

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPIYWOYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPIYWOYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

76

WARSZAWA-POZNAŃ 1978
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR

WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ . ZENON ZAKRZEWSKI

ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN,

80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe

Warszawa 1978

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340+90 egz.	Oddano do składania 27 lutego 1978 r.
Ark. wyd. 12,25. Ark. druk. 9,375	Podpisano do druku 24 października 1978 r.
Papier druk. sat. kl. V, 70 g, 70×100 cm.	Druk ukończono w październiku 1978 r.
Nr zam. 319/98. J-14/662.	Cena zł 40,—

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

BORYS K. KOZMIENKO, WŁADIMIR E. NAKORIAKOW, ANATOLIJ P. BURDUKOW

Nowosybirsk

JANUSZ KOWALSKI, EDWARD ŚLIWICKI

Gdańsk

Profil prędkości fazy ciekłej w przepływie dwufazowym o strukturze pęcherzykowej*

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów profilu prędkości fazy ciekłej w przepływie dwufazowym. Stwierdzono, że dla liczb Reynoldsa odpowiadających przepływowi laminarnemu, profil prędkości w przepływie dwufazowym znacznie różni się od profilu charakterystycznego dla ruchu laminarnego cieczy. Jest on bliski profilowi turbulentnemu i zależy od zawartości fazy gazowej. W przypadku turbulentnych przepływów dwufazowych różnicy tej nie zaobserwowano. Okazało się też, że profil prędkości fazy ciekłej w turbulentnym przepływie dwufazowym nie zależy od zawartości fazy gazowej.

Spis oznaczeń

B – współczynnik wymiany masy,	w – prędkość,
c – stała,	$\beta = \dot{V}_g/(\dot{V}_g + \dot{V}_c)$ – jakość objętościowa przepływu dwufazowego,
c_∞ – koncentracja jonów $\text{Fe}(\text{CN})_6^{-3}$ w roztworze,	ν – lepkość dynamiczna,
d – średnica,	ρ – gęstość,
D – współczynnik dyfuzji molekularnej,	φ – stała Faraday'a.
F – powierzchnia	
I – natężenie prądu,	Indeksy dotyczą:
$\dot{m}$ – strumień masy,	c – prędkości fazy ciekłej,
r – promień kanału,	g – prędkości fazy gazowej,
R – promień czujnika,	max – prędkości maksymalnej,
$\dot{V}$ – natężenie przepływu,	„prim” – prędkości zredukowanej.
y – współrzędna wzdłuż promienia kanału,	

Wprowadzenie

Określenie prędkości faz w strumieniu dwufazowym gazowo-cieczowym jest istotne przy tworzeniu modeli i metod obliczeniowych dla takich przepływów.

Niniejsza praca nawiązuje do wyników pomiarów tarcia na ścianie kanału w prze-

* Praca wykonana w ramach problemu resortowego PAN-19, grupa tematyczna 3.

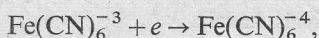
pływie dwufazowym o strukturze pęcherzykowej opublikowanych w [1]. Na podstawie wyników otrzymanych dla szerokiego zakresu liczb Reynoldsa wykazano, że pojęcie ruchu laminarnego w odniesieniu do mieszaniny dwufazowej traci sens, ponieważ już dla bardzo małych liczb Reynoldsa poziom pulsacji tarcia jest wysoki, a widmo pulsacji jest ciągle. Okazują się przy tym, że średnie tarcie, które jest o wiele większe od wartości obliczonej, nie jest jednoznacznie funkcją liczby Reynoldsa.

Wyniki pomiarów profili prędkości fazy ciekłej, przedstawione w pracy otrzymano stosując metodę elektrodyfuzyjną. Wykazano, że dla liczb Reynoldsa odpowiadających ruchowi turbulentnemu profil prędkości w mieszaninie dwufazowej jest bliski turbulentnemu w przepływie jednofazowym i nie zależy od zawartości fazy gazowej. Dla liczb Reynoldsa odpowiadających przepływowi laminarnemu profil prędkości strumienia dwufazowego znacznie różni się od profilu charakterystycznego dla laminarnego jednofazowego przepływu cieczy. Jest on bardziej wypełniony, bliski turbulentnemu i silnie zależy od zawartości fazy gazowej. Rezultat ten znajduje w pełni analogię w dyskutowanych już wynikach pomiarów tarcia opublikowanych w [1]. W większości prac prędkość fazy ciekłej w przepływie dwufazowym mierzono za pomocą termoanemometrów [4]. Przy małych rozmiarach pęcherzyków gazowych (< 1 mm), gdy ich wymiary są porównywalne z wymiarami czynnej części sondy, narusza ona strukturę strumienia. Innym źródłem błędów jest ochładzanie czujnika wywołane odparowaniem, przy przejściu pęcherzyków gazowych. Wyeliminowanie wszystkich możliwych błędów komplikuje metodę pomiarową.

Można uniknąć tych komplikacji stosując metodę elektrodyfuzyjną posiadającą szereg zalet, z których najważniejsza to małe rozmiary czujnika (może być mniejszy od $100 \mu\text{m}$).

Metoda elektrochemiczna pomiaru prędkości fazy ciekłej

Metoda oparta jest na pomiarze szybkości reakcji utleniająco-redukującej zachodzącej na powierzchni elektrod, katody (czujnik) i anody w przepływie elektrolitu. W badaniach wykorzystano wodny roztwór mieszaniny żelazocyjanku $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ i żelazocyjanku $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ potasowego w obecności wodorotlenku sodowego NaOH jako elektrolitu obojętnego, którego zadaniem jest wyeliminowanie transportu masy w polu elektrycznym. Elektrolit składa się z mieszaniny $(0,1 \div 1) \cdot 10^{-2}$ normalnego roztworu żelazo- i żelazocyjanku potasowego i 0,5 normalnego roztworu wodorotlenku sodowego. Na katodzie zachodzi reakcja



zaś na anodzie reakcja odwrotna, związana z wytworzeniem $\text{Fe}(\text{CN})_6^{-3}$. W pewnym zakresie różnicy potencjałów między elektrodami wielkość prądu w obwodzie nie zależy od napięcia, tzn. że dla określonego procesu katodowego istnieje taki potencjał, przy którym stężenie jonów przy katodzie praktycznie spada do zera (jest to tzw. prąd graniczny). W obszarze granicznego prądu dyfuzyjnego szybkość reakcji na katodzie określona jest intensywnością wymiany masy pomiędzy powierzchnią katody a strumieniem elektrolitu zawierającego jony i podporządkowana jest prawom hydrodynamiki i wymiany masy. Zjawisko wymiany masy dla przepływu wymuszonego można opisać (we-

dług [2]) zależnością:

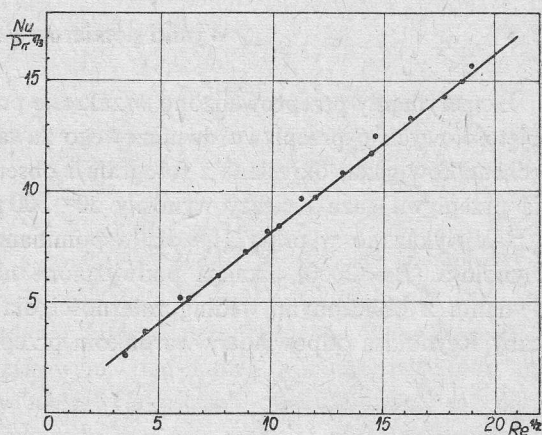
$$Nu = c Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

gdzie c – stała zależna od geometrii czujnika (w pracy [2] $c=0,753$), $Nu=(BR)/D$ – dyfuzyjna liczba Nusselta zwana też liczbą Sherwooda (Sh), $Pr=\nu/D$ – liczba Prandtla dla wymiany masy przez dyfuzję, nazywana również liczbą Schmidta (Sc), $Re=(w_c R)/\nu$ – liczba Reynoldsa*).

Współczynnik wymiany masy B określono zależnością

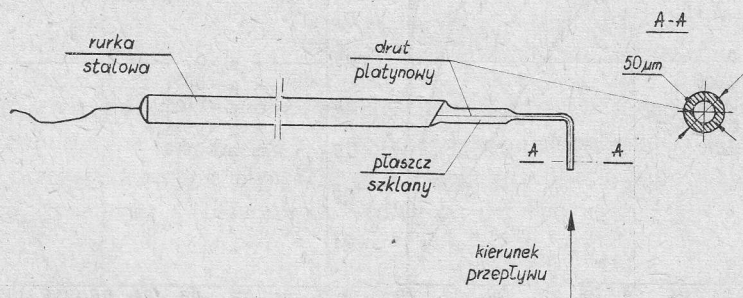
$$B = \frac{I}{c_{\infty} \varphi F}. \quad (2)$$

Stałą c w równaniu (1) wyznaczono poprzez cechowanie czujnika na specjalnym stanowisku w przepływie jednofazowym. Wyniki cechowania przedstawiono na rys. 1, z któ-



Rys. 1. Charakterystyka cechowania czujnika prędkości

rego określono stałą $c=0,8$. Na podstawie wielkości prądu dyfuzyjnego I oraz stężenia jonów c_{∞} można obliczyć współczynnik wymiany masy B , który po wstawieniu do (1) pozwala wyznaczyć prędkość cieczy. Ponieważ koncentracja i rozmiary pęcherzyków



Rys. 2. Schemat czujnika prędkości i jego usytuowanie w przepływie

*) W pobliżu powierzchni czołowej czujnika zjawiska transportu ciepła i masy mają charakter laminarny.

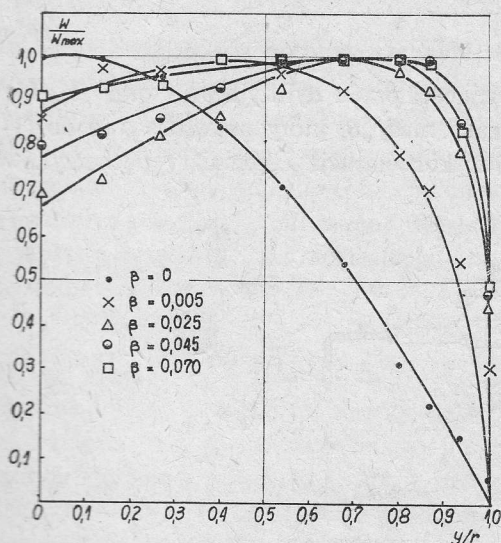
gazu są bardzo małe ($50 \div 500 \mu\text{m}$), zaś częstotliwość pulsacji prądu w czujniku (jak wykazały eksperymenty) jest dostatecznie niska, obliczenie prędkości można przeprowadzić uważając proces za quasi-stacjonarny. Wartość stosunku kwadratów pulsacji prądu do kwadratu składowej stałej nie przekracza 2%.

Czujnik-katodę wykonano z drutu platynowego o średnicy $50 \mu\text{m}$ wpawanego w płaszczyznę szklany, którego średnica zewnętrzna nie przekraczała $100 \mu\text{m}$. Powierzchnię czołową czujnika szlifowano w taki sposób, aby element platynowy znajdował się na równi z powierzchnią płaszczyzny szklanego. Szkic czujnika oraz jego usytuowanie w przepływie przedstawia rys. 2. Sygnał elektryczny od spolaryzowanego czujnika-katody podawany jest przez wzmacniacz na przyrząd rejestrujący (potencjometr samopiszący lub oscylograf pętlicowy). Pomiary przeprowadzono na stanowisku badawczym w Instytucie Fizyki Ciepła AN ZSRR w Nowosybirsku. Szczegółowy opis tego stanowiska przedstawiono w osobnych opracowaniach [1 i 3].

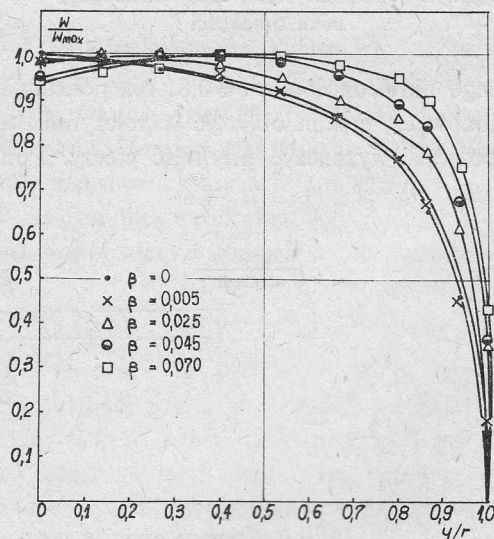
Wyniki pomiarów i ich dyskusja

Eksperymenty przeprowadzono w zakresie przepływu pęcherzykowego przy jakościach objętościowych β przepływu dwufazowego zawartych w granicach $0,01 \div 0,07$. Wymiary pęcherzyków gazu, określone z fotografii i obserwacji wizualnych, w zależności od stężenia przepływu gazu i cieczy wynosiły $50 \div 500 \mu\text{m}$.

Jak wykazano w pracy [1], dla wspomnianego zakresu β , w obszarze małych liczb Reynoldsa ($Re < 3000$), istnieją podwyższone naprężenia ścinające przy ścianie, w porównaniu z obliczonymi według zależności dla przepływu jednofazowego. Pomimo, że liczby Reynoldsa odpowiadały warunkom przepływu laminarnego poziom pulsacji tarcia

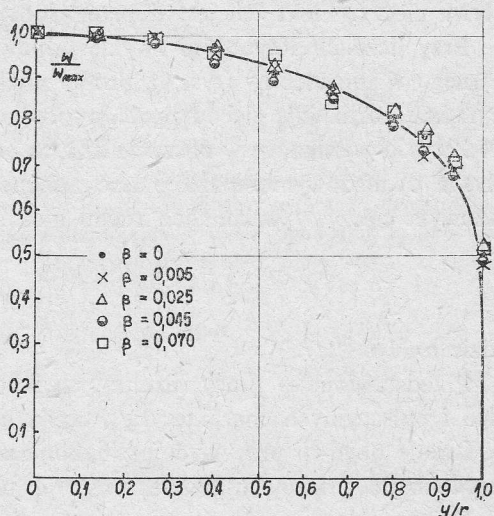


Rys. 3. Profile prędkości fazy ciekłej w przepływie dwufazowym przy $Re = 640$



Rys. 4. Profile prędkości fazy ciekłej w przepływie dwufazowym przy $Re = 3200$

w pomiarach był bardzo duży, przy czym stosunek średniego kwadratu pulsacji tarcia do średniego tarcia wzrastał wraz ze zmniejszeniem liczby Re . Ponadto, wielkość współczynnika oporu nie była jednoznaczna funkcją liczby Reynoldsa, a zależała najprawdopodobniej od średniego rozmiaru pęcherzyka w warstwie przyściennej [1]. Postawiono hipotezę, że przy małych liczbach Reynoldsa istotną rolę odgrywa poprzeczny transport pędu, wywołany chaotycznym ruchem pęcherzyków pod działaniem różnorodnego rodzaju sił hydrodynamicznych.



Rys. 5. Profile prędkości fazy ciekłej w przepływie dwufazowym przy $Re=13400$

Niniejsza praca jest kontynuacją badania takiego przepływu, umownie nazwanego mikroturbulentnym przepływem pęcherzykowym, pod kątem pomiaru prędkości fazy ciekłej w mieszaninie dwufazowej, przy małych jakościach objętościowych przepływu dwufazowego. Rozmiary pęcherzyków gazowych były tak małe, że nie były one nakładane przez czujnik elektrodyfuzyjny.

Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono wyniki pomiarów profilów prędkości fazy ciekłej dla ruchu laminarnego ($Re=640$), przejściowego ($Re=3200$) i turbulentnego dla jakości objętościowych przepływu dwufazowego: $\beta=0, 0,005, 0,025, 0,045$ i $0,07$. Liczbę Reynoldsa określono zależnością

$$Re = \frac{(w'_c + w'_g) d}{\nu}, \quad (3)$$

w której w'_c i w'_g są zredukowanymi prędkościami fazy ciekłej i gazowej. Przez pojęcie prędkość zredukowana faz rozumie się prędkość jaką miałaby każda z faz, gdyby wypełniała cały przekrój kanału i płynęła z natężeniem przepływu odpowiadającym swemu udziałowi w strumieniu dwufazowym. Według tej definicji:

$$w'_c = \frac{\dot{m}_c}{F \cdot \rho_c}, \quad (4)$$

$$w'_g = \frac{\dot{m}_g}{F \cdot \rho_g}. \quad (5)$$

Klasyfikacja przepływów na laminarny, przejściowy i turbulentny jest umowna, a granice poszczególnych obszarów przyjęto jak dla warunków przepływu jednofazowego.

W warunkach ruchu laminarnego odchylenia rezultatów eksperymentów dla przepływu dwufazowego od wyników otrzymanych przy przepływie jednofazowym cieczy są duże (rys. 3). Dla tego rodzaju przepływu profil prędkości przy jakości objętościowej $\beta=0,07$ posiada charakterystyczne odcinki z prędkością większą niż na osi przepływu. Przy pozostałych wartościach β profil prędkości jest bardziej wypełniony niż dla przepływu cieczy. Efekt ten jest dobrze widoczny nawet dla wartości $\beta=0,005$.

Przy liczbach Reynoldsa zwykle odpowiadających warunkom przejścia ruchu laminarnego w turbulentny (rys. 4), profile prędkości fazy ciekłej w przepływie dwufazowym wyraźnie odróżniają się od profili prędkości dla jednofazowego przepływu cieczy.

Z rys. 5 wynika, że w obszarze dużych liczb Reynoldsa profil prędkości cieczy w przepływie dwufazowym można opisać zależnościami stosowanymi przy przepływie jednofazowym cieczy w warunkach ruchu burzliwego

$$\frac{w}{w_{\max}} = \left(\frac{y}{r} \right)^n, \quad (6)$$

gdzie $n=1/6 \div 1/7$.

Przedstawione w pracy rezultaty są jakościowo zgodne z wynikami pomiarów średnich i pulsacyjnych charakterystyk tarcia na ścianie, które przedstawiono w pracy [1]. W świetle obydwu prac wydaje się konieczne przeprowadzenie dokładnego rozeznania mechanizmu przepływu dwufazowego o ustroju pęcherzykowym, w obszarze małych liczb Reynoldsa.

Praca wpłynęła do Redakcji w lutym 1976 r.

Literatura

- [1] A. P. Burdukow, N. W. Wałukina, W. E. Nakoriakow, *Osobiennosti tiechenija gazożidkostnoj puzyrkowej smiesi pri malych czislach Reynoldsa*. Żurnal P. M. T. F. nr 4, 1975.
- [2] J. Yamada, H. Matsuda, *Limiting Diffusion Currents in Hydrodynamic Voltametry*. J. Electroanal. Chem. 30, 1971, p. 261.
- [3] W. E. Nakoriakow, A. P. Burdukow, W. G. Pokusajew, W. A. Kuzmin, W. A. Utowicz, W. W. Christoforow, Ju. W. Tatewosjan, *Issledowanija turbulentnych tiechenij dwuchfaznych sried*. Nowosybirsk, Izd. In-ta tiepłofizyki SO AN SSSR, 1973.
- [4] J. P. Galaup, *Contribution a l'étude des méthodes de mesure en écoulement diphasique*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 1975.

Профиль скорости жидкой фазы в пузырькообразном двухфазном течении

Резюме

Представленные в работе результаты измерений скорости жидкой фазы в пузырькообразном жидкостно-газовом течении получены электродиффузионным методом. Из этих результатов следует, что для чисел Re отвечающих ламинарному течению профили скоростей для жидкой фазы в двухфазном течении сильно отличаются от профиля характерного для однофазного течения

жидкости. Эти профили более выполненные — более близкие профилю для турбулентного течения. Для турбулентных течений эта разница очень мала, т.е. профили скоростей жидкой фазы в двухфазном течении очень близки профилям скоростей в турбулентном однофазном течении жидкости.

Liquid Phase Velocity Profile for a Two-Phase Flow of Bubble Pattern

Summary

Measurements of the liquid phase velocity in a bubble flow of gas-liquid mixture have been carried out by an electro-diffusive method. The results show that for Reynolds numbers corresponding to laminar flow velocity profiles for the liquid phase in a two-phase flow differ significantly from the profile characteristic for a single-phase flow of liquid. The profiles are more rounded and closer to the turbulent flow profile. Similar is the situation for the range of Reynolds numbers regarded conventionally as belonging to the transient region. For turbulent flows the difference is very small, that is the liquid phase velocity profiles in a two-phase flow are very close to velocity profiles for a turbulent single-phase flow of liquid.