

**Krzysztof DUTKOWSKI**POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA  
ul. Raclawicka 15/17, 75-620 Koszalin**Pomiary oporów przepływu dwufazowego w minikanalach**

Dr inż. Krzysztof DUTKOWSKI

Krzysztof Dutkowski – zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Techniki Ciepłej i Chłodnictwa na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. W 2001 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych z Budowy i Eksploatacji Maszyn, specjalność: Technika Ciepła. Zajmuje się badaniami oporów przepływu, wymianą ciepła i niestabilnościami podczas wrzenia czynników chłodniczych w przepływie minikanalami.



e-mail: krzysztof.dutkowski@tu.koszalin.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań oporów przepływu mieszaniny woda-powietrze w minirurkach. W badaniach zastosowano 10 minirurek ze stali nierdzewnej o średnicy wewnętrznej  $d_w = 0,64 \div 2,30$  mm. Badania przeprowadzono w zakresie parametrów: masowe natężenie przepływu wody  $0,15 \div 59$  kg/h, powietrza  $0,004 \div 0,7$  kg/h, udział masowy powietrza w mieszaninie dwufazowej  $x = 0,0003 \div 0,22$ , gęstość strumienia masy mieszaniny ( $w_p$ ) =  $46 \div 8582$  kg/(m<sup>2</sup>·s). Wykazano brak możliwości wykorzystania klasycznych metod obliczenia oporu przepływu dwufazowego.

**Słowa kluczowe:** minikanaly, opory przepływu dwufazowego, badania eksperymentalne.

**Measurements of two phase pressure drop in minichannels****Abstract**

The paper presents results of experimental investigations of frictional pressure drop in minichannels. Air-water mixture was used as working fluid. The test section was made from stainless-steel pipes of internal diameters equal to 0.64, 1.05, 1.10, 1.30, 1.35, 1.40, 1.60, 1.68, 1.94 and 2.30 mm. Investigations were performed for mass flux of  $46 \div 8582$  kg/(m<sup>2</sup>·s) and gas quality from 0.0003 to 0.22. The superficial velocity ranges of water and air were  $0.1 \div 8.6$  m/s and  $0.9 \div 63.9$  m/s, respectively. The results of experimental investigations were compared with the theoretical values obtained from the homogeneous equilibrium model (HEM). The dynamic viscosity coefficient was calculated using correlations proposed by: Owens, Mc Adams, Ackers, Cicchitti, Dukler, Beattie & Whaley, Lin. It was found that none of the tested correlations could predict the two-phase pressure drop satisfactorily. Even though there exist papers which confirm the suitability of the classical separated flow methods of Lockhart-Martinelli and Friedel for calculations of the frictional pressure drop of the two-phase flow in minichannels, the experimental study conducted by the author confirms the existence of substantial limitations. The classical correlations of Lockhart-Martinelli and Friedel can be only treated as primary estimation of resistances in the adiabatic two-phase flow in tubular minichannels. Experiments confirmed the need for introducing corrections and modifications to the classical method to obtain results reliable in case of minichannels.

**Keywords:** minichannels, two phase pressure drop, experimental investigations.

**1. Wstęp**

Projektant parownika kompaktowego, zbudowanego na bazie minikanalów staje obecnie przed poważnym dylematem, dotyczącym wyboru odpowiednich metod obliczenia wielkości oporów przepływu wrzących czynników w minikanalach. Dlatego pierwszym zagadnieniem, które było rozważane w problemie przepływów dwufazowych, było sprawdzenie możliwości wykorzystania procedur obliczeniowych, które są od wielu lat znane i sprawdzone dla przepływu w kanałach konwencjonalnych.

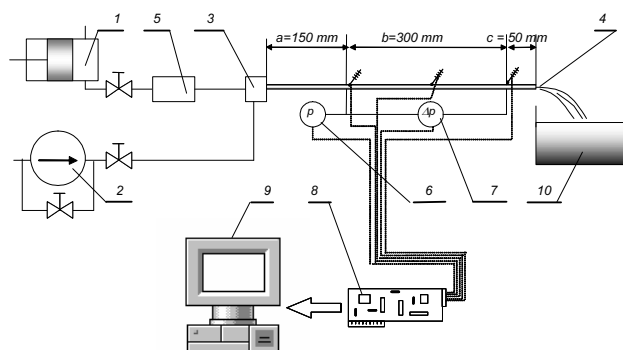
Do takich należą propozycje zawarte w modelu homogenicznym czy procedury Lockharta–Martinello, Friedela oparte na modelu rozdzielonym. Sporadycznie prezentowane są prace [1, 2, 3], w których porównanie wyników badań eksperymentalnych z wynikami obliczeń według podanych korelacji potwierdziły możliwość ich stosowania w odniesieniu do minikanalów. Autorzy zdecydowanej większości opublikowanych prac [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] donoszą, iż w odniesieniu do minikanalów nie jest możliwe wykorzystanie klasycznych korelacji do obliczania oporu dwufazowego przepływu. Wnoszone są więc uwagi krytyczne oraz propozycje różnych poprawek i modyfikacji.

Wskazane wyżej przykłady negatywnej oceny w zakresie bezpośredniego przeniesienia klasycznych metod obliczania oporów przepływu w kanałach konwencjonalnych do obszaru minikanalów były inspiracją podjęcia własnych badań porównawczych pozwalających na rozstrzygnięcie wątpliwości w tym zakresie.

**2. Stanowisko badawcze**

Na rys. 1 przedstawiono schemat stanowiska badawczego. Woda, której wymuszony przepływ generowała mini-pompa zębata 2 doprowadzana była do strefy mieszania 3 i dalej do sekcji pomiarowej minikanalu rurowego 4. Układ zaworów w oprzyrządowaniu pompy 2 służył do regulacji natężenia przepływu wody. Powietrze doprowadzane było i przetłaczane za pomocą sprężarki 1, przez zawór regulacyjny oraz układ filtrów do przepływomierza masowego Coriolisa 5. Zakres pomiarowy przepływomierza wynosił  $0 \div 20$  kg/h, co przy klasie przyrządu 0,15 pozwalało na osiągnięcie dokładności  $\pm 0,03$  kg/h. Zakres przepływomierza mógł być zmieniany, przez co można było osiągnąć wzrost dokładności pomiaru, przy mniejszym mierzonym natężeniu przepływu.

Sekcja pomiarowa 4 stanowiła podstawowy element stanowiska pomiarowego. Do badań zastosowano minikanaly o przekroju kołowym wykonane ze stali nierdzewnej, o całkowitej długości 500 mm i średnicy wewnętrznej: 0,64 mm, 1,05 mm, 1,10 mm, 1,30 mm, 1,35 mm, 1,40 mm, 1,60 mm, 1,68 mm, 1,94 mm oraz 2,30 mm.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1–sprężarka wraz ze zbiornikiem, 2–pompa, 3–strefa mieszania, 4–odcinek pomiarowy, 5–przepływomierz, 6–czujnik pomiaru ciśnienia, 7–czujnik pomiaru różnicy ciśnienia, 8–karta pomiarowa, 9–komputer, 10–zbiornik

Fig. 1. Schematic of the experimental set-up: 1–compressor with tank, 2–pump, 3–mixing zone, 4–tested section, 5–flowmeter, 6–pressure sensor, 7–pressure drop sensor, 8–data acquisition system, 9–computer, 10–water tank

Szczegółowy opis stanowiska badawczego można znaleźć, między innymi, w pracach [15, 16, 17].

### 3. Zakres badań

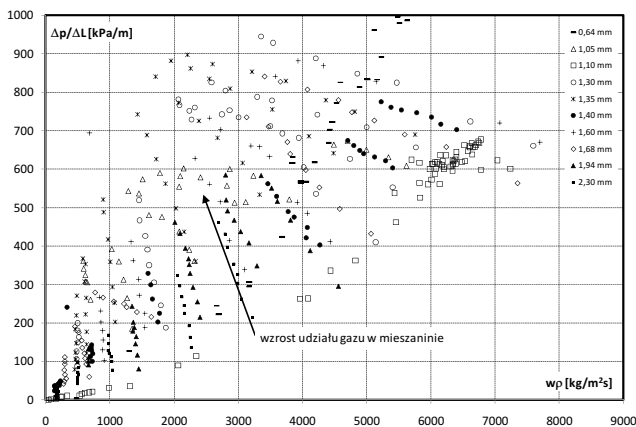
W tabelicy 1 przedstawiono zestawienie zbiorcze zakresów pomiarowych wielkości eksperymentalnych, a w tym: masowego natężenia przepływu wody –  $\dot{m}_w$ , powietrza –  $\dot{m}_p$ , udziału masowego powietrza w mieszaninie –  $x$ , pozornej prędkości powietrza w minikanale –  $j_p$ , pozornej prędkości wody w minikanale –  $j_w$  oraz gęstości strumienia masy mieszaniny dwufazowej –  $(w\rho)$  dla każdej z przebadanych średnic minikanalu.

Tab. 1. Zakres wielkości mierzonych  
Tab. 1. Range of measured parameters

| $d_w$<br>[mm] | $\dot{m}_w$<br>[kg/h] | $\dot{m}_p$<br>[kg/h] | $x$<br>[-]    | $j_p$<br>[m/s] | $j_w$<br>[m/s] | $(w\rho)$<br>[kg/(m <sup>2</sup> ·s)] |
|---------------|-----------------------|-----------------------|---------------|----------------|----------------|---------------------------------------|
| 0,64          | 0,005÷0,018           | 0,52÷9,85             | 0,0014÷0,0093 | 1,9÷9,5        | 0,5÷9,1        | 485÷9087                              |
| 1,05          | 0,032÷0,427           | 1,47÷18,17            | 0,0018÷0,2247 | 3,7÷63,9       | 0,5÷5,6        | 587÷5622                              |
| 1,10          | 0,004÷0,021           | 0,15÷24,74            | 0,0005÷0,0684 | 0,9÷4,5        | 0,1÷7,2        | 46÷7238                               |
| 1,30          | 0,011÷0,442           | 2,03÷34,63            | 0,0003÷0,1074 | 0,9÷32,0       | 0,4÷7,6        | 481÷7596                              |
| 1,35          | 0,052÷0,637           | 2,21÷30,94            | 0,0018÷0,1506 | 3,6÷41,8       | 0,4÷5,8        | 455÷5756                              |
| 1,40          | 0,034÷0,138           | 0,65÷35,44            | 0,0014÷0,1762 | 2,8÷19,3       | 0,1÷6,4        | 139÷6405                              |
| 1,60          | 0,020÷0,623           | 4,26÷59,03            | 0,0003÷0,0933 | 1,1÷21,9       | 0,6÷8,6        | 683÷8582                              |
| 1,68          | 0,034÷0,593           | 1,99÷58,60            | 0,0006÷0,1680 | 1,7÷37,3       | 0,2÷7,4        | 280÷7347                              |
| 1,94          | 0,042÷0,702           | 1,67÷47,02            | 0,0013÷0,0803 | 2,9÷29,4       | 0,2÷4,6        | 174÷4565                              |
| 2,30          | 0,063÷0,594           | 2,58÷53,98            | 0,0012÷0,1137 | 2,3÷19,9       | 0,2÷3,3        | 172÷3318                              |

### 4. Wyniki badań

Zestawienie zbiorcze zmierzonego gradientu ciśnienia ( $\Delta p/\Delta L$ ) w zależności od gęstości strumienia masy ( $w\rho$ ) mieszaniny wodapowietrze, dla 10 różnych średnic minikanalu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Opory przepływu dwufazowego w funkcji gęstości strumienia masy (powietrze-woda,  $d_w = 0,64 \div 2,30$  mm)

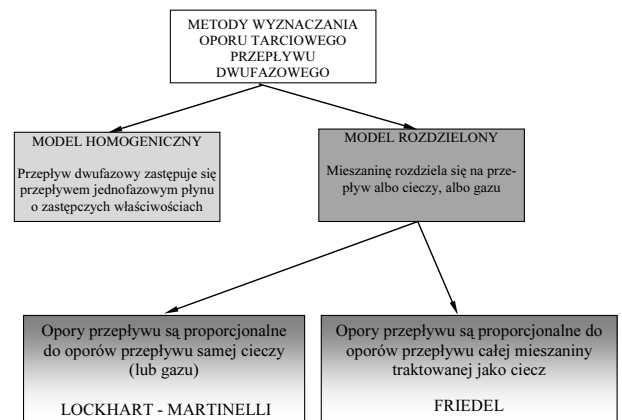
Fig. 2. Two-phase pressure drop vs. mass flux (air-water,  $d_w = 0,64 \div 2,30$  mm)

W celu dokładnej analizy wyniki przedstawione na rys. 2 zostały wyselekcjonowane i zestawione w postaci oddzielnych charakterystyk (nie prezentowanych w niniejszym opracowaniu). Na podstawie dokładnych analiz stwierdzono, iż ze wzrostem strumienia masy wzrastają opory przepływu dwufazowego. Przy tym samym natężeniu przepływu opory przepływu są tym większe, im mniejsza jest średnica minikanalu. Zauważa się wyraźny wpływ udziału fazy gazowej w mieszaninie na opory przepływu. Im większy udział fazy gazowej w mieszaninie (przy niezmiennym poziomie całkowitego strumienia masy), tym wyraźniej wyższe opory przepływu. Opory przepływu, przy tym samym strumieniu masy, przez minirurki o większej średnicy mogą być większe niż przez minirurki o mniejszej średnicy, gdy większy jest udział fazy gazowej.

### 5. Porównanie wyników badań z wynikami obliczeń

Określenie oporu przepływu dwufazowego w kanałach konwencjonalnych jest zagadnieniem trudnym. Podczas przepływu dwufazowego zmienia się nie tylko udział objętościowy faz tworzących układ dwufazowy, ale również kształt powierzchni międzyfazowej. Na podstawie wyprowadzonych teoretycznie i sprawdzonych doświadczalnie zależności opisujących całkowity spadek ciśnienia w przepływie dwufazowym uwzględnia się: tarciowy spadek ciśnienia, przyspieszeniowy spadek ciśnienia oraz hydrostatyczny spadek ciśnienia. W przypadku dwufazowego, adiabatycznego przepływu przez poziomy kanał, określenie spadku ciśnienia sprowadza się do wyznaczenia jedynie tarciowego spadku ciśnienia.

Na rysunku 3 przedstawiono graficznie podział metod obliczania tarciowego oporu przepływu dwufazowego stosowanych i sprawdzonych dla kanałów konwencjonalnych.



Rys. 3. Metody obliczania tarciowego oporu przepływu  
Fig. 3. Methods of frictional pressure drop calculations

Wykorzystując uzyskaną bazę 331 eksperymentalnych punktów przeprowadzono analizę możliwości zastosowania klasycznych procedur obliczania oporu przepływu czynników dwufazowych w odniesieniu do minikanalów. Do obliczeń wykorzystano modele przedstawione na rysunku 3.

1. Model homogeniczny – przyjmuje się, że mieszanina dwufazowa jest płynem o pewnych zastępczych właściwościach. W związku z tym tarciove opory przepływu określa się w oparciu o równanie Darcy-Weisbacha

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{2F,HOM} = \lambda_{HOM} \frac{1}{d} \frac{\rho_{HOM} \cdot w_{HOM}^2}{2}, \quad (1)$$

gdzie:

– współczynnik tarcia  $\lambda_{HOM}$ , wyznaczany jest albo z równania Poiseuille'a – dla ruchu laminarnego

$$\lambda_{HOM} = \frac{64}{\text{Re}_M}, \quad (2)$$

albo Blasiusa – dla ruchu turbulentnego

$$\lambda_{HOM} = 0,316 \cdot \text{Re}_M^{-0,25}; \quad (3)$$

– gęstość mieszaniny homogenicznej ( $\rho_{HOM}$ ) wyznacza się na podstawie udziału masowego oraz gęstości każdej frakcji (wody –  $w$ , lub powietrza –  $p$ )

$$\frac{1}{\rho_M} = \frac{x}{\rho_p} + \frac{1-x}{\rho_w}, \quad (4)$$

– prędkość mieszaniny homogenicznej  $w_{HOM}$  wynika z przepływu całej masy kanałem

$$w_M = \frac{\dot{m}_w + \dot{m}_p}{\rho_M \cdot A}. \quad (5)$$

Stosowana do obliczenia współczynnika tarcia homogeniczna liczba Reynoldsa

$$Re_M = \frac{w_M \cdot \rho_M \cdot d_h}{\mu_M} \quad (6)$$

bazuje na współczynniku lepkości mieszaniny homogenicznej. Różni autorzy proponują sprawdzone i zalecane przez nich metody wyznaczania tego parametru:

– Owens [4]

$$\mu_M = \mu_w, \quad (7)$$

– Mc Adams [4, 9, 12, 18, 19]

$$\frac{1}{\mu_M} = \frac{x}{\mu_p} + \frac{1-x}{\mu_w}, \quad (8)$$

– Cicchitti [4, 18]

$$\mu_M = x \cdot \mu_p + (1-x) \mu_w, \quad (9)$$

– Ackers [18]

$$\mu_M = \frac{\mu_w}{(1-x) + x \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_p}\right)^{0,5}}, \quad (10)$$

– Dukler [4, 18, 19]

$$\mu_M = \rho_M \cdot [x \cdot v_p \cdot \mu_p + (1-x) \cdot v_w \cdot \mu_w], \quad (11)$$

– Beattie i Whalley [4, 18, 19]

$$\mu_M = \beta \cdot \mu_p + \mu_w \cdot (1-\beta) \cdot (1+2,5\beta) \quad (12)$$

gdzie 
$$\beta = \frac{x \cdot \rho_w}{x \cdot \rho_w + (1-x) \cdot \rho_p}, \quad (13)$$

– Lin [18]

$$\mu_M = \frac{\mu_w \cdot \mu_p}{\mu_p + x^{1,4} \cdot (\mu_w - \mu_p)}. \quad (14)$$

2. Model rozdzielony – np.: metoda Lockharta – Martinello (1949) – przyjmuje się, że opory przepływu dwufazowego należy obliczać tak, jakby kanałem płynęła tylko faza ciekła (może być gazowa, ale ze względów metrologicznych podejście od strony cieczy jest bardziej praktyczne). Wówczas opory przepływu dwufazowego wyraża się jako [4, 20, 21, 22, 23]:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \Phi_w^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_w = \Phi_p^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_p, \quad (15)$$

gdzie spadek ciśnienia wywołany jednofazowym przepływem czynnika przedstawia się w postaci:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_w = \lambda_w \frac{1}{d} \frac{\rho_w j_w^2}{2}, \quad (16)$$

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_p = \lambda_p \frac{1}{d} \frac{\rho_p j_p^2}{2}. \quad (17)$$

Wielkości  $\Phi_w$  i  $\Phi_p$  we wzorze (15) oznaczają poprawki, zależne od parametru Lockharta – Martinellogo  $\chi$  określonego w postaci wzoru:

$$\chi^2 = \frac{\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_w}{\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_p}. \quad (18)$$

Współczynniki oporu przepływu jednofazowego  $\lambda_w$  i  $\lambda_p$  oblicza się z zależności Hagen-Pouissuille'a dla przepływu laminarnego lub, na przykład, wzoru Blasiusa - w przypadku przepływu turbulentnego. Liczbę Reynoldsa charakteryzującą rodzaj przepływu określa wzór:

$$Re_{w(p)} = \frac{j_{w(p)} \cdot d}{v_{w(p)}}. \quad (19)$$

Prędkość pozorną wody –  $j_w$  lub powietrza –  $j_p$ , można wyznaczyć zakładając, że całym przekrojem  $A$  kanału płynie tylko wybrana faza

$$j_{w(p)} = \frac{\dot{m}_{w(p)}}{\rho_{w(p)} \cdot A}. \quad (20)$$

Autorzy Chisholm i Laid (1958) [4, 20] zaproponowali analityczną postać wzorów do obliczenia współczynników poprawkowych oporu przepływu dwufazowego w postaci:

$$\Phi_w^2 = 1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2}, \quad (21)$$

$$\Phi_p^2 = 1 + C\chi + \chi^2, \quad (22)$$

gdzie stała  $C$  jest dobierana w zależności od charakteru przepływu każdej z faz:  $C = 5$  (przepływ laminarny wody – przepływ laminarny powietrza),  $C = 10$  (przepływ turbulentny wody – przepływ laminarny powietrza),  $C = 12$  (przepływ laminarny wody – przepływ turbulentny powietrza) i  $C = 20$  (przepływ turbulentny wody – przepływ turbulentny powietrza).

3. Model rozdzielony – metoda Friedela (1979) – przyjmuje się, że tarciovyy opór przepływu dwufazowego jest proporcjonalny do spadku ciśnienia, jaki powstałby, gdyby cała przepływająca masa była traktowana, jako jedna faza, to znaczy jako tylko woda -  $w_o$ . Zależność określającą tarciovyy spadek ciśnienia podczas przepływu dwufazowego można wyrazić, jako [18, 20, 21, 22, 23]:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{TFP} = \Phi_{w_o}^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{w_o}, \quad (23)$$

gdzie:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{w_o} = \lambda_{w_o} \frac{1}{d} \frac{\rho_w j_{w_o}^2}{2}, \quad (24)$$

$$Re_{w_o} = \frac{j_{w_o} \cdot d}{v_w}, \quad (25)$$

$$j_{wo} = \frac{\dot{m}_w + \dot{m}_p}{\rho_w \cdot A} \quad (26)$$

Friedel zaproponował zależność do obliczenia współczynnika poprawkowego oporu dwufazowego przepływu  $\Phi_{wo}$  na podstawie analizy bazy 25 000 danych eksperymentalnych, jako:

$$\Phi_{wo}^2 = \left[ (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_w \lambda_w}{\rho_p \lambda_p} \right] + \frac{3,24 \cdot x^{0,78} (1-x)^{0,224} \cdot A}{Fr_{HOM}^{0,045} \cdot We_{HOM}^{0,035}}, \quad (27)$$

$$A = \left( \frac{\rho_p}{\rho_w} \right)^{-0,91} \left( \frac{\mu_p}{\mu_w} \right)^{0,19} \left( 1 - \frac{\mu_p}{\mu_w} \right)^{0,7}$$

gdzie  $Fr_{HOM}$  jest liczbą Frouda liczoną jak dla płynu homogenicznego:

$$Fr_{HOM} = \frac{(w\rho)^2}{d \cdot g \cdot \rho_{HOM}^2}, \quad (28)$$

zaś  $We_{HOM}$  jest liczbą Webera:

$$We_{HOM} = \frac{d \cdot (w\rho)^2}{\sigma \cdot \rho_{HOM}} \quad (29)$$

W dalszej analizie porównano wyniki obliczeń tarcowego spadku ciśnienia  $(\Delta p/\Delta L)_{th}$  określonego z klasycznych wzorów stosowanych dla kanałów konwencjonalnych z wynikami badań eksperymentalnych  $(\Delta p/\Delta L)_{exp}$ .

Wspólną podstawą oceny przydatności określonej procedury obliczeniowej danego modelu było określenie procentowego średniego błędu absolutnego MAE (ang. mean absolute error) [18, 21, 24, 25] wyrażonego zależnością:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum \left[ \frac{\left| \left( \frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{th} - \left( \frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{exp} \right|}{\left( \frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{exp}} \times 100 \right], \quad (30)$$

gdzie:  $(\Delta p/\Delta L)_{th}$  wynik obliczenia tarcowego oporu przepływu według danego modelu,  $(\Delta p/\Delta L)_{exp}$  wartość eksperymentalnie zmierzony oporu,  $N$  – liczba pomiarów.

Tab. 2. Wyniki obliczenia MAE [%]  
Tab. 2. Results of MAE calculations [%]

| d [mm] | Model homogeniczny<br>współczynnik lepkości dynamicznej według: |             |             |             |             |                   |             | Model rozdzielony     |             |
|--------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-----------------------|-------------|
|        | Owens   | McAdams     | Cicchitti   | Ackers      | Dukler      | Beattie & Whalley | Lin         | Lockhart & Martinelli | Friedel     |
| 0,64   | 76,2  | 70,0        | 74,5        | 75,9        | 57,3        | 69,8              | 74,6        | 85,0                  | 129,2       |
| 1,05   | 114,0   | 60,4        | 81,8        | 106,4       | 18,3        | 49,0              | 76,8        | 45,5                  | 90,3        |
| 1,10   | 102,0   | 73,3        | 96,3        | 101,1       | 31,0        | 62,4              | 93,8        | 65,2                  | 183,2       |
| 1,30   | 76,2  | 13,9        | 38,9        | 48,7        | 15,8        | 10,5              | 26,9        | 35,6                  | 47,0        |
| 1,35   | 39,9  | 12,5        | 18,7        | 34,2        | 34,8        | 17,2              | 10,3        | 32,9                  | 23,2        |
| 1,40   | 130,5   | 10,7        | 69,4        | 114,1       | 24,1        | 11,8              | 27,6        | 30,0                  | 104,2       |
| 1,60   | 26,5  | 11,6        | 22,6        | 25,0        | 21,2        | 9,5               | 20,3        | 35,8                  | 30,8        |
| 1,68   | 60,9  | 10,1        | 28,1        | 52,3        | 30,6        | 14,4              | 13,4        | 30,0                  | 40,1        |
| 1,94   | 123,1   | 19,1        | 85,8        | 115,4       | 19,7        | 7,3               | 57,2        | 23,0                  | 118,3       |
| 2,30   | 39,5  | 32,2        | 27,1        | 35,0        | 50,9        | 37,5              | 22,8        | 47,8                  | 17,4        |
|        | <b>76,5</b>   | <b>31,4</b> | <b>54,3</b> | <b>70,8</b> | <b>30,4</b> | <b>28,9</b>       | <b>42,4</b> | <b>42,6</b>           | <b>78,4</b> |

Z przedstawionych wyników obliczeń porównawczych, średniego procentowego błędu absolutnego MAE [%], zamieszczonych w tabelicy 2 wynika relatywnie duży rozrzut błędów. W modelu homogenicznym, istotny wpływ na wartość tego błędu ma wybór wzoru do obliczenia homogenicznego współczynnika lepkości dynamicznej  $\mu_h$ . W świetle wykonanej analizy można zalecać stosowanie w obliczeniach tego współczynnika propozycji Beattie-Whalleya (12) – średni błąd MAE  $\cong 29\%$ , a także wzory Duklera (11) oraz McAdamsa (8) – średni błąd MAE  $\cong 30 \div 32\%$ . Zastosowanie klasycznej metody Lockharta-Martinellogo do obliczenia tarcowego oporu przepływu mieszaniny wody i powietrza w minikanalach rurowych daje znacznie niższą wartość błędu procentowego MAE [%], niż według klasycznej metody Friedela.

Należy zauważyć, że w każdym przypadku błąd metody staje się większy, im średnica minikanalu jest mniejsza.

## 6. Podsumowanie

Przeprowadzona przez autora eksperymentalna weryfikacja możliwości wykorzystania klasycznych metod obliczenia oporów adiabaticznego przepływu dwufazowego, znanych dla kanałów konwencjonalnych ma w odniesieniu do minikanalów rurowych znaczne ograniczenia, a w tym:

1. klasyczne korelacje Lockharta-Martinellogo, Friedela oraz model homogeniczny mogą służyć tylko do wstępnego oszacowania oporów w adiabaticznym przepływie dwufazowym w minikanalach rurowych;
2. konieczne są dalsze badania, dotyczące sprawdzenia propozycji innych autorów w zakresie prawidłowego określania oporów przepływu w minikanalach.

## 7. Literatura

- [1] Mauro A. W., Quiben J. M., Mastrullo R., Thome J. R.: Comparison of experimental pressure drop data for two phase flows to prediction methods using a general model. Int. Journal of Refrigeration, 2007, vol. 30, s. 1358 – 1367.
- [2] Pettersen J.: Flow vaporization of CO2 in microchannel tubes, Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, vol. 28, s. 111 – 121.
- [3] Sobierska E., Kulenovic R., Mertz R., Groll M.: Experimental results of flow boiling of water in a vertical microchannel. Experimental Thermal and Fluid Science, 2006, vol. 31, s. 111 – 119.
- [4] Kawahara A., Chung P.M.-Y., Kawaji M.: Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel. Int. Journal of Multiphase Flow, 2002, vol. 28, s. 1411 – 1435.
- [5] Kawahara A., Sadatami M., Okayama K., Kawaji M.: Effects of liquid properties on pressure drop of two-phase gas-liquid flow through a microchannel. First International Conference on Microchannels and Minichannels, New York, 2003.
- [6] Hibiki T., Hazuku T., Takamasa T., Ishii M.: Some characteristics of developing bubbly flow in a vertical mini pipe. Int. Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, vol. 28, s. 1034 – 1048.
- [7] Mishima K., Hibiki T.: Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes. Int. Journal of Multiphase Flow, 1996, vol. 22, s. 703 – 712.
- [8] Lee H. J., Lee S. Y.: Pressure drop correlations for two-phase flow within horizontal rectangular channels with small heights. Int. Journal of Multiphase Flow, 2001, vol. 27, s. 783 – 796.
- [9] Pehlivan K., Hassan I., Vaillancourt M.: Experimental study on two-phase flow and pressure drop in millimeter-size channels. Applied Thermal Engineering, 2006, vol. 26, s. 1506 – 1514.
- [10] Chung P.M.-Y., Kawaji M.: The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannels, Int. Journal of Multiphase Flow, 2004, vol. 30, s. 735 – 761.
- [11] Zhao T.S., Bi Q. C.: Pressure drop characteristics of gas-liquid two-phase flow in vertical miniature triangular channels. Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, vol. 44, s. 2523 – 2534.
- [12] Triplett K.A., Ghiaasiaan S.M., Abdel-Khalik S.I., LeMouel A., McCord B.N.: Gas liquid two-phase flow in microchannels. Part II: void fraction and pressure drop. Int. Journal of Multiphase Flow, 1999, vol. 25, s. 395 – 410.

- [13] Kaminaga F., Sumith B., Matsumura K.: Pressure drop in capillary tube in boiling two-phase flow. First International Conference on Microchannels and Minichannels, New York, 2003.
- [14] Shin J. S., Kim M. H.: An experimental study of condensation heat transfer inside a mini-channel with a new measurement technique. Int. Journal of Multiphase Flow, 2004, vol. 30, s. 311 – 325.
- [15] Dutkowski K.: Air-water two-phase frictional pressure drop in minichannels. Heat Transfer Engineering, 2010, vol. 31, s. 321 – 330.
- [16] Dutkowski K.: Two-phase pressure drop of air-water in minichannels, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, vol. 52, s. 5185 – 5192.
- [17] Dutkowski K.: Modyfikacja metody Lockharta-Martinelliego obliczania oporów przepływu adiabatycznego przez minikanaly. Część 1, Chłódnictwo, 2008, nr 7, str. 6 – 11.
- [18] Lee J., Mudawar I.: Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications: Part I—pressure drop characteristics. Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, vol. 48, s. 928 – 940.
- [19] Wongwises S., Pirompak W.: Flow characteristics of pure refrigerants and refrigerant mixtures in adiabatic capillary tubes, Applied Thermal Engineering, 21, 2001, s. 845 – 861.
- [20] Chen I.Y., Yang K.-S., Wang C.-C.: An empirical correlation for two-phase frictional performance in small diameter tubes. Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, vol. 45, s. 3667 – 3671.
- [21] Choi K.-I., Pamitran A. S., Oh C.-Y., Oh J.-T.: Two-phase pressure drop of R-410A in horizontal smooth minichannels. Int. Journal of Refrigeration, 2008, vol. 31, s. 119 – 129.
- [22] Qu W., Mudawar I.: Measurement and prediction of pressure drop in two-phase micro-channel heat sink. Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, vol. 46, s. 2737 – 2753.
- [23] Vassallo P., Keller K.: Two-phase frictional pressure drop multipliers for SUVA R-134a flowing in a rectangular duct. Int. Journal of Multiphase Flow, 2006, vol. 32, s. 466 – 482.
- [24] Abdelal F.F., Hahn G., Ghiaasiaan S.M., Abdel-Khalik S.I., Jeter S.S., Yoda M., Sadowski D.L.: Pressure drop caused by abrupt flow area changes in small channels, Experimental Thermal and Fluid Science, 29, 2005, s. 425 – 434.
- [25] Revellin R., Thome J. R.: Adiabatic two-phase frictional pressure drops in microchannels, Experimental Thermal and Fluid Science, 31, 2007, s. 673 – 685.

*otrzymano / received: 15.02.2010*

*przyjęto do druku / accepted: 12.04.2010*

*artykuł recenzowany*

## INFORMACJE

# Studia Podyplomowe

Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki  
ogłasza nabór na Dwusemestralne Zaoczne Studia Podyplomowe

## Sieci Komputerowe i Systemy Telekomunikacyjne (SKST)

### Cel Studiów

Celem studiów jest przekazanie wiedzy teoretycznej i umiejętności praktycznych w zakresie: budowy bezpiecznych i wydajnych sieci komputerowych, konfiguracji i eksploatacji sieci komputerowych ze szczególnym uwzględnieniem sieci korporacyjnych, diagnostyki i pomiarów w sieciach komputerowych.

Zajęcia prowadzone są na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, w systemie zaocznym w każdą sobotę lub co drugi weekend (opcja do wyboru), przez dwa semestry. Zajęcia prowadzone są przez nauczycieli akademickich ze stopniem co najmniej doktora oraz przez zaproszonych Gości o uznanym dorobku i autorytecie. Studia obejmują 200 godzin dydaktycznych. Rozpoczęcie Studiów nastąpi po skompletowaniu odpowiedniej liczby kandydatów na dany rodzaj studiów.

### Organizator studiów:

Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, tel. 032 237 12 41, fax: 032 237 20 34, e-mail: re2@polsl.pl lub agnieszka.skorkowska@polsl.pl, http://imea.elekt.polsl.pl

### Kierownik studiów:

Prof. dr hab. inż. Lesław TOPÓR-KAMIŃSKI, prof. Pol. Śl.

### Profil uczestnika studiów

Studia przeznaczone są dla pracowników o różnych specjalnościach z wyższym wykształceniem o kierunku elektrycznym, elektronicznym, telekomunikacyjnym lub pokrewnym, zajmujących się bądź potencjalnie zainteresowanych administracją i eksploatacją komputerowych sieci telekomunikacyjnych.