

Marcin PIETRZAK

e-mail: m.pietrzak@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Przegląd badań dotyczących obliczania oporów przepływu w kanałach o małej średnicy

Wstęp

Konstruktorzy wielu nowoczesnych urządzeń ciepłno-przepływowych muszą brać pod uwagę dwa (wykluczające się na pozór trendy): potrzebę transportu dużej ilości ciepła oraz dążenie do budowy bardziej kompaktowych i lekkich konstrukcji. Przyczyniło się to do powstania wielu aplikacji rozpraszania ciepła w objętości i na powierzchni, co doprowadziło w konsekwencji do wzrostu zainteresowania przepływami dwufazowymi gaz-ciecz - w porównaniu z przepływami jednofazowymi - w mini- i mikrokanalach.

Badania dotyczące przepływu dwufazowego gaz-ciecz w mini- i mikrokanalach cechuje różne podejście w kwestii przewidywania spadku ciśnienia podczas takiego przepływu. Ponieważ liczba badań z tego obszaru w dalszym ciągu rośnie inżynierowie i projektanci mogą mieć problemy z wyborem odpowiedniej dla danych warunków metody obliczeniowej. Głównym tego powodem jest ograniczenie ważności metod do określonych płynów i zakresów prowadzonych pomiarów.

Biorąc powyższe pod uwagę w niniejszej pracy przedstawiono wybrane zbiór informacji dotyczących sposobów obliczania dwufazowych oporów przepływu w mini- i mikrokanalach.

Metody obliczania oporów przepływu

Całkowitą wartość straty ciśnienia $(\Delta P/\Delta L)_{2F,T}$ w przepływie dwufazowym gaz-ciecz w kanałach o małej średnicy można wyrazić jako sumę składowych oporów tarcia $(\Delta P/\Delta L)_{2F,R}$, oraz strat ciśnienia pochodzących od sił grawitacji $(\Delta P/\Delta L)_{2F,H}$ i zmiany pędu $(\Delta P/\Delta L)_{2F,A}$:

$$(\Delta P/\Delta L)_{2F,T} = (\Delta P/\Delta L)_{2F,R} \pm (\Delta P/\Delta L)_{2F,H} + (\Delta P/\Delta L)_{2F,A} \quad (1)$$

Składowa związana ze zmianą pędu strugi dwufazowej ma wartość dodatnią podczas wrzenia w przepływie, ujemną podczas skraplania w przepływie natomiast jest nieistotna, i często pomijana podczas obliczeń, dla przepływów adiabatycznych w kanałach konwencjonalnych oraz w mini i mikro kanałach. Składowa grawitacyjna straty ciśnienia, w przeciwieństwie do przepływów w makrokanalach, jest mniej istotna podczas przepływów w mini- i mikrokanalach, a w przypadku przepływu w kanałach poziomych przyjmuje wartość zerową. W takim przypadku jedynie składowa tarcia straty ciśnienia odgrywa znaczącą rolę podczas przepływów dwufazowych zarówno w kanałach konwencjonalnych jak i o małych średnicach. W związku z czym, z punktu widzenia praktycznego, szacowanie składowej tarcia jest najważniejszym zadaniem inżyniera, co rodzi potrzebę opracowania uniwersalnych metod jej obliczania.

Tarciową stratę ciśnienia podczas przepływu dwufazowego gaz-ciecz w kanałach o małej średnicy można określić na podstawie modelu homogenicznego i modeli rozdzielonych. W przypadku modelu homogenicznego opory przepływu można wyznaczyć według następujących zależności:

$$(\Delta P/\Delta L)_{2F,R} = 2f_{2F} g_{2F}^2 \rho_{2F}^{-1} D_h^{-1} \quad (2)$$

$$f_{2F} = 16 \text{Re}_{2F}^{-1}, \text{ dla } \text{Re}_{2F} < 2000 \quad (3)$$

$$f_{2F} = 0,079 \text{Re}_{2F}^{-0,25}, \text{ dla } 2000 \leq \text{Re}_{2F} < 20000 \quad (4)$$

$$f_{2F} = 0,046 \text{Re}_{2F}^{-0,20}, \text{ dla } \text{Re}_{2F} \geq 20000 \quad (5)$$

$$\text{Re}_{2F} = g_{2F} D_h \eta_{2F}^{-1}, \quad (6)$$

gdzie:

D_h – średnica hydrauliczna, [m]

f_{2F} – dwufazowy współczynnik tarcia *Fanninga*, [-]

g_{2F} – gęstość dwufazowego strumienia masy, [kg/(m²s)]

Re_{2F} – liczba *Reynoldsa* dla przepływu mieszaniny dwufazowej, [-]

η_{2F} – lepkość mieszaniny dwufazowej, [Pas]

ρ_{2F} – gęstość mieszaniny dwufazowej, [kg/m³]

Korzystając z modelu rozdzielonego opory przepływu oblicza się w oparciu o metodę *Lockharta-Martinellego*, w której zakłada się, że ciecz-c lub gaz-g przepływają samodzielnie pełnym przekrojem kanału:

$$(\Delta P/\Delta L)_{2F,R} = (\Delta P/\Delta L)_{c/g} \phi_{c/g}^2 \quad (7)$$

$$(\Delta P/\Delta L)_c = 2f_c g_{2F}^2 (1-x)^2 D_h^{-1} \rho_c^{-1} \quad (8)$$

$$(\Delta P/\Delta L)_g = 2f_g g_{2F}^2 x^2 D_h^{-1} \rho_g^{-1} \quad (9)$$

$$\phi_c^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (10)$$

$$\phi_g^2 = 1 + CX + X^2 \quad (11)$$

gdzie: $\Phi_{c/g}^2$ – mnożnik dla fazy ciekłej lub gazowej [-], x – udział masowy gazu [-], ρ_c – gęstość cieczy [kg/m³], ρ_g – gęstość gazu [kg/m³], C – stała [-], X – parametr *Lockharta-Martinellego* [-].

Inne modele rozdzielonego przepływu jak np. [*Friedel, 1979*], zakładają, że faza ciekła-co lub gazowa-go płyną z sumaryczną gęstością strumienia masy:

$$(\Delta P/\Delta L)_{2F,R} = (\Delta P/\Delta L)_{co/go} \phi_{co/go}^2 \quad (12)$$

$$(\Delta P/\Delta L)_{co/go} = 2f_{co/go} g_{2F}^2 D_h^{-1} \rho_{co/go}^{-1} \quad (13)$$

Z dokonanego przeglądu literaturowego wynika, że większość metod obliczania oporów przepływu w mini i mikro kanałach opartych jest na modelach przepływu rozdzielonego, w których koreluje się wartości mnożników Φ_c^2 i Φ_{co}^2 występujących w równaniach (7) i (12) lub wartość stałej C występującej w równaniu (10) (Tab. 1). Osobną grupę stanowią indywidualne metody obliczeniowe.

Tab. 1. Metody obliczania parametrów Φ_c^2 i Φ_{co}^2 oraz stałej C dla przepływu dwufazowego gaz-ciecz w mini i mikro kanałach

Autor/Metoda	Uwagi
Korelacja dla mnożnika Φ_c^2	
[<i>Yu in., 2002</i>] $\phi_c^2 = [1 + 8,65(v_c/v_g)^{0,5}((1-x)/x)(\text{Re}_g^{0,1}/\text{Re}_c^{0,5})]^{-1,9}$	$D_h=2,98$ mm, wrzenie wody. zakres: $\text{Re}_c < 2000$ i $\text{Re}_g > 2000$
Korelacje dla mnożnika Φ_{co}^2	
[<i>Tran in., 2000</i>] $\phi_{co}^2 = 1 + [4,3((\Delta P/\Delta L)_{go}/(\Delta P/\Delta L)_{co}) - 1] \text{Co} x^{0,875} [1-x]^{0,875} + x^{1,75}$ $\text{Co} = [\sigma / (g(\rho_c - \rho_g) D_h^2)]^{1/2}$ - liczba ograniczająca	$D_h=2,4 \div 2,92$ mm, wrzenie R12, R134a
[<i>Mikielewicz i in., 2007</i>] $\phi_{co}^2 = [1 + 2(F_1^{-1} - 1)x \text{Co}^{-1}] (1-x)^{1/3} + F_{1z}^{-1} x^3$ g – przyspieszenie ziemskie [m/s ²] - dla przepływu laminarnego: $F_1 = (\rho_g/\rho_c)(\eta_c/\eta_g)$ - wartość funkcji $F_{1z} = (\lambda_g/\lambda_c)$ - wartość funkcji - dla przepływu turbulentnego: $F_1 = (\rho_g/\rho_c)(\eta_c/\eta_g)^{0,25}$, $F_{1z} = (\eta_g/\eta_c)(c_{p,c}/c_{p,g})(\lambda_c/\lambda_g)^{0,5}$	$D_h=1-3$ mm, wrzenie i skraplanie freonów
[<i>Maqbool in., 2012</i>] $\phi_{co}^2 = 1 + [4,3((\Delta P/\Delta L)_{go}/(\Delta P/\Delta L)_{co}) - 1] [0,2C \delta^2 x^{0,875} (1-x)^{0,875} + x^{1,75}]$	$D_h=1,224 \div 1,70$ mm, $g_{2F}=100 \div 500$ kgm ⁻² s ⁻¹ , $t_s=23, 33, 43^\circ\text{C}$, wrzenie R717.
Korelacje dla stałej C	
[<i>Mishima i Hibiki, 1996</i>] - dla kanałów o przekroju prostokątnym: $C = 21[1 - \exp(-0,319D_h)]$ - dla kanałów o przekroju okrągłym: $C = 21[1 - \exp(-0,333D)]$	$D_h=1,05 \div 4,08$ mm, Przepł. adiabatyczny powietrze-woda. D_h [mm]

Autor/Metoda	Uwagi
[Lee i Lee, 2001] - dla przepł. laminarnego cieczy i gazu: $C = 6,833 \cdot 10^{-8} \lambda^{-1,317} \psi^{0,719} Re_c^{0,557}$ $\psi = \eta_c w_{c,o} \sigma^{-1}, \lambda = \eta_c^2 (\rho_c \sigma D_h)^{-1}$ $w_{c,o}$ - prędkość pozorna cieczy, - dla przepł. turbulentnego cieczy i laminarnego gazu: $C = 3,627 Re_c^{0,174}$ - dla przepływu laminarnego cieczy i turbulentnego gazu: $C = 6,185 \cdot 10^{-2} Re_c^{0,726}$ - dla przepływu turbulentnego cieczy i gazu: $C = 0,048 Re_c^{0,451}$	$D_h = 0,78 \div 6,67$ mm, Przepł. adiabatyyczny powietrze-woda.
[Hwang i Kim, 2006] $C = 0,227 Re_c^{0,452} X^{-0,32} Co^{-0,82}$	$D_h = 0,244 \div 0,792$ mm, przepł. adiabatyyczny, R134a, $Re_c < 2000$
[Sun i Mishima, 2009] - dla $Re_c < 2000$ i $Re_g < 2000$: $C = 26 \left[1 + (Re_c / 1000) \right] \left[1 - \exp(-0,153(0,27 Co + 0,8)^{-1}) \right]$ - dla $Re_c \geq 2000$ i $Re_g \geq 2000$: $C = 1,79 (Re_g / Re_c)^{0,4} \left[(1 - x/x)^{0,5} \right]$ $\phi_c^2 = 1 + \frac{C}{X^{1,19}} + \frac{1}{X^2}$	$D_h = 0,506 \div 12$ mm, przepł. adiabatyyczny, powietrze-woda, freony, R744
[Li i Wu, 2010] - dla liczby Bonda $Bd \leq 1,5$: $C = 1,19 Bd^{0,45}$ - dla liczby Bonda $1,5 < Bd \leq 11$: $C = 109,4 (Bd Re_c^{0,5})^{-0,56}$ $Bd = \left[\frac{g(\rho_c - \rho_g) D_h^2}{\sigma} \right]^{-1}$ - liczba Bonda	$D_h = 0,148 \div 3,25$ mm, przepł. adiabaty. freony, R717, R290, N ₂ .
[Zhang i in., 2010] - dla przepływu gaz-ciecz: $C = 21 \left[1 - \exp(-0,674 Co^{-1}) \right]$ - dla przepływu para-ciecz: $C = 21 \left[1 - \exp(-0,142 Co^{-1}) \right]$	$D_h = 0,07 \div 6,25$ mm, przepł. adiabaty. powietrze/ N ₂ -woda, freony, R717, woda. Nie zalecana dla przepł. turbul. cieczy i gazu
[Dutkowski, 2011] $C = 150 Co^{-1,4} (Re_c / Re_g)^{1,23} [x/(1-x)]^{0,44}$	$D_h = 0,45 \div 2,30$ mm, wrzenie R134a, R404A.
[Li i Wu, 2011] $C = 5,60 Bd^{0,28}$	$D_h = 0,148 \div 3,25$ mm, przepł. adiabaty. R717, R290, N ₂ .
[Son i Oh, 2012] $C = \left(\phi^2 - 1 - \frac{1}{X^2} \right) \cdot X = 2485 We_{2F}^{0,407} Re_{2F}^{0,34}$ $We_{2F} = g_{2F}^2 D_h \sigma^{-1} \rho_{2F}^{-1}$ - liczba Webera	$D_h = 3-8$ mm, powietrze-woda, $g_{2F} = 99,93 \div 3184,69$ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.
[Autee i in., 2014] $C = 68,511 \left[(Re_c / Re_g)^{0,9538} x^{-0,5016} Fr_{2F}^{-1,2149} \right]$ $Fr_{2F} = g_{2F}^2 D_h \bar{\rho}_{2F}^{-1}$ - liczba Frouda	$D_h = 1,77$ mm, skraplanie R22, R134a, R410A, $g_{2F} = 450 \div 1050$ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, $t_s = 40^\circ C$.
[Kim i Mudawar, 2014] Przepływ adiabatyyczny i skraplanie w przepływie: - dla przepływu turbulentnego cieczy i gazu: $C^* = 0,39 Re_{co}^{0,03} Su_{go}^{0,10} (\rho_c / \rho_g)^{0,35}$ - dla przepływu laminarnego cieczy i gazu: $C^* = 3,5 \cdot 10^{-5} Re_{co}^{0,44} Su_{go}^{0,50} (\rho_c / \rho_g)^{0,48}$ - dla przepływu turbulentnego cieczy i laminarnego gazu: $C^* = 8,7 \cdot 10^{-4} Re_{co}^{0,17} Su_{go}^{0,50} (\rho_c / \rho_g)^{0,14}$ - dla przepływu laminarnego cieczy i turbulentnego gazu: $C^* = 15 \cdot 10^{-4} Re_{co}^{0,59} Su_{go}^{0,19} (\rho_c / \rho_g)^{0,36}$ $Su_{go} = \rho_g \sigma D_h \eta_g^{-1}$ - liczba Suratmana Wrzenie w przepływie: - dla $Re_c \geq 2000$ $C = C^* \left[1 + 60 We_{co}^{0,32} (Bo_o O_z^{-1})^{0,78} \right]$ - dla $Re_c < 2000$ $C = C^* \left[1 + 530 We_{co}^{0,52} (Bo_o O_z^{-1})^{1,09} \right]$ $We_{co} = g_{2F}^2 D_h \sigma^{-1} \rho_c^{-1}$, $Bo = qg_{2F}^{-1} r^{-1}$ - liczba wrzenia	$D_h = 0,0695 \div 6,22$ mm, $g_{2F} = 4 \div 8528$ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, $x = 0 \div 1$, $Re_c = 0 \div 79202$, $Re_g = 0 \div 253810$, powie- trze/N ₂ /CO ₂ -woda, N ₂ -etanol, R12, R22, R134a, R236ea, R245fa, R404A, R410A, R407C, propan, metan, R717, R744, woda. $D_h = 0,349 \div 5,35$ mm, $g_{2F} = 33 \div 2738$ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, $x = 0 \div 1$, $Re_c = 0 \div 16020$, $Re_g = 0 \div 199500$, R12, R134a, R22, R245fa, R410A, FC-72, R717, R744, woda. O_o - obwód ogrzewany O_z - obwód zwilżany

[Hossain i in., 2015] $C = 21 \left[1 - \exp(-0,28 Bd^{0,5}) \right] \left[2 - 1,9 \exp(-0,016 Fr_{2F}^{1,4}) \right]$	$D_h = 4,35$ mm, skrapla- nie R1234ze(E), R32, R410A; $g_{2F} = 147 \div 403$ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, $t_s = 30, 45^\circ C$
---	--

Podsumowanie

W pracy przedstawiono metody oznaczania tarciowej składowej oporów dla przepływu dwufazowego gaz-ciecz oraz podczas wrzenia i kondensacji w mini- i mikrokanalach.

Skonsolidowana baza metod obliczeniowych może być przydatnym narzędziem przy ocenie oporów przepływu dwufazowego gaz-ciecz w mini- i mikrokanalach jak również może zostać wykorzystana do opracowania nowych, uniwersalnych korelacji obliczeniowych.

LITERATURA

Autee A., Rao S., Puli R., (2014). Experimental study on two-phase pressure drop of air-water in small diameter tubes at horizontal orientation. *Therm. Sci.*, 18 (2), 521-532. DOI: 10.2298/tsci111128049a

Dutkowski K., (2011). *Wymiana ciepła i opory przepływu czynników jedno i dwufazowych w mini kanalach*. Monografia nr 192, Wyd. Pol. Koszalińskiej, Koszalin

Friedel L., (1979). *Improved friction pressure drop correlation for horizontal and vertical two-phase pipe flow*. European Two-Phase Flow Group Meeting, Paper E2, Ispra, June 5-8, 1979

Hossain Md., Afroz H., Miyara A., (2015). Two-phase frictional correlation for the prediction of condensation pressure drop inside smooth horizontal tube. *Procedia Eng.*, 105, 64-72. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.05.008

Hwang Y.W., Kim M.S., (2006). The pressure drop in microtubes and the correlation development. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49, 1804-1812. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.10.040

Kim S.M., Mudawar I., (2014). Review of databases and predictive methods for pressure drop in adiabatic, condensing and boiling mini/micro-channel flows. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 77, 74-97. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.035

Lee H.J., Lee S.Y., (2001). Pressure drop correlations for two-phase flow within horizontal rectangular channels with small heights. *Int. J. Multiphase Flow* 27, 783-796. DOI: 10.1016/s0301-9322(00)00050-1

Li W., Wu Z., (2010). A general correlation for adiabatic two-phase pressure drop in micro/mini-channels. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 53, 2732-2739. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.029

Li W., Wu Z., (2011). Generalized adiabatic pressure drop correlations in evaporative micro/mini-channels. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 35, 866-872. DOI: 10.1016/j.expthermfluidsci.2010.07.005

Maqbool M.H., Palm B., Khodabandeh R., (2012). Flow boiling of ammonia in vertical small diameter tubes: Two phase frictional pressure drop results and assessment of prediction methods. *Int. J. Therm. Sci.*, 54, 1-12. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.11.018

Mikielewicz D., Mikielewicz J., Tesmar J., (2007). Improved semi-empirical method for determination of heat transfer coefficient in flow boiling in conventional and small diameter tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50, 3949-3956. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.01.024

Mishima K., Hibiki T., (1996). Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes. *Int. J. Multiphase Flow* 22, 703-712. DOI: 10.1016/0301-9322(96)00010-9

Son C.H., Oh H.K., (2012). Condensation pressure drop of R22, R134 and R410A in a single circular microtube. *Heat Mass Transfer*, 48(8), 1437-1450. DOI: 10.1007/s00231-012-0990-1

Sun L., Mishima K., (2009). Evaluation analysis of prediction methods for two-phase flow pressure drop in mini-channels. *Int. J. Multiphase Flow*, 35, 47-54. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.08.003

Tran T.N., Chyu M.C., Wambsgans M.W., France D.M., (2000). Two-phase pressure drop of refrigerants during flow boiling in small channels: an experimental investigation and correlation development. *Int. J. Multiphase Flow*, 26, 1739-1754. DOI: 10.1016/s0301-9322(99)00119-6

Yu W., France D.M., Wambsgans M.W., Hull J.R., (2002). Two-phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube. *Int. J. Multiphase Flow*, 28, 927-941. DOI: 10.1016/s0301-9322(02)00019-8

Zhang W., Hibiki T., Mishima K., (2010). Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in mini-channel. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 53, 453-465. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.011

Praca naukowa finansowana w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Iuventus Plus” w latach 2015-2017 nr projektu IP2014 036473.