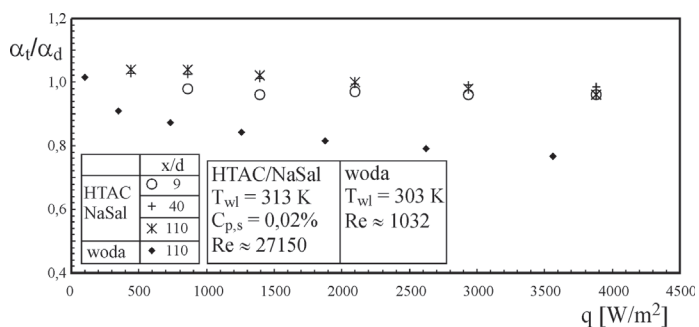
Potrzebne do obliczeń wartości współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego zostały przyjęte jak dla czystej wody w średniej temperaturze T_m . Przeprowadzono natomiast badania reologiczne dla analizowanych płynów przy użyciu dwóch reometrów: rotacyjnego *Physica MCR 301* i rurowego z wykorzystaniem przewodów o średnicy wewnętrznej $4,2 \cdot 10^{-3}$ i $8 \cdot 10^{-3}$ m. W przypadku reometru rotacyjnego w badaniach zastosowano układ współosiowych cylindrów z podwójną szczeliną zalecaną dla płynów o niskich lepkościach.

Podczas przepływu roztworów modelowych w rurze o średnicy $2,499 \cdot 10^{-2}$ m oszacowany zakres szybkości ścinania $\dot{\gamma}_w$ mieścił się w granicach od około 70 do $500 s^{-1}$. W takim przedziale zmian $\dot{\gamma}_w$ większość stosowanych roztworów charakteryzowała się stałą lepkością. Jedyny wyjątek stanowił roztwór o stężeniu 0,04% w temperaturze 313 K, który przy szybkościach ścinania powyżej $300 s^{-1}$ wykazywał właściwości rozrzedzane ścinaniem. W tym przypadku liczba *Reynoldsa* została obliczona z definicji zaproponowanej przez *Metznera* i *Reeda*.

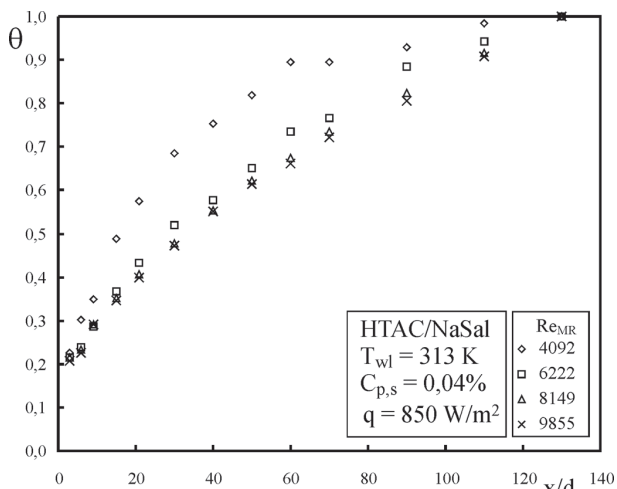
Analiza wyników badań

Z danych doświadczalnych przedstawionych w pracy *Gasljevica* i in. [6] dla roztworu *Ethoquadu T13/27* o stężeniu 0,15% wynika, że w przypadku przepływu roztworów środków powierzchniowo czynnych silny wpływ na proces wnikania ciepła wywiera konwekcja swobodna. Przy wyższych wartościach q ($>755 W/m^2$) różnica między współczynnikami wnikania ciepła wyliczonymi dla temperatury mierzonej na górze i dole rury sięgała 50%. Efekt ten zanikał dla roztworu *Ethoquadu T13/27* przy wartości iloczynu $(GrPr)/Re$ mniejszym od 3. Na rys. 1 przedstawiono zależność stosunku współczynników wnikania ciepła wyznaczonych dla szczytu α_t i dołu α_d rury w funkcji gęstości strumienia ciepła dla trzech bezwymiarowych odległości od wlotu równych 9, 40 i 110 przy przepływie roztworu HTAC/NaSal. Można zaobserwować, że dla wszystkich przedstawionych na wykresie przypadków wartość α_t/α_d mieści się w granicach od 1,04 do 0,96. Przykładowo dla zastosowanego zakresu zmian gęstości strumienia ciepła różnica między lokalną wartością średniej temperatury płynu a temperaturą ścianki przy $x/d = 110$ zmieniała się od wartości około 0,8 do 6,7 K, co odpowiadało zakresowi zmian wartości liczby *Grashofa* od 92000 do 895000 i iloczynu liczb $(GrPr)/Re$ od 5 do 146.

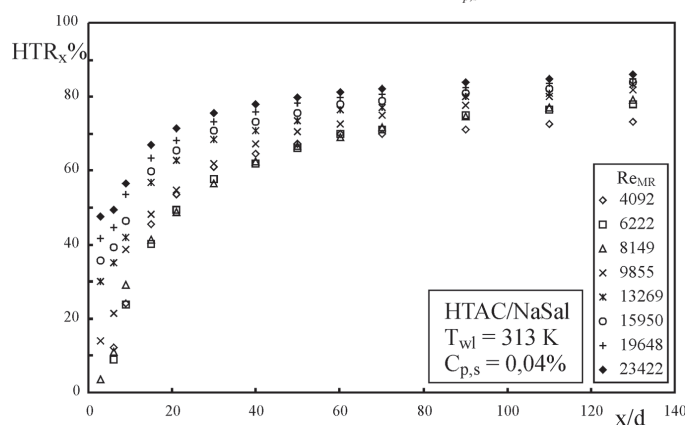
W celach porównawczych na rys. 1 przedstawiono także punkty doświadczalne uzyskane przy przepływie czystej wody w rurze w zakresie



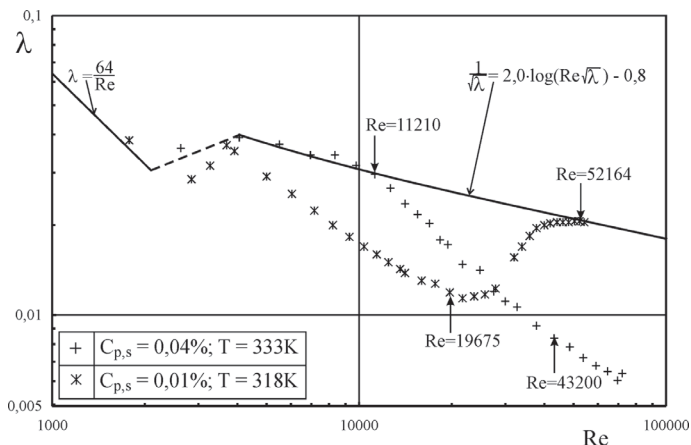
Rys. 1. Zależność lokalnych wartości α_t/α_d w funkcji gęstości strumienia ciepła



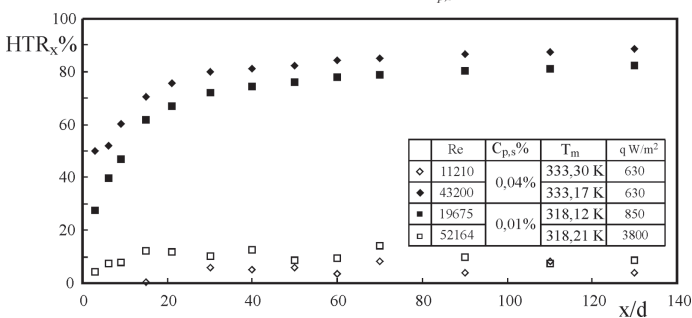
Rys. 2. Zależność bezwymiarowej temperatury θ w funkcji współrzędnej x/d dla roztworu HTAC/NaSal o stężeniu $C_{p,s} = 0,04\%$



Rys. 3. Zależność parametru HTR w funkcji x/d dla roztworu HTAC/NaSal o stężeniu $C_{p,s} = 0,04\%$



Rys. 4. Zależność współczynnika oporu przepływu w funkcji liczby Re dla roztworu HTAC/NaSal o stężeniu $C_{p,s} = 0,01$ i $0,04\%$



Rys. 5. Zależność parametru HTR_x w funkcji x/d dla roztworów HTAC/NaSal o stężeniu 0,01 i 0,04% przy wybranych wartościach liczby Re

laminarnym. W tym przypadku można zaobserwować silny spadek wartości α_s/α_d ze wzrostem gęstości strumienia ciepła. Przedstawione wyniki wskazują, że nie we wszystkich przypadkach konwekcja swobodna odgrywa znaczącą rolę przy przepływie roztworów SPC.

Na rys. 2 przedstawiono zależność lokalnych wartości bezwymiarowej temperatury θ w funkcji bezwymiarowej współrzędnej x/d . Z przedstawionych danych wynika, że w przebadanym zakresie zmienności liczb Re i x/d nie doszło do pełnego ukształtowania profilu temperatury. Istnienie bardzo długich odcinków rozbiegowych w przypadku przepływu roztworów polimerowych było opisane w pracach *Toha* i *Ghajara* [5] i *Matthysa* [7]. Autorzy pracy [5] zaobserwowali, że w przypadku roztworów *Separanu* długość formowania się odcinka rozbiegowego może przekraczać nawet wartość x/d równą 600. Wykorzystany w badaniach własnych odcinek rury o długości 3,6 m jest zbyt krótki dla określenia długości odcinka stabilizacji termicznej.

Na rys. 3 przedstawiono zależność lokalnych wartości parametru HTR_x w funkcji x/d dla roztworu HTAC o stężeniu 400 ppm i różnych liczb Re . Wartość parametru HTR_x początkowo rośnie, a powyżej $x/d = 60$ zaczyna się stabilizować na stałym poziomie i osiąga bardzo wysokie wartości. Przykładowo dla liczby Re 23422 osiąga wartość maksymalną 87%. Przedstawione wyniki wskazują, że średnia wartość współczynnika wnikania ciepła w wymienniku przy przepływie roztworów SPC, podobnie jak przy przepływie płynów newtonowskich w zakresie laminarnym, będzie zależała silnie od długości rury.

Cechą charakterystyczną roztworów środków powierzchniowo czynnych wykazujących zjawisko redukcji oporów przepływu jest gwałtowny jego zanik po przekroczeniu krytycznej wartości liczby Re , któremu jednocześnie towarzyszy wzrost współczynnika wnikania ciepła do poziomu jak dla czystego rozpuszczalnika [1]. Przykład takiego zachowania przedstawiono na rys. 4 i 5 dla roztworu SPC o stężeniu 0,01%. Przy wartości liczby Re równej 52164 współczynnik oporu przepływu osiąga wartość jak dla czystej wody. Jednocześnie z danych przedstawionych na rys. 5 wynika, że wartość parametru HTR w zależności od x/d mieści się w granicach od 6 do 12%. Jednak dla tego samego roztworu przy wartości liczby Re równej 19675 można zaobserwować obniżenie współczynnika wnikania ciepła do poziomu nawet 78%.

Drugim ciekawym przypadkiem są wyniki badań przedstawione na rys. 4 i 5 dla roztworu o stężeniu 0,04% i temperaturze przy wlocie do aparatu $T_{wl} = 333\text{K}$. W tym przypadku zjawisko redukcji oporów przepływu zaczyna się powyżej $Re = 11210$. Jak wynika z danych przedstawionych na rys. 5 dla $Re = 11210$ wartość parametru HTR osiąga poziom około 7%, a średnia wartość liczby Nu wynosi 61. Jednocześnie przy wzroście liczby Re do poziomu 43200 wartość parametru HTR wynosi ponad 85% przy x/d równym 130, a średnia liczba $Nusselta$ spada do poziomu 43. W omawianym przypadku proces wymiany ciepła będzie bardziej efektywny przy niższej prędkości przepływu płynu.

Wnioski

Przedstawione w pracy wyniki badań doświadczalnych wskazują na znaczne podobieństwo jakościowe rozkładów lokalnych wartości współczynnika wnikania ciepła wzdłuż rury do przepływu płynu newtonowskiego w zakresie laminarnym. Zaobserwowano także, że w przypadku analizowanych roztworów HTAC/NaSal nie ujawnia się wpływ konwekcji swobodnej na wartość współczynnika wnikania ciepła. Dodatkowo wykazano, że w szczególnych przypadkach obniżenie prędkości przepływu roztworu SPC może wpływać korzystnie na wzrost wartości współczynnika wnikania ciepła.

LITERATURA

[1] *K. Gasljevic, E.F. Matthys*: J. Heat Transfer **119**, 80 (1997).
 [2] *P. Li et al.*: J. Heat Transfer **123**, 779 (2001).
 [3] *P.L. Sears, L. Yang*: J. Heat Transfer **128**, 557 (2006).
 [4] *A.J. Ghajar, L.-M. Tam*: Exp. Thermal Fluid Sci. **10**, 287 (1995).
 [5] *K.H. Toha, A.J. Ghajara*: Int. J. Heat Mass Transfer **31**, 1261 (1988).
 [6] *K. Gasljevic, G. Aguilar, E.F. Matthys*: Int. J. Heat Mass Transfer **43**, 1261 (2000).
 [7] *E.F. Matthys*: J. Non-Newtonian Fluid Mechanics **38**, 313 (1991).