

BARBARA DYBEK
JERZY HAPANOWICZ

Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Metoda ustalania typu układu ciecz – ciecz płynącego w rurze poziomej

Wprowadzenie

Ciekłe układy dwufazowe tworzone są przez dwie wzajemnie nierozpuszczalne ciecz. Niezależnie od ich rodzaju składnik hydrofobowy traktowany jest jako *olej*, natomiast hydrofilowy jako *woda*. Jednym z kryteriów podziału układów ciecz – ciecz jest ich typ, który wskazuje na rodzaj cieczy stanowiącej środowisko rozpraszające dla cieczy drugiej. Z tego względu wyróżnić należy układy O/W – w których środowisko to stanowi *woda* oraz W/O – w których środowiskiem rozpraszającym jest *olej*. Typ trwałych emulsji będących w przepływie jest zwykle stały. Z kolei typ ciekłych nietrwałych dyspersji może ulegać zmianom, gdyż wynika z rodzaju dwufazowej struktury przepływu, zależnej od warunków hydrodynamicznych panujących w rurze. Co więcej, nietrwały układ ciecz-ciecz może niekiedy wykazywać również typ W + O (obie fazy są ciągłe), nieosiągalny dla emulsji.

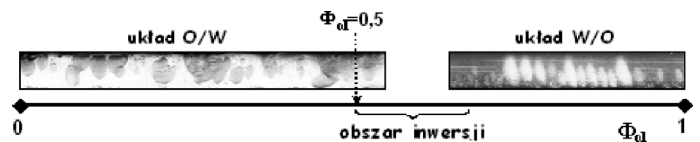
Poprawne ustalenie typu ciekłego układu dwufazowego jest zagadnieniem szczególnie istotnym, gdyż pozwala określić rodzaj cieczy stanowiącej w danych warunkach ośrodek rozpraszający dla form tworzonych przez ciecz drugą, a tym samym ustalić np. lepkość całego układu, stopień jego jednorodności, wartość dwufazowych oporów przepływu, czy też intensywność wymiany ciepła pomiędzy płynącą substancją a ścianą rury.

Zmiana typu układu ciecz – ciecz związana jest ze zjawiskiem inwersji faz. Stan inwersji wyrażany jest takim udziałem objętościowym składników w układzie, przy którym współistnieć mogą w nim zarówno krople wody jak i oleju. Określenie tego udziału w sposób ilościowy jest trudne i wymaga znajomości rozmiarów kropeł tworzących się w określonych warunkach mieszania obu cieczy. Tymczasem ich mieszanie wywołane współprądowym przepływem ma charakter spontaniczny, a zatem trudny do przewidzenia.

Liczba publikacji dotyczących zjawiska inwersji faz zachodzącej podczas przepływu ciekłego układu dwufazowego w rurze jest bardzo ograniczona. Zdecydowanie lepiej zjawisko to zostało dotychczas poznane i opisane w odniesieniu do emulsji wytwarzanych mieszadłem w zbiorniku. Tym samym proponowane w literaturze przedmiotu metody ustalania warunków inwersji odnoszą się głównie do trwałych układów emulsyjnych, np. prace [1–5]. Niestety metody te nie są skuteczne w odniesieniu do ciekłych dyspersji, czyli nietrwałych układów ciecz – ciecz.

Z pozoru wydaje się, że w przypadku ciekłych dyspersji inwersja powinna zachodzić przy identycznym udziale objętościowym tworzących je faz. Dla procesów przepływowych zachodzących w rurze udział jednej z cieczy (np. oleju Φ_{ol}) określany jest często jako stosunek wprowadzanych do rury strumieni objętościowych tej cieczy i całej mieszaniny. Jed-

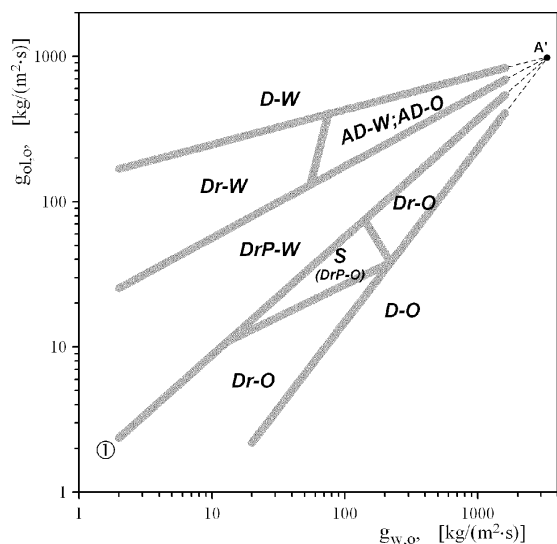
nak przepływowi nietrwałych ciekłych układów dwufazowych towarzyszą określone struktury (reżimy) przepływu. Ich charakter jest zależny od hydrodynamicznych warunków przepływu i to one właśnie sprawiają, że do zmiany typu układu ciecz – ciecz nie dochodzi przy $\Phi_{ol} = 0,5$, lecz w trudnym do ilościowego ujęcia zakresie powyżej tego udziału (Rys. 1).



Rys. 1. Obszar zmiany typu nietrwałych układów ciecz – ciecz płynących w rurze

Do ustalenia typu układu ciecz – ciecz płynącego w rurze poziomej wykorzystać można uogólnioną mapę struktur przepływu, pokazaną na rys. 2. Jej szczegółowy opis zawiera praca [6]. Analizując położenie linii granicznych na mapie łatwo zauważyć, że linia oznaczona symbolem ① rozdziela obszary odpowiadające strukturom odmiennego typu (W/O i O/W). W pracy [6] podano równania opisujące wskazane na mapie linie graniczne. Zatem równanie odpowiadające linii ① stanowić może warunek, przy którym następuje zmiana typu nietrwałego układu ciecz – ciecz będącego w przepływie.

W pracy [6] wskazano jednak, że przebieg linii granicznej ① (oraz pozostałych granic) ustalony został w sposób arbitralny, na drodze analizy map proponowanych przez różnych badaczy, a nie w wyniku eksperymentów dotyczących ściśle warunków inwersji faz.



Rys. 2. Uogólniona mapa struktur przepływu dwufazowego ciecz – ciecz, wg [6]

Badania własne

W celu lepszego poznania warunków zmiany typu nietrwałego układu ciecz-ciecz będącego w przepływie, podjęto własne prace badawcze. Prowadzono je w odniesieniu do układów tworzonych przez wodę i cztery rodzaje olejów, a szczegółowy opis tych badań zawiera praca [7]. Warunki przy których dochodziło do inwersji faz ustalano czterema metodami, tj.: wzrokową oceną typu dwufazowej struktury przepływu, analizując zmiany lepkości płynącego układu ciecz-ciecz, analizując zmiany jego oporów przepływu oraz prowadząc pomiar konduktancji układu woda – olej.

Zakres zmian warunków prowadzenia badań, stanowiący również zakres stosowalności przedstawionej poniżej metody ustalania typu układu ciecz – ciecz, zawiera tablica 1. W jej trzech ostatnich kolumnach podano relacje pomiędzy gęstością ρ , lepkością η i napięciem powierzchniowym σ_{ol-w} fazy olejowej względem wodnej. Warunki podane w tablicy 1 odpowiadają wielu układom występującym w praktyce przemysłowej.

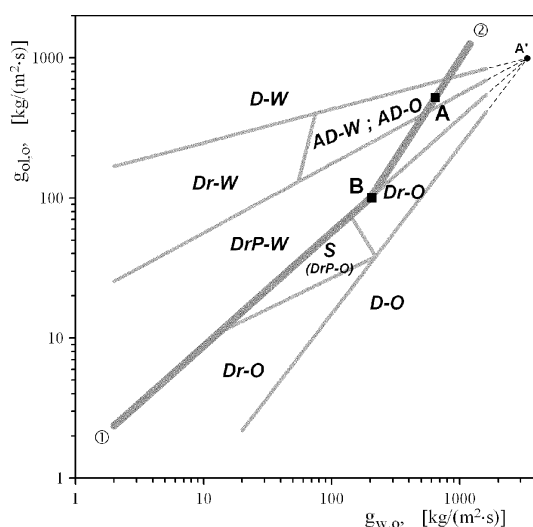
Tablica 1
Zakresy zmian warunków prowadzenia badań

$g_{w,o}$	$g_{ol,o}$	g_{c-c}	$\tilde{\rho} = \rho_{ol} / \rho_w$	$\tilde{\eta} = \eta_{ol} / \eta_w$	σ_{ol-w}
kg/(m ² s)	kg/(m ² s)	kg/(m ² s)	–	–	mN/m
60–3200	33–1650	93–4240	0,821–0,881	2,75–321	14,4–53,1

Wyniki badań

Wyniki szczegółowej analizy danych doświadczalnych pozwoliły ustalić, że linia graniczna ① na mapie z rys. 2 dobrze wyraża warunki inwersji faz jedynie w zakresie do wskazanego na rys. 3 punktu *B*, o współrzędnych $g_{w,o} = 200$ kg/(m²s) i $g_{ol,o} = 100$ kg/(m²s).

Warunki inwersji powyżej punktu *B* nie pokrywają się już z linią ①. Przebieg linii ② uzależniony jest od zmieniającego swoje położenie punktu *A*. Jego współrzędne są ściśle związane z warunkami hydrodynamicznymi panującymi w rurze i nie mają empirycznego charakteru, lecz wyrażają warunki trwałego rozproszenia faz w układzie ciecz-ciecz. Spo-



Rys. 3. Granice inwersji faz na tle mapy struktury przepływu dwufazowego ciecz – ciecz. Linia ② dla układu: $\tilde{\rho} = 0,833$; $\tilde{\eta} = 2,75$; $\sigma_{c-c} = 0,015$ N / m

sób ilościowego wyznaczenia tych współrzędnych szczegółowo opisano w pracy [7].

Współrzędne punktów *A* i *B*, ustalone dla układów ciecz-ciecz stosowanych w trakcie badań, wykorzystano do opracowania funkcji potęgowej

$$g_{ol,o} = C_i g_{w,o}^{C_{ii}} \quad (1)$$

Reprezentuje ona warunki inwersji faz powyżej punktu *B*; linia ② na rys. 3.

Poniżej tego punktu obowiązuje natomiast równanie linii granicznej ①, podane dla mapy przepływu w pracy [6]. Wartości stałej i wykładnika równania (1) uzależniono od stosunku lepkości fazy olejowej do wodnej, opracowując dwie oddzielne zależności:

$$C_i = 0,037 \tilde{\eta}^{0,398} \quad (2)$$

$$C_{ii} = 1,514 \tilde{\eta}^{-0,061} \quad (3)$$

Ostatecznie, jako kryterium inwersji faz zachodzącej w ciekłej mieszaninie dwufazowej płynącej w rurze poziomej, a tym samym jako metodę ustalania typu nietrwałego układu dyspersyjnego będącego w przepływie (W/O lub O/W), zaproponowano warunki podane w tablicy 2. Układy typu W+O odpowiadają jedynie strukturom dwufazowym S i AD, a zatem do ich identyfikacji wystarczy korzystać bezpośrednio z mapy struktur przepływu.

Tablica 2
Warunki określające typ układu ciecz – ciecz płynącego w rurze poziomej

Typ układu	Warunek	Uwagi
W/O	$g_{ol,o} > 1,3525 g_{w,o}^{0,812}$ AND $g_{ol,o} > C_i g_{w,o}^{C_{ii}}$	C_i wg (2)
OW/W	$g_{ol,o} < 1,3525 g_{w,o}^{0,812}$ OR $g_{ol,o} < C_i g_{w,o}^{C_{ii}}$	C_{ii} wg (3)
W + O	obszar struktur S i AD	wg mapy z rys. 1

Podsumowanie

Ustalenie typu nietrwałego układu ciecz-ciecz płynącego w rurze poziomej wymaga określenia warunków przy których w układzie tym następuje inwersja faz. Typ płynącego rurą układu związany jest z rodzajem dwufazowej struktury przepływu, a zatem w celu jego ustalenia nie można stosować metod słusznych dla typowych emulsji. Poza tym, ciekłe nietrwałe układy dwufazowe płynące w rurze wykazywać mogą również typ W + O, co nie ma miejsca w przypadku trwałych emulsji. Jednak ustalenie typu układu dwufazowego ciecz-ciecz na podstawie samych map struktur przepływu nie zawsze musi być skuteczne. Z powyższych względów dla ustalania tego typu zaleca się korzystać z warunków zaproponowanych w tablicy 2.

LITERATURA

1. N. Brauner, A. Ullmann: Int. J. Multiphase Flow, **28**, 1177 (2002).
2. G.C. Yeh, F.H. Haynie, R.A. Moses: AIChE Journal, **10**, 2, 260 (1964).
3. S. Arirachakaran et al.: SPE Paper 18836, SPE Prof. Prod. Operating Symp., Oklahoma (1989).
4. M. Nädler, D. Mewes: Int. J. Multiphase Flow, **23**, 1, 55, (1997).
5. M. Bonizzi, R.I. Issa: Int. J. Multiphase Flow, **29**, 1719, (2003).
6. J. Hapanowicz, L. Troniewski, R. Dyga: Inż. Chem. Proc., **22**, 579, (2001).
7. J. Hapanowicz: OW Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie, z. 204, Opole (2007).