

Roman DYGA, Małgorzata PŁACZEK, Stanisław WITCZAK

e-mail: r.dyga@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Struktury przepływu gaz-ciecz w kanałach wypełnionych pianami aluminiowymi

Wstęp

Struktury przepływu (rozkład faz w objętości płynącej mieszaniny wielofazowej) należą do podstawowych zagadnień hydrodynamiki przepływów wielofazowych. W istotny sposób wpływają one na wymianę ciepła i masy w aparatach przepływowych. Często aparaty te wyposażone są w wypełnienie porowate lub strukturalne. Rolę wypełnienia mogą pełnić piany metalowe czyli wysokoporowate materiały komórkowe, w których metal przyjmuje postać cienkich powiązanych ze sobą włókien, tworzących szkielet komórkowy. Duże, puste komórki pian metalowych umożliwiają stosunkowo swobodny przepływ płynów przez te materiały.

Prace nad wykorzystaniem pian metalowych w aparatach, w których realizowane są przepływy wielofazowe prowadzone są dopiero od kilku lat i dotyczą głównie przepływów typu gaz-ciecz. Piany wykorzystywane są m.in. w parownikach urządzeń chłodniczych [Ji i Xu, 2012; Hu i in., 2014] i kolektorów słonecznych [Wang i in., 2013], jak również w aparatach kolumnowych [Pangarkar i in., 2010; Stemmet i in., 2007]. Jednak dotychczas brak jest w literaturze jakichkolwiek informacji na temat struktur przepływu kształtujących się podczas przepływu przez przestrzenie wypełnione pianami metalowymi. Z tego względu podjęto własne prace, których celem było poznanie struktur przepływu występujących przy przepływie gaz-ciecz przez poziome kanały wypełnione pianami metalowymi oraz określenie wpływu parametrów geometrycznych pian i warunków hydrodynamicznych przepływu na rodzaj struktur przepływu.

Badania doświadczalne

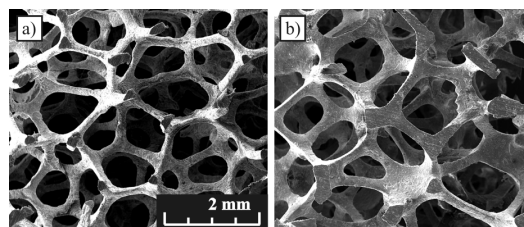
Materiały. Badania struktur przepływu prowadzono podczas przepływów powietrze-woda i powietrze-olej Velol-9Q przez kanały wypełnione trzema rodzajami pian aluminiowych. Wykorzystano piany o gęstości upakowania porów 20, 30 oraz 40 PPI (*Por Per Inch*). Piany różniły się porowatością ε i wielkością komórek d_c (Tab. 1). Piany 30 i 40 PPI mimo różnej gęstości upakowania porów (parametr podawany przez producenta pian) miały zbliżoną wielkość komórek, przy czym piana 40 PPI cechowała się odmienną budową geometryczną, głównie z uwagi na obecność dużych węzłów u zbiegu włókien szkieletu komórkowego (Rys. 1).

Aparatura. Stanowisko doświadczalne oraz aparaturę pomiarową szerzej opisano w pracy [Dyga i Troniewski, 2015]. Dla każdej z pian przygotowano niezależny poziomy kanał o średnicy 0,02 m i długości 2,61 m. Część kanału wykonana była z bezbarwnego pleksiglasu, co umożliwiała obserwację struktur przepływu.

Metodyka. Identyfikację struktur prowadzono jedynie wizualnie. Obecność piany w kanale istotnie zmniejszała widoczność, z tego względu próby udokumentowania obrazów struktur technikami fotograficznymi i filmowymi nie przyniosły zadowalających rezultatów. Rejestrowano wartość strumieni objętościowych faz oraz ciśnienie mieszaniny dwufazowej w kanale. Badania prowadzono w stosunkowo szerokim zakresie zmian prędkości pozornych płynów w_f (liczonych w odniesieniu do przekroju pustego kanału, z pominięciem obecności piany i drugiego płynu) oraz wlotowych

Tab. 1. Charakterystyka pian

	piana (stop)		
	20 PPI (AlSi7Mg)	30 PPI (AlSi7Mg)	40 PPI (Al 6101)
ε , %	93,4	94,3	92,9
d_c , m	$3,452 \cdot 10^{-3}$	$2,255 \cdot 10^{-3}$	$2,386 \cdot 10^{-3}$



Rys. 1. Szkielet komórkowy: a) piana 30 PPI, b) piana 40 PPI.

udziałów objętościowych faz ξ_f (stosunek zmierzonego strumienia fazy f do sumy strumieni powietrza i cieczy). Warunki prowadzenia badań przedstawiono w tab. 2.

Tab. 2. Zakres badań doświadczalnych

Płyn f	$w_{f,0}$, [m/s]	ξ_f , [-]
powietrze	$0,028 \div 2,39$	$0,313 \div 0,998$
woda	$0,006 \div 0,061$	$0,002 \div 0,988$
olej	$0,006 \div 0,061$	$0,002 \div 0,988$

Właściwości oleju Velol-9Q w temperaturze 20°C :
gęstość $\rho_{ol} = 859,8 \text{ kg/m}^3$; lepkość $\eta_{ol} = 8,78 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

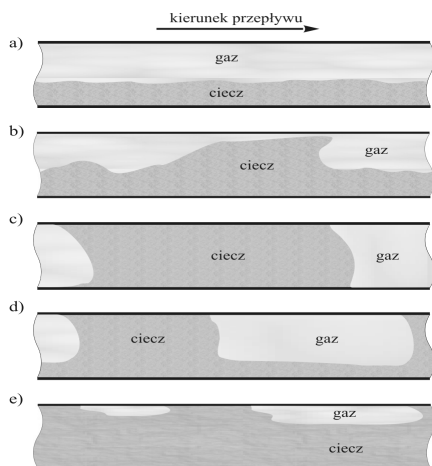
Wyniki i dyskusja

W trakcie badań obserwowano występowanie kilku rodzajów struktur przepływu gaz-ciecz. Na uwagę zasługuje fakt, że obecność piany w kanale nie przyczyniała się do rozpraszania faz, a kształtujące się w przestrzeni komórkowej struktury przepływu odpowiadały strukturom występującym przy przepływie mieszanin dwufazowych w kanałach niewypełnionych. Wyodrębniono cztery podstawowe struktury przepływu: rozwarstwową, korkową, rzutową i tłokową (Rys. 2). Obserwowano również formy przejściowe podstawowych rodzajów przepływu, np. przepływ rozwarstwiono-rzutowy lub korkowo-tłokowy.

Rodzaj kształtujących się w przestrzeni komórkowej struktur przepływu zdeteminowany był przez wzajemne relacje strumieni płynów i ich właściwości. Nie stwierdzono natomiast wpływu rodzaju piany na struktury przepływu gaz-ciecz. W analogicznych warunkach przepływu, tzn. przy tych samych prędkościach i udziałach faz, dla wszystkich pian obserwowano jednakowe struktury przepływu (dla określonej mieszaniny gazu i cieczy).

W przepływie rozwarstwowym obie fazy płynęły w postaci ciągłych warstw, o grubości zależnej od strumieni objętościowych płynów wprowadzanych do kanału. W zależności od prędkości faz, powierzchnia międzyfazowa była w różnym stopniu sfalowana. W skrajnych przypadkach tworzące się spiętrzenia cieczy zamykały cały przekrój kanału, tworząc strukturę rzutową. Przepływ tego rodzaju obserwowano, gdy prędkość pozorna cieczy przekraczała 0,03 m/s, a powietrze płynęło ze stosunkowo dużą prędkością, większą niż 1 m/s.

W podobnych warunkach występował przepływ tłokowy, podczas którego cyklicznie w odstępach kilkusekundowych w kanale pojawiały się duże porcje cieczy płynącej ze znaczną prędkością pełnym przekrojem kanału. Przepływy rzutowy oraz tłokowy występowały szczególnie często przy przetłaczaniu mieszaniny powietrze-olej ze stosunkowo dużym strumieniem oleju. Wtedy w ogóle nie obserwowano przepływu rozwarstwowanego, dominującego w mieszaninie powietrze-woda.



Rys. 2. Struktury przepływu gaz-ciecz przy przepływie przez piany aluminiowe: a) rozwarstwiona, b) rzutowa, c) tłokowa, d) i e) korkowa

Przepływ rozwarstwiony rejestrowano w badaniach z udziałem oleju, kiedy do kanału wprowadzano niewielką ilość tej cieczy. W przypadku dwóch serii pomiarowych, z największą ilością cieczy (zarówno wody, jak i oleju) obserwowano występowanie przepływu korkowego przedstawionego na rys. 2d i 2e. Przy stosunkowo dużej ilości cieczy i bardzo małym strumieniu powietrza gaz płynął górną częścią kanału w postaci wydłużonych pęcherzy, tzw. korków. Rozmiary korków zwiększały się wraz ze wzrostem strumienia powietrza. Przepływ korkowy obserwowano gdy prędkość pozorną powietrza nie przekraczała 0,2 m/s a stosunek prędkości cieczy i gazu wynosił co najmniej 0,5.

Oporając się jedynie na wartości strumieni (prędkości) faz czy też ich udziałów w mieszaninie nie można jednoznacznie wskazać rodzaju struktur kształtujących się w danych warunkach przepływu. Rodzaj struktury zdeterminowany jest bowiem przez wiele czynników, w tym przez właściwości fizyczne płynów.

W poszukiwaniu sposobu sprecyzowania warunków występowania poszczególnych struktur przepływu gaz-ciecz w kanałach wypełnionych pianami metalowymi, sprawdzono możliwość wykorzystania w tym celu map przepływu opracowanych dla kanałów pustych. Przeanalizowano cztery mapy polecane w literaturze jako uniwersalne i zbudowane w oparciu o wyraźnie różne układy współrzędnych. Żadna z tych map nie zapewniła pełnej zgodności, co do warunków występowania struktur przepływu w kanałach wypełnianych pianami.

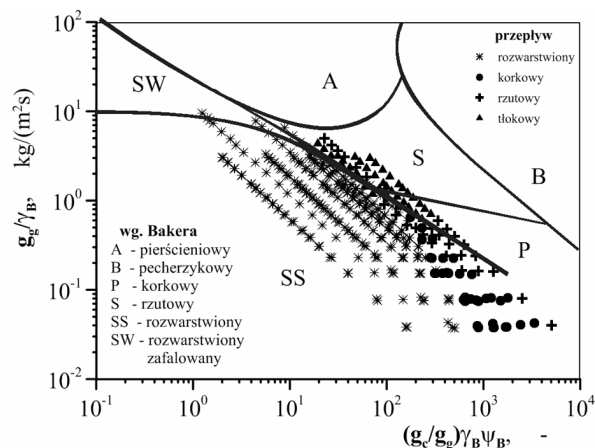
Najlepsze wyniki uzyskano w układzie odniesienia zaproponowanym przez Bakera $g_g/\gamma_B = f(g_c/g_g, \gamma_B \Psi_B)$ [1954]. W układzie tym g_c i g_g oznaczają odpowiednio gęstość strumienia masy cieczy i gazu, natomiast bezwymiarowe parametry γ_B i Ψ_B , ujmujące relacje właściwości fizycznych gazu i cieczy do powietrza i wody opisują równania:

$$\gamma_B = \left(\left(\frac{\rho_g}{\rho_p} \right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) \right)^{0,5}, \quad (1)$$

$$\Psi_B = \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_c} \right) \left(\frac{\eta_c}{\eta_w} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_c} \right)^2 \right)^{1/3}, \quad (2)$$

gdzie: ρ , η , σ oznaczają odpowiednio gęstość [kg/m³], lepkość [Pa·s] i napięcie powierzchniowe [N/m], a indeksy odnoszą się do: c – cieczy, g – gazu, p – powietrza, w – wody.

Na rys. 3 punkty określające rodzaj struktury i warunki przepływu, w jakich dane struktury były obserwowane, tworzą zwarte obszary, które wprawdzie nie pokrywają się w pełni z odpowiadającymi im obszarami na oryginalnej mapie Bakera [1954], jednak odstępstwa nie są duże. Uogólniając można powiedzieć, że w przypadku przetłaczania mieszaniny dwufazowej przez piany, zmiana przepływu rozwarstwowanego w inne formy przepływu następuje przy



Rys. 3. Występowanie struktur przepływu gaz-ciecz w kanałach wypełnionych pianami metalowymi na tle mapy Bakera

mniej niż stosunku strumieni cieczy i gazu niż wynika to z położenia linii granicznych na mapie Bakera (zwłaszcza w warunkach zmiany przepływu rozwarstwowanego w korkowy). Prawdopodobnie to wynika z większego poślizgu międzyfazowego przy przepływie przez kanały wypełnione pianami. Jak wykazano w pracy [Płaczek i in., 2013], udział cieczy w mieszaninie przetłaczanej przez piany jest większy niż w przypadku analogicznego przepływu przez kanały puste.

Wnioski

Biorąc pod uwagę struktury przepływu istnieje wyraźne podobieństwo przepływu gaz-ciecz przez kanały wypełnione pianami metalowymi do przepływu przez kanały puste.

W kanałach wypełnionych pianami kształtują się struktury przepływu typowe dla kanałów pustych. W badaniach własnych obserwowano struktury: korkową, rzutową, tłokową i rozwarstwowaną. Rodzaj struktury przepływu zdeterminowany jest jedynie przez warunki przepływu (prędkości, właściwości i udziały objętościowe faz), nie odnotowano wpływu parametrów geometrycznych pian.

Warunki występowania poszczególnych struktur przepływu gaz-ciecz przez piany metalowe mogą być określone za pomocą niektórych map przepływu gaz-ciecz obowiązujących dla kanałów pustych, jednak wymaga to modyfikacji linii granicznych na mapach.

LITERATURA

- Baker O., 1954. Simultaneous flow of oil and gas. *Oils Gas J.*, **53**, 185-195
- Dyga R., Troniewski L., 2015. Convective heat transfer for fluids passing through aluminum foams. *Arch. Thermodyn.*, **36**, 1, 139-156. DOI: 10.1515/aoter-2015-0010
- Hu H., Zhu Y., Peng H., Ding G., Sun S., 2014. Effect of tube diameter on pressure drop characteristics of refrigerant-oil mixture flow boiling inside metal-foam filled tubes. *Appl. Thermal Eng.*, **62**, 433-443. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.09.051
- Ji X., Xu J., 2012. Experimental study on the two-phase pressure drop in copper foams. *Heat Mass Transfer*, **48**, 153-164. DOI: 10.1007/s00231-011-0860-2
- Pangarkar K., Schildhauer T.J., J.R. van Ommen, Nijenhuis J., Moulijn J.A., Kapteijn F., 2010. Heat transport in structured packings with co-current downflow of gas and liquid. *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 420-426. DOI: 10.1016/j.ces.2009.08.018
- Płaczek M., Dyga R., Witczak S., 2012. Experimental investigation of void fraction in gas-liquid flow through FeCrAlY foam. *Procedia Eng.*, **42**, 755-768. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.462
- Stemmet C.P., Meeuwse M., J. van der Schaaf, Kuster B.F.M., Schouten J.C., 2007. Gas-liquid mass transfer and axial dispersion in solid foam packings *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 5444-5450. DOI: 10.1016/j.ces.2007.02.016
- Wang P., Liu D.Y., Xu C., 2013. Numerical study of heat transfer enhancement in the receiver tube of direct steam generation with parabolic trough by inserting metal foams. *Applied Energy*, **102**, 449-460. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.07.026