

MAŁGORZATA PŁACZEK
STANISŁAW WITCZAK

Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Inwersja faz w przepływie wielofazowym

Wprowadzenie

Proces mieszania układów ciekłych w rurociągach transportowych, wywołany ich współprądowym przepływem, zachodzi w sposób spontaniczny a więc trudny do kontrolowania. W przepływach trójfazowych z udziałem dwóch cieczy wzajemnie nierozpuszczalnych, w zależności od ich koncentracji, jedna z faz odgrywa dominującą rolę i stanowi fazę ciągłą, w której inna ciecz jest unoszona w postaci zdyspergowanych kropelek. W specyficznych warunkach przepływu, kiedy wzrasta strumień cieczy zdyspergowanej aż do poziomu przekraczającego krytyczny udział objętościowy – tzw. punkt inwersji, następuje zmiana fazy dominującej w przepływie, tj. ciągła dotychczas faza zmienia się w fazę zdyspergowaną, natomiast faza rozproszona staje się fazą ciągłą. Powstaje wówczas układ o odmiennych właściwościach fizycznych. W pewnych przypadkach cechy te mogą być pożądane, np. przy produkcji margaryny, w innych z kolei niepożądane, np. wywołany inwersją nagły wzrost ilości wydzielanego ciepła w egzotermicznych reakcjach nitrowania grozi wybuchem. W celu uniknięcia emulsyfikacji układów ciecz – ciecz, tworzenia się wysokolepkich emulsji, ich przepływ w rurociągach powinien odbywać się w warunkach, w których możliwe jest jedynie wytworzenie ciekłych układów dyspersyjnych o małej trwałości. Istnieje więc konieczność dysponowania metodami pozwalającymi przewidywać przebieg charakterystycznych zjawisk towarzyszących tego rodzaju przepływom, co pozwala zapobiegać sytuacjom niebezpiecznym dla funkcjonowania instalacji procesowych.

Zjawisko inwersji faz w przepływie trójfazowym gaz – ciecz – ciecz obserwowali w badaniach m.in. Woods i in. [1], Shean [2], Descamps i in. [3] oraz Oddie i in. [4]. Woods i in. [1] wyznaczyli m.in. obszary występowania inwersji faz oraz zaproponowali zależności do obliczania granicy pomiędzy przepływem z dominującą fazą olejową i wodną. Według autorów pracy [1] w większości przypadków zjawisko to miało miejsce przy udziale oleju w cieczy bliskim $\epsilon_o^* = 0,75$, jednak opisują oni możliwość zmiany położenia inwersji faz ($\epsilon_o^* = 0,45$) w przypadku, gdy formuje się olejowa powłoka na powierzchni ścianki rury. Zbliżone wartości podają także Spedding i in. [5] oraz Shean [2], według których, w warunkach inwersji faz ciekłych, graniczny udział oleju w cieczy wynosi $\epsilon_o^* = 0,61 \pm 0,75$. Z kolei autorzy pracy [3] podjęli próbę określenia

wpływu sposobu wprowadzenia gazu do przepływającej mieszaniny dwufazowej typu ciecz – ciecz na przebieg zjawiska inwersji faz. W tym celu przeprowadzili porównawcze badania przepływu dwufazowego słona woda – olej i trójfazowego powietrze – woda – olej w kanale pionowym o średnicy wewnętrznej 82,8 mm. Wyniki tych badań wskazują, że niezależnie od prędkości mieszanki inwersja faz zachodzi przy koncentracji wody na poziomie 30% (a więc przy $\epsilon_o^* = 0,70$), oraz że wprowadzenie fazy gazowej do przepływu dwóch cieczy nie zmienia granicznej koncentracji oleju czy wody, przy której ma miejsce to zjawisko.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań własnych dotyczących inwersji faz w przepływie trójfazowej mieszaniny składającej się z gazu i dwóch cieczy niemieszających się i w oparciu o ich analizę, wskazanie zakresów występowania tego zjawiska w zależności od parametrów przepływowych mieszaniny.

Analiza wyników badań

W celu opisanego warunków występowania zjawiska inwersji faz ciekłych w pionowym przepływie trójfazowym przeprowadzono badania przepływu mieszaniny składającej się z powietrza, wody i oleju maszynowego o gęstości 865 kg/m^3 i lepkości $29,1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (w temperaturze 20°C). Badania realizowano w przezroczystych kanałach o średnicy 30 i 40 mm wykonanych ze szkła organicznego. Umożliwiło to wizualne obserwacje występujących w rurze zjawisk przepływowych. Parametry przepływowe poszczególnych składników mieszaniny trójfazowej zestawiono w tablicy 1. Badania przeprowadzono dla szerokiego zakresu zmian udziałów objętościowych cieczy, co gwarantowało występowanie zjawiska inwersji faz w przepływie mieszaniny wodno-olejowej.

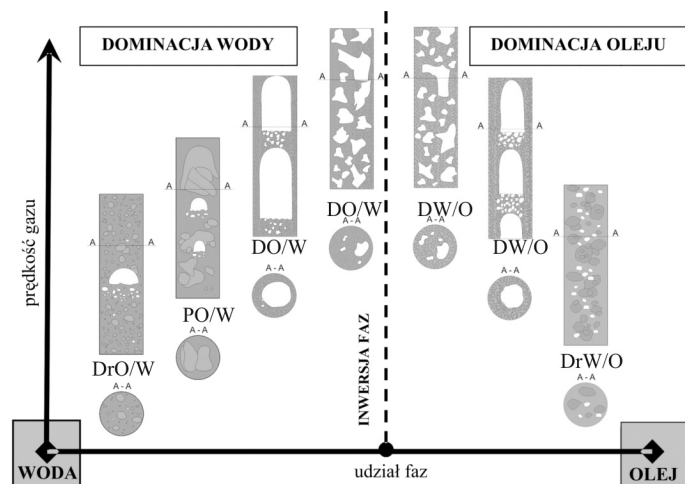
Warunki inwersji faz określano na podstawie oceny struktur przepływu, uzupełnionej o wyniki pomiarów spadku ciśnienia oraz udziałów objętościowych faz. Za kryterium występowania tego zjawiska przyjęto, że przy zmianie fazy dominującej w przepływie ma miejsce wyraźna zmiana rozkładu faz w kanale.

W badaniach własnych wyodrębniono dziewięć podstawowych struktur dla przepływu trójfazowego gaz – ciecz – ciecz: pięć z dominującą fazą wodną i cztery z dominującą fazą olejową. Identyfikacja tych struktur w odniesieniu do układu

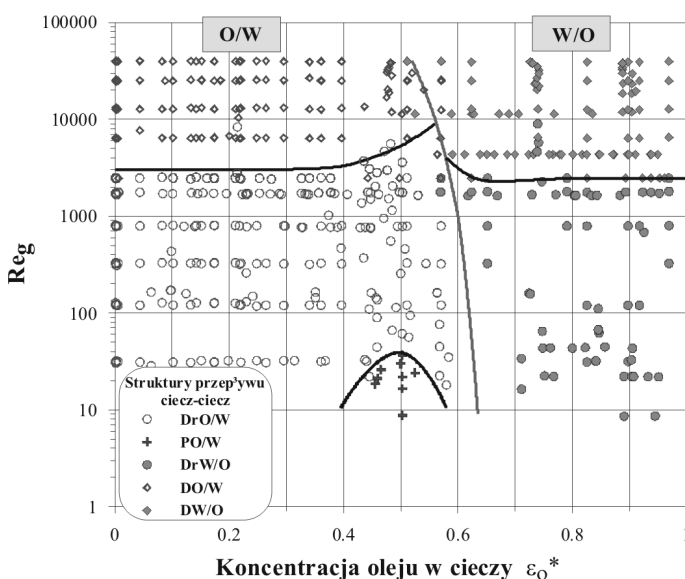
Tablica 1

Warunki prowadzenia badań

Czynnik	Prędkość pozorna $w_{i,o}$	Liczba Reynoldsa Re_i	Gęstość strumienia masy $g_{i,o}$	Udział obj. faz ϵ_i	Koncentracja faz ciekłych ϵ_o^*
	m/s	–	kg/(m ² s)	–	–
powietrze	0,01–16,40	31–53052	0,01–18,73	0,013–0,99	–
woda	0,02–1,07	404–28736	5,3–1047,7	0,001–0,98	0,083–0,999
olej LAN15	0,001–0,63	0,4–353	0,77–538,65	0,0001–0,92	0,001–0,917



Rys. 1. Inwersja faz ciekłych w układach trójfazowych



Rys. 2. Mapa przepływu ciekłych składników mieszaniny trójfazowej

ciecz – ciecz obejmuje takich struktur 7 (Rys. 1). W obszarze występowania wodnej fazy dominującej, olej może być rozproszony w wodzie w formie kropelek (DrO/W), korków (PO/W) bądź dyspersji (DO/W), natomiast w przepływie z dominacją fazy olejowej to woda zawieszona jest w oleju w postaci kropelek (DrW/O) lub dyspersji (DW/O). W tym drugim przypadku charakterystyczne dla przepływu gaz – ciecz – ciecz struktury są zawsze identyfikowane w mniejszej liczbie.

Stwierdzono istotny wpływ charakteru przepływu fazy gazowej na stopień zdyspergowania fazy rozproszonej unoszonej przez fazę ciągłą. W ujęciu ilościowo-jakościowym wpływ ten został uwzględniony na opracowanej mapie przepływu powietrze – woda – olej (Rys. 2). Mapa ta opisuje obszary występowania struktur z dominującą fazą wodną i olejową oraz określa charakter przepływu poszczególnych składników ciekłych w mieszaninie.

Liczba *Reynoldsa* dla fazy gazowej (Re_g) jest parametrem determinującym powstawanie poszczególnych struktur trójfazowych w układzie gaz – ciecz – ciecz natomiast wartość koncentracji oleju w fazie ciekłej (ϵ_o^*) jest wielkością charakteryzującą dwufazowy układ ciecz – ciecz i opisuje wzajemne

roz rozmieszczenie ciekłych składników strugi trójfazowej. Z ułożenia linii na tej mapie, oddzielających poszczególne struktury, wynika że występowanie określonych struktur zależy zarówno od stopnia burzliwości przepływu fazy gazowej, jak i wzajemnego udziału objętościowego wody i oleju w fazie ciekłej.

W zakresie laminarnego przepływu fazy gazowej w miarę wzrostu koncentracji oleju w cieczy obserwowano przepływ kropelek oleju w wodzie (DrO/W), które w miarę wzrostu zawartości oleju mogą przybierać formę przepływu korkowego (PO/W), jakkolwiek jedynie w wąskim zakresie. Dalszy wzrost koncentracji oleju w cieczy przyczynia się do łączenia się kropelek tej fazy w fazę ciągłą, w której z kolei woda może tworzyć krople o różnych rozmiarach. Jak wynika z rozkładu punktów na przedstawionej mapie przepływu (Rys. 2) granica pomiędzy przepływem z dominującą fazą wodną i z dominującą fazą olejową jest zależna od charakteru przepływu powietrza i w miarę wzrostu burzliwości przepływu fazy gazowej przemieszcza się w stronę mniejszych wartości koncentracji oleju w cieczy. Następuje przy tym rozdrobnienie fazy rozproszonej prowadzące do przepływów dyspersyjnych typu DO/W lub DW/O. Położenie linii rozdzielającej obszary dominujących faz (wodnej i olejowej) wskazuje, że przepływ z dominacją oleju może występować już przy koncentracji oleju w cieczy niewiele przekraczającej wartość 0,5, jednak tylko w warunkach przepływu ze stosunkowo dużą prędkością powietrza (powyżej 3 m/s). W przypadku przepływów z niewielkim udziałem gazu, burzliwość przepływu faz ciekłych jest niewystarczająca do zdyspergowania większych form fazy wodnej, stąd graniczna koncentracja fazy olejowej jest większa od 0,6.

Otrzymane w badaniach własnych wartości koncentracji fazy olejowej w cieczy, przy której występuje zjawisko inwersji faz są ogólnie spójne z otrzymanymi przez autorów innych prac z tego zakresu. Stwierdzone różnice w wartości ϵ_o^* , przy których to zjawisko występuje w przepływie trójfazowym gaz – ciecz – ciecz wynikać mogą z różnych właściwości fizykochemicznych wykorzystywanych w badaniach olejów, ale także z odmiennych zakresów zmian parametrów przepływowych, w szczególności fazy gazowej.

Wnioski

W pracy opisano zjawisko inwersji faz ciekłych, występujące w trakcie przepływu układu wielofazowego składającego się z dwóch cieczy wzajemnie nierozpuszczalnych i gazu. W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono mapę przepływu trójfazowego powietrze – woda – olej, na której zaznaczono obszary występowania struktur z dominującą fazą wodną i olejową. Ponadto w pracy określono graniczne koncentracje fazy olejowej, przy których ma miejsce inwersja faz w przepływie trójfazowym.

LITERATURA

1. G.S. Woods. *i in.*: Trans. IChemE, 76, Part A, 571 (1998).
2. A. Shean: Master Thesis, 1976.
3. M. Descamps *i in.*: Int. J. Multiphase Flow 32, 311 (2006).
4. G. Oddie *i in.*: Int. J. Multiphase Flow 29, 527 (2003).
5. P.L. Spedding *i in.*: Trans. IChemE 78, Part A, 404 (2000).