

Paweł WACŁAWCZYK¹, Jerzy HAPANOWICZ², Roman ULBRICH¹

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

¹ Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole² Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Badania oporów przepływu jedno- i dwufazowego w minikanalach

Wstęp

Intensyfikacja przebiegu procesów wymusza miniaturyzację aparatów, np. takich jak wymienniki ciepła. W samochodach, samolotach oraz pojazdach kosmicznych dzięki wykorzystaniu kanałów o średnicy kilku milimetrów możliwe jest zbudowanie aparatu o objętości 1 dm³ i mocy cieplnej rzędu od kilku do kilkunastu kW [Ali, 2011; Dutkowski, 2011].

Tendencja w budowie kompaktowych mikrowymienników i mikroreaktorów obserwowana jest także w przemyśle chemicznym. Stąd też istnieje potrzeba głębszego poznania i opisanie zjawisk towarzyszących przepływowi różnych substancji w kanałach o średnicy znacznie poniżej 10 mm, a nawet 1 mm. Dotychczas w badaniach przepływu mieszaniny dwufazowej ciecz-gaz dominowały prace dotyczące kanałów o średnicy 20 mm, a zatem głównie dla tych przypadków istnieją stosunkowo pewne metody obliczania zachodzących w nich procesów.

Obecnie istotny stał się podział kanałów na konwencjonalne oraz mini- i mikrokanaly. Uogólniając różne klasyfikacje można przyjąć, że dolną granicą średnicy hydraulicznej kanału konwencjonalnego jest 6 mm, zaś górną mikrokanalu 1÷2 mm. Przy małym wymiarze poprzecznym kanału bardzo ważny staje się stan powierzchni jego ściany. Stosunkowo duża wartość chropowatości względnej tej ściany sprawia, że często przepływ substancji nie zachodzi w kanale hydraulicznie gładkim.

Badania doświadczalne

Stanowisko badawcze

Badania dotyczyły oporów przepływu mieszaniny woda-powietrze w poziomych minikanalach o średnicy hydraulicznej d od 2 do 6 mm. Przekrój kanałów był kwadratowy, a wykonano je metodą frezowania szczeliny w sklejonnych później płytach plexiglasu. Pomiaru chropowatości powierzchni kanałów profilometrem wykazały, że średnia wysokość nierówności odpowiada wartości $\delta = 5 \mu\text{m}$. W temperaturze bliskiej 20 °C wykonano ogółem 127 pomiarów dla jednofazowego przepływu wody oraz powietrza, a także 339 pomiarów dla dwufazowego przepływu mieszaniny woda-powietrze.

Opory przepływu jednofazowego

Wyniki badań jednofazowych porównano z wartościami obliczanymi zgodnie z klasycznym równaniem Darcy-Weissbacha. W zakresie przepływu laminarnego wartość współczynnika oporu przepływu λ określa zależność od liczby Reynoldsa Re znana funkcja

$$\lambda = \frac{a}{Re} \quad (1)$$

Jednak wartość $a = 64$ słuszną dla przepływu w rurze zmieniono na $a = 57$, która obowiązuje dla kanału o przekroju kwadratowym.

Dla zakresu przepływu turbulentnego początkowo próbowano wykonać powszechnie znaną zależność Blasiusa

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (2)$$

Stwierdzono jednak, że jej stosowanie w opisie zmierzonych oporów przepływu płynów jednofazowych powoduje duże błędy. Powstałe rozbieżności należało tłumaczyć chropowatością ścian kanałów, gdyż zależność (2) obowiązuje dla kanałów hydraulicznie gładkich.

W celu uwzględnienia wpływu relacji δ/d na opory przepływu wykorzystano zależność Haaland [Drobnik, 2008]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8 \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\delta/d}{3,7} \right)^{1,11} \right] \quad (3)$$

W odróżnieniu od innych proponowanych w literaturze zależności nie jest ona uwikłana względem λ , a zatem jest łatwa w stosowaniu.

Jako parametr rozdzielający zakres jednofazowego przepływu laminarnego od turbulentnego przyjęto, zaproponowaną jeszcze w XIX wieku przez Reynoldsa, wartość $Re_{gr} = 2100$.

Opory przepływu dwufazowego

Przy pomiarach oporów przepływu mieszaniny ciecz-gaz strumienie obu faz dobrano w taki sposób, ażeby możliwe było wytworzenie wszystkich typowych dla kanału poziomego struktur przepływu dwufazowego. Do opisu uzyskanych wyników wykorzystano jedną z klasycznych metod [Lockhart i Martinelli, 1949], według której opory przepływu dwufazowego ΔP_{2F} obliczane są jako iloczyn oporów wywołanych przez samodzielnie płynące w kanale gaz $\Delta P_{G,o}$ lub ciecz $\Delta P_{L,o}$ i odpowiedniej poprawki: dla gazu Φ_G , a cieczy Φ_L . Opory przepływu samego gazu lub cieczy obliczane są według równania Darcy-Weissbacha, jednak przy wykorzystaniu prędkości pozornych tych faz. Zatem

$$\Delta P_{2F} = \Delta P_{L,o} \Phi_L^2 = \Delta P_{G,o} \Phi_G^2 \quad (4)$$

Wartość poprawki dla cieczy obliczana jest z zależności

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X_{LM}} + \frac{1}{X_{LM}^2} \quad (5)$$

a parametr Lockharta-Martinelliego X_{LM} opisany jest wyrażeniem

$$X_{LM} = \sqrt{\Delta P_{L,o} / \Delta P_{G,o}} \quad (6)$$

Stała C w równ. (5) przyjmowana jest zgodnie z tabl. 1.

Tabl. 1. Wartości stałej C w zależności (5)

Ciecz	Gaz	C
$Re_{L,o} < Re_{gr}$	$Re_{G,o} < Re_{gr}$	5
$Re_{L,o} > Re_{gr}$	$Re_{G,o} < Re_{gr}$	10
$Re_{L,o} < Re_{gr}$	$Re_{G,o} > Re_{gr}$	12
$Re_{L,o} > Re_{gr}$	$Re_{G,o} > Re_{gr}$	20

Liczby Reynoldsa dla cieczy $Re_{L,o}$ i gazu $Re_{G,o}$ wyznaczać należy na podstawie ich prędkości pozornych (umownych), a zatem nie w pełni oddają one rzeczywisty charakter przepływu faz. Stąd też sprawą otwartą pozostaje wybór odpowiedniej wartości Re_{gr} , przy której rzeczywiście zanika laminarny charakter przepływu cieczy lub gazu w mieszaninie dwufazowej.

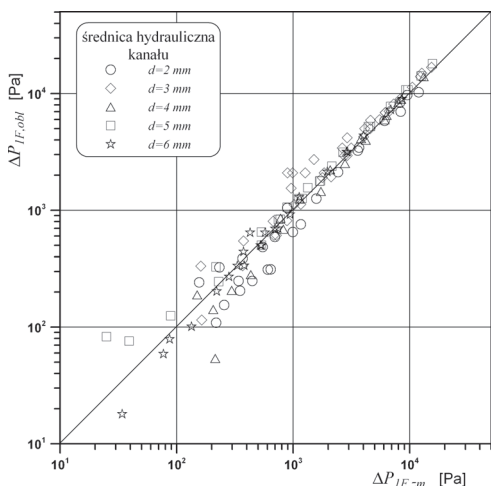
Wyniki badań i ich analiza

Przepływ jednofazowy

Zgodność między wszystkimi zmierzonymi $\Delta P_{1F,zm}$ i obliczonymi $\Delta P_{1F,obl}$ jednofazowymi oporami przepływu dla wszystkich kanałów ilustruje rys.1. Obliczenia statystyczne wykazały, że poziom średniego błędu względnego wartości obliczanych wyniósł 14%. Nieco gorsza zgodność oporów zmierzonych z obliczonymi ujawniła się w zakresie przepływów laminarnych, co jednak wynika raczej z błędów pomiaru małych wartości spadku ciśnienia występujących w tym zakresie.

Przepływ dwufazowy

W przypadku przepływu dwufazowego okazało się, że przyjęcie typowej dla układu ciecz-gaz wartości $Re_{gr} = 2100$ [Chisholm, 1967] skut-



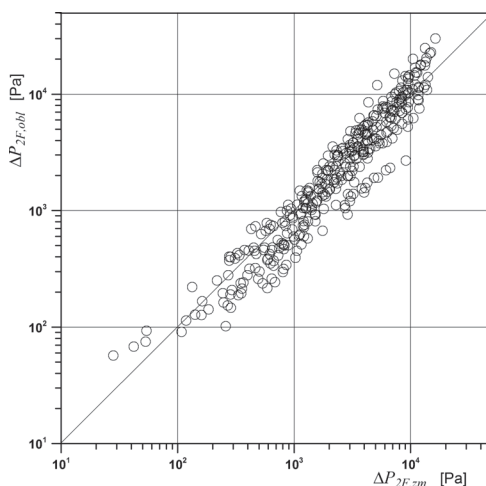
Rys. 1. Porównanie zmierzonych i obliczonych oporów jednofazowego przepływu powietrza i wody w minikanalach

Tab. 2. Dokładność opisu zmierzonych oporów dwufazowych równ. (4)

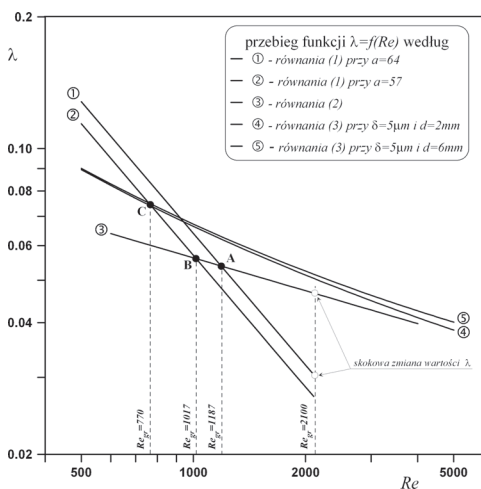
Średnica kanału	Błąd względny przy $Re_{gr} = 2100$	Błąd względny przy $Re_{gr} = 1187$	Błąd względny przy $Re_{gr} = 770$
2 mm	68,0%	66,3%	65,1%
3 mm	55,3%	44,6%	46,1%
4 mm	42,5%	30,4%	31,2%
5 mm	41,8%	38,2%	34,2%
6 mm	40,7%	33,4%	31,7%
2÷6 mm	48,1%	41,0%	40,2%

kowało w opisie zmierzonych oporów dwufazowych rozrzutem wartości obliczanych w stosunku do zmierzonych nawet do 100% i średnim błędem względnym na poziomie 48%.

Widać zatem, że w modelu Lockharta-Martinelliego dość poważnym problemem jest ustalenie kryterium przejścia przepływu faz z laminarnego w burzliwy. Jednak już dla przepływu mieszaniny dwufazowej w rurach konwencjonalnych zauważono [Müller-Steinhagen i Heck, 1986], że znacznie lepsze wyniki obliczeń uzyskuje się przyjmując $Re_{gr} = 1187$. Wartość ta odpowiada położeniu punktu A na rys. 2, czyli wynika z przecięcia linii opisanych równ. (1) i (2) obowiązującymi dla rury hydraulicznie gładkiej.



Rys. 3. Porównanie zmierzonych oporów przepływu mieszanki woda-powietrze z obliczonymi według równania (4) przy założeniu $Re_{gr} = 770$



Rys. 2. Wartości Re_{gr} wynikające z przebiegu różnych funkcji wyrażających wartość λ w obszarze przepływu laminarnego i turbulentnego

W dalszych etapach prowadzonych prac wykonane zostaną obliczenia porównawcze zmierzonych oporów przepływu dwufazowego z wartościami uzyskiwanymi na podstawie w innych, niż klasyczna propozycja Lockharta-Martinelliego, metod opisu oporów przepływu mieszaniny ciecz-gaz.

Wnioski

Ważnym elementem opisu przepływu substancji w minikanale jest uwzględnienie chropowatości jego ścian. Do wyznaczenia współczynnika oporu przepływu gazu lub cieczy można wykorzystać zależność Haalanda, zaś do obliczania oporów przepływu mieszaniny dwufazowej klasyczną metodą Lockharta-Martinelliego. Wyniki badań własnych wykazały jednak, że na dokładność obliczeń ma wpływ odpowiednie ustalenie wartości granicznej liczby Reynoldsa. Stanowi ona kryterium rzeczywistego zaniku laminarnego przepływu faz w kanale o niewielkiej średnicy. Przyjęta w ramach prac własnych dla minikanalów wartość $Re_{gr} = 770$ pozwoliła uzyskać dokładność obliczeń zbliżoną do takiego poziomu, który metoda Lockharta-Martinelliego wykazuje w odniesieniu do opisu oporów przepływu dwufazowego ciecz-gaz w kanałach konwencjonalnych ($\pm 30\%$).

Badania własne prowadzono w kanałach o przekroju kwadratowym, zatem uzasadnione było uwzględnienie w miejscu punktu A wartości Re_{gr} odpowiadającej punktowi B, czyli wykorzystanie linii ② w miejscu ①. Jednak mając dodatkowo na uwadze fakt, że przepływ odbywał się w kanałach o ścianach chropowatych ostatecznie zdecydowano się wskazać na punkt C, jako na granicę zaniku przepływu laminarnego. Jego położenie wynika z miejsca przecięcia linii wyrażającej wartość λ dla laminarnego przepływu płynu w kanale o przekroju kwadratowym z funkcją (3). Dla warunków badań własnych ostateczną wartość Re_{gr} przyjęto zatem jako równą 770.

Tabl. 2 zawiera wyniki analizy statystycznej dotyczącej błędu względnego oporów przepływu dwufazowego, które obliczono według równ. (4), stosując w tabl. 1 trzy różne wartości Re_{gr} . Tym samym wykorzystano różne kryteria oceny przejścia przepływu faz z laminarnego w turbulentny. Z tabl. 2 jasno wynika, że zmiana wartości Re_{gr} prowadzi do zmiany dokładności obliczeń.

Na rys. 3 przedstawiono porównanie zmierzonych oporów przepływu mieszaniny dwufazowej woda-powietrze w poziomych minikanalach o średnicy od 2 do 6 mm z obliczonymi według metody Lockharta-Martinelliego przy założeniu, że $Re_{gr} = 770$.

LITERATURA

Ali R., 2011. *Two-phase flow and heat transfer in microchannels*. LAP Lambert Acad. Publ., Saarbrücken (ISBN 9783845434117)

Chisholm D., 1967. A theoretical basis for the Lochart-Martinelli correlation for two-phase flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **10**, 1767–1778. DOI: 10.1016/0017-9310(67)90047-6

Drobnik S., 2008. *Mechanika płynów*. Wyd. Pol. Częstochowskiej

Dutkowski K., 2011. *Wymiana ciepła i opory przepływu czynników jedno- i dwufazowych w minikanalach*. Wyd. Pol. Koszalińskiej, Monografia nr 192

Lockhart R.W., Martinelli R.C., 1949. Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes. *Chem. Eng. Prog.*, **45**, 1, 39-48

Müller-Steinhagen H., Heck K., 1986. A simple pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. *Chem. Eng. Proc.: Process Intensification*, **20**, 297-308. DOI: 10.1016/0255-2701(86)80008-3

Praca została zrealizowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy PBW 4790.