

Barbara DYBEK, Jerzy HAPANOWICZ, Stanisław WITCZAK

e-mail: b.dybek@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Metodologia badań nieizotermicznego przepływu ciekłych układów dyspersyjnych

Wprowadzenie

Opis przebiegu zjawisk ciepło-przepływowych na drodze teoretycznej jest niezwykle trudny, a w większości przypadków, przy obecnym stanie wiedzy, wprost niemożliwy. Trudności wynikają z braku ogólnej teorii burzliwości, a tym samym problemów w przyjęciu stosownych warunków granicznych. Pełne rozwiązanie adekwatnych równań ruchu i energii znane jest tylko dla wariantów najprostszycych, np. laminarnego przepływu płynu w rurze [1].

W opisie przepływu substancji dwufazowej pojawia się jeszcze dodatkowy problem, a mianowicie dobór odpowiedniej funkcji stanu, która uzupełnia układ równań różniczkowych i wyraża właściwości danej substancji. Układy dwufazowe są z definicji niejednorodne, a wskazywanie na ich właściwości zastępcze ma sens jedynie w skali makroskopowej. Dodatkowym problemem jest fakt, że przepływom dwufazowym towarzyszą tzw. struktury lub reżimy. Ich typ oraz rodzaj zależy od właściwości faz i warunków ich przepływu. Warto dodać, że przepływowi, w ścisłym rozumieniu tego reologicznego pojęcia, ulegać może tylko faza ciągła.

Podane wyżej problemy sprawiają, że do opisu zjawisk przepływowych korzysta się w praktyce z równań półempirycznych. Mają one zwykle postać modułową, ustalaną dla konkretnych zjawisk na bazie analizy równań całkowitych lub analizy wymiarowej. Dla wyznaczenia wartości stałej i wykładników tych równań, dysponować jednak należy wartościami samych modułów, a te ustalane są na bazie eksperymentów. Stąd też warunki ich przygotowania i prowadzenia oraz sposób i dokładność pomiaru wymaganych wielkości rzutują bezpośrednio na jakość uzyskanego opisu.

Nieizotermiczny przepływ układu dyspersyjnego ciecz – ciecz związany jest z wymianą ciepła pomiędzy ścianą rury i niejednorodną mieszaniną dwóch faz ciekłych, tworzących struktury przepływu i wykazujących różne właściwości. Trudności w realizacji badań nad przepływami tego typu rozpoczynają się już na etapie precyzyjnego wyznaczenia charakterystyk właściwości fizycznych i cieplnych obu faz. Problemem staje się również dobór strumieni cieczy dla uzyskania i utrzymania odpowiedniej struktury przepływu, a niekiedy również sam precyzyjny pomiar tych strumieni, konieczny dla poprawnego bilansowania energii. Zasadniczą trudność stanowi jednak eksperymentalne ustalenie strumienia wymienianego ciepła i rozkładu temperatur, zarówno na ścianie rury, jak i w płynącej nią mieszaninie cieczy. Jest to niezbędne dla określenia warunków ruchu ciepła przy których ustalany jest współczynnik wnikania α . Jego wartość wynika z natężenia strumienia ciepła q i różnicy temperatur pomiędzy ścianą rury i płynem ΔT_{w-f} , czyli $\alpha = q/\Delta T_{w-f}$.

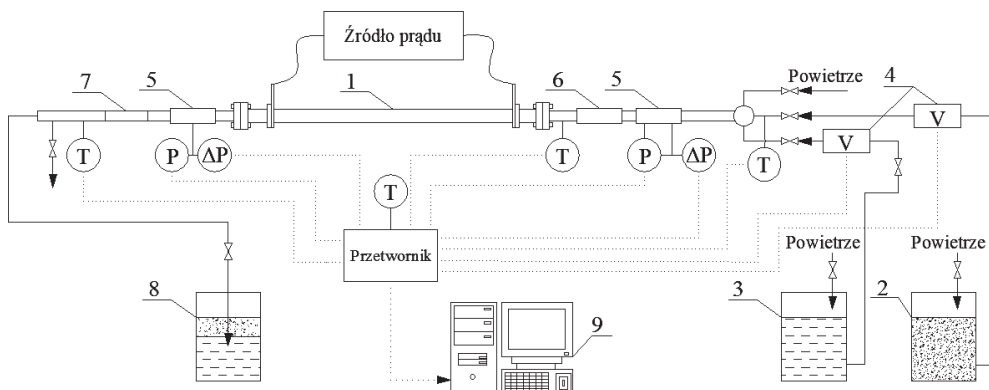
W warunkach konwekcyjnego przepływu płynu w rurze uzyskanie stałej wartości ΔT_{w-f} jest możliwe jedynie lokalnie i wymaga znacznego czasu stabilizacji temperaturowej instalacji. W praktyce łatwiej jest uzyskać stałą wartość q , odnoszoną do całej powierzchni wymiany ciepła, a zatem i do całej masy substancji zawartej w rurze. Problemem staje się jednak sam pomiar ilości ciepła przekazywanego od ściany rury do płynu lub odwrotnie.

W niniejszej pracy opisano budowę i możliwości pomiarowe instalacji badawczej służącej do eksperymentalnej oceny zjawisk towarzyszących nieizotermicznemu przepływowi układu dwufazowego ciecz-ciecz w poziomych rurach o różnej średnicy. Wskazano na przyjęte sposoby pomiaru określonych parametrów procesowych i interpretacji ich wyników oraz ilościową ocenę dokładności pomiaru.

Opis instalacji badawczej

Instalację, pokazaną na rys. 1, zbudowano w laboratorium *Katedry Inżynierii Procesowej Politechniki Opolskiej*. Jej głównym elementem jest poziomy kanał pomiarowy, wykonany z hydraulicznie gładkiej rury o długości $L = 1$ m, zaizolowany cieplnie od otoczenia i elektrycznie od pozostałych części instalacji. Kanał ten jest wymienny, co pozwala na zmianę średnicy rury w której badane są zjawiska ruchu ciepła. W wariantcie podstawowym jej średnica to $d = 10$ mm. Materiał rury to stal wysokostopowa o stosunkowo niskiej (jak na stal) konduktancji. Umożliwia to bezpośrednie wykorzystanie rury jako elementu grzejnego, zasilanego ze źródła prądowego o odpowiednio dużej wydajności. Taki sposób dostarczania ciepła, opisany również w pracy [3], pozwala uzyskać równomierne obciążenie cieplne ściany. Jej temperatura $T_{w.1..6}$ mierzona jest za pomocą sześciu termopar kontaktowych typu K, przyklejonych za pośrednictwem cienkich podkładek mikowych. Termopary umieszczone w jednolitych odstępach na zewnętrznej powierzchni kanału pomiarowego. Temperatura cieczy roboczych mierzona jest w kilku punktach, a mianowicie: temperatura samej wody T_w i samego oleju T_{ol} oraz temperatura układu dwufazowego $T_{f,wl}$ na wlocie i wylocie $T_{f,wyl}$ z sekcji pomiarowej. Pomiar tych temperatur realizowany jest cienkimi termoparami typu K, wprowadzonymi do wnętrza rur.

Jako ciecie robocze wykorzystywane są odgazowana woda wodociągowa oraz olej. Wprowadzane są one okresowo do buforowych zbiorników ciśnieniowych, a następnie wytłaczane z nich za pomocą sprężonego powietrza o nadciśnieniu 0,6 MPa. Taki sposób wymuszenia przepływu faz zapewnia stabilność ich strumieni oraz szeroki zakres ich regulacji, poprzez dławienie na precyzyjnych zaworach iglicowych. Pomiar strumieni objętościowych wody V_w i oleju V_{ol} realizowany jest za pomocą zestawu przepływomierzy elektronicznych, dostosowanych



Rys. 1. Stanowisko badawcze: 1 – kanał pomiarowy; 2, 3 – zbiorniki oleju i wody; 4 – przepływomierze; 5 – lepkościomierze przepływowe; 6 – wziernik; 7 – mieszalnik statyczny; 8 – separator; 9 – przetwornik A/C komputerem. Czujniki: P – ciśnienia bezwzględne, ΔP – ciśnienia różnicowego, T – temperatury

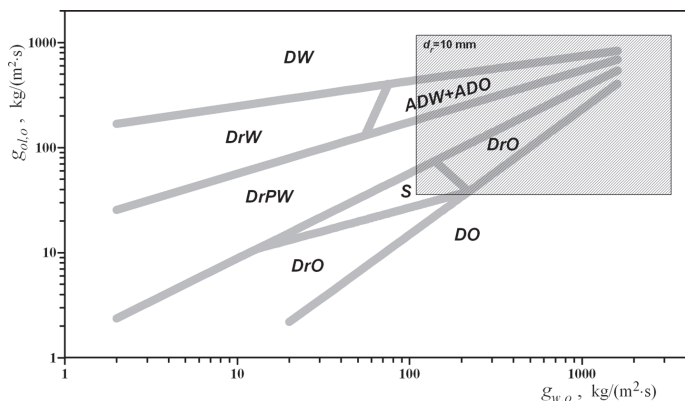
do właściwości faz, zwłaszcza wysokolepkiej fazy olejowej. Znajomość ich temperatury pozwala łatwo ustalić wartość strumienia masy wody G_w i oleju G_{ol} . W celu wyrównania temperatury składników układu dwufazowego ciecz – ciecz, podlega on intensywnemu mieszaniu w mieszalniku statycznym po przejściu przez sekcję pomiarową. Pomiar końcowej temperatury mieszanki odbywa się dopiero za mieszalnikiem. Bezpośrednio przed i za kanałem pomiarowym znajdują się reometry rurowe. Ich budowę i istotę działania opisano szczegółowo w pracy [4].

Wszystkie elektroniczne przetworniki sygnałów pomiarowych współpracują ze specjalnie oprogramowanym komputerem, co pozwala na ciągłą i jednoczesną kontrolę oraz akwizycję danych.

Poprawność działania instalacji została sprawdzona w trakcie badań testowych, prowadzonych z wykorzystaniem cieczy jednofazowych. W trakcie testów dokonano wzorcowania wszystkich czujników oraz statystycznej oceny dokładności pomiarów.

Możliwości badawcze i metodyka badań

Instalacja umożliwia badanie współczynnika wnikania ciepła w warunkach przepływu ciekłych mieszanin dwufazowych, którym towarzyszą struktury przepływu typu O/W, W/O i W+O. Rodzaj możliwych do uzyskania struktur w rurze o średnicy 10 mm, przy gęstości fazy olejowej $\rho_{ol} = 850 \text{ kg/m}^3$ oraz wodnej $\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$, pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Zakres badań na tle mapy struktur dla układu ciecz-ciecz wg [2]: D – dyspersja, Dr – kropki, DrP – korki, S – rozwarstwienie, AD – pierścienie i dyspersja; -W – wody, -O – oleju

Badania można prowadzić w zakresie natężenia strumienia ciepła do 30 kW/m^2 , przy czym jego wartość zależy głównie od wydajności źródła prądu. Wykorzystanie termopar, o budowie zapewniającej ich małą bezwładność cieplną oraz o szerokim i stabilnym zakresie pomiarowym, pozwala na precyzyjne ustalenie zarówno temperatur ściany kanału, jak też temperatury płynów. Pomiar temperatury znanych strumieni cieczy przed i za sekcją pomiarową pozwala sporządzić ich bilans cieplny, a tym samym ustalić strumień wymianianego ciepła, bez znajomości mocy elektrycznej wydzielającej się na rurze. Zakładając stałą pojemność cieplną wody $W_w = G_w c_w$ i oleju $W_{ol} = G_{ol} c_{ol}$, otrzymamy $q = (W_w + W_{ol})(T_{f,wyl} - T_{f,wl})/(\pi d L)$. Uzyskanie identycznej temperatury obu cieczy na wlocie do rury $T_{f,wl}$ nie jest trudne, gdyż są one pobierane ze zbiorników buforowych, a nie z sieci. Z kolei ich mierzona temperatura wylotowa $T_{f,wyl}$ ustalana jest po intensywnym wymieszaniu faz. Tak więc przyrost temperatury płynu na długości segmentu pomiarowego może być wyrażony wprost różnicą $\Delta T_f = T_{f,wyl} - T_{f,wl}$.

Wielopunktowy pomiar temperatury ściany umożliwia określenie jej rozkładu na długości kanału pomiarowego, a tym samym sprecyzowanie temperatur lokalnych. Poczynione założenie o stałości pojemności cieplnej cieczy pozwala przyjąć, że zmiana ich temperatury w segmencie pomiarowym zachodzi liniowo od $T_{f,wl}$ do $T_{f,wyl}$. Możliwe staje się zatem ustalenie średniej na długości różnicy temperatur pomiędzy ścianą i płynem $\Delta T_{w-f,śr}$. Sposób jej obliczania należy uzależnić od rozkładu zmierzonych temperatur ściany.

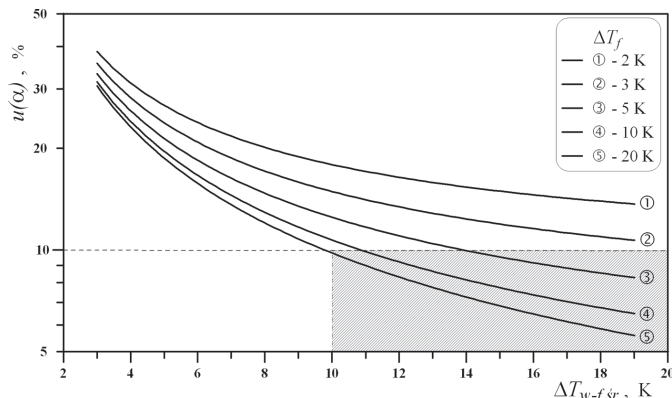
Interpretując wyniki uzyskanych w ten sposób wartości współczynnika wnikania ciepła $\alpha = q/\Delta T_{w-f,śr}$ należy jednak pamiętać, że ciepło

odbierane jest od ściany rury głównie przez fazę ciągłą, a dopiero potem przekazywane do fazy rozproszonej. Stąd też założenie o liniowej i identycznej zmianie temperatury obu faz może być niekiedy obarczone błędem. Transport ciepła wewnątrz płynu jest w dużej mierze uzależniony od lepkości płynu. Jej pomiar umożliwiają lepkościomierze przepływowe zamontowane na wlocie i wylocie z pomiarowej sekcji rury.

Ocena dokładności pomiarów

Na dokładność wyników pomiaru współczynnika wnikania ciepła, wg przedstawionej powyżej metody, wpływ ma wiele czynników. Są one związane z parametrami równania $\alpha = q/\Delta T_{w-f,śr}$, które uwzględnia różne wielkości będące przedmiotem pomiaru. Jednak analiza statystycznej oceny niepewności pomiaru $u(\alpha)$, wykonana metodą sumy wartości bezwzględnych różniczek cząstkowych, pozwala wykazać, że o całkowitym błędzie decydują głównie obie mierzone wartości ΔT . Im są one większe, tym niepewność pomiaru jest mniejsza.

Rys. 3. obrazuje wpływ mierzonych różnic temperatur na niepewność standardową pomiaru α , uzyskaną w trakcie badań testowych stanowiska. Wykres sporządzono przyjmując, że cząstkowe niepewności ustalania strumieni faz, ich właściwości oraz geometrii układu mają znikomy wpływ na niepewność obliczania α . Stosowne obliczenia wykazały, że sumarycznie niepewność ta jest mniejsza niż 2%. Istotna jest natomiast niepewność pomiarów ΔT_f , której średnia wartość okazała się być równa 0,18 oraz niepewność dla $\Delta T_{w-f,śr}$ równa 0,89. Jak wynika z wykresu, zadowalającą dokładność pomiaru współczynnika wnikania ciepła można było uzyskać wtedy, gdy mierzone różnice temperatur przekraczały 10 K.



Rys. 3. Niepewność pomiaru α w zależności od mierzonych wartości $\Delta T_{w-f,śr}$ i ΔT_f

Podsumowanie

Eksperymentalna ocena warunków wnikania ciepła przy przepływie ciekłego układu dyspersyjnego w rurze jest trudna i nie zawsze jednoznaczna. Jednak opisane wyżej stanowisko i przyjęta metodyka badań umożliwiają wyznaczenie wartości α z dokładnością zadowalającą dla potrzeb prowadzenia projektowych obliczeń inżynierskich.

LITERATURA

- [1] Z. Kębłowski i in.: Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej. WNT, Warszawa 1985.
- [2] J. Hapanowicz i in.: Inż. Chem. Proc. **22**, 579 (2001).
- [3] D. Kim: Heat Transf. Eng. **20**, 15 (1999).
- [4] J. Hapanowicz: Przepływ ciekłych układów dyspersyjnych. Studia i Monografie **204**, Politechnika Opolska, Opole 2007.

Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego nr 3611/B/T02/2008/34 finansowanego ze środków na naukę w latach 2008-2011.