

Małgorzata SIKORAPOLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY
ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin**Pomiary oporów przepływu podczas skraplania w minikanalach rurowych**

Dr inż. Małgorzata SIKORA

Dr inż. Małgorzata Sikora pracuje jako adiunkt w Katedrze Techniki Ciepłej i Chłodnictwa na Politechnice Koszalińskiej. W grudniu 2011 roku obroniła pracę doktorską na temat: „Badanie oporów przepływu podczas skraplania czynników chłodniczych w minikanalach rurowych”. Zajmuje się tematyką związaną z miniaturowymi kompaktowymi wymiennikami ciepła. Interesuje się ponadto zagadnieniami związanymi z klimatyzacją i wentylacją.



e-mail: małgorzata.sikora@tu.koszalin.pl

Streszczenie

Badanie i analiza oporów przepływu podczas skraplania czynników chłodniczych w minikanalach rurowych ma duże znaczenie dla poznania procesu skraplania. W artykule tym przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań, które mają na celu ułatwienie projektowania, konstrukcji i eksploatacji kompaktowych wymienników ciepła. W wyniku analizy rezultatów badań autorka proponuje własną zależność pozwalającą na wyznaczenie średnich i lokalnych oporów przepływu w minikanalach.

Słowa kluczowe: skraplanie, opory przepływu, pomiary, minikanaly, czynnik chłodniczy.

Measures of pressure drops during condensation in tubular minichannels**Abstract**

Nowadays, much attention is paid to miniaturization of devices while increasing their efficiency. The same is with heat exchangers which have to exchange a lot of heat from a small area. By using minichannels and phase transitions, miniaturization of heat exchangers with intensification of heat exchange is possible. Unfortunately, the decrease in internal diameter creates problems associated with an increased flow resistance, which is a negative phenomenon because it causes increases in energy consumption for refrigerant transportation. The understanding of the dependence between the flow resistance and the flow parameters, refrigerant properties as well as internal diameter of a minichannel can improve design, construction and exploitation of compact heat exchangers. It will also enable optimization of the heat transfer coefficient α and flow resistance ($\Delta p/L$) growth. For this purpose, investigations were performed on three different refrigerants: R134a, R404A, R407C in minichannels with an internal diameter of the range $d_w = 0,31 \text{ mm} - 3,3 \text{ mm}$. Miniaturization of compact heat exchangers and use of environmentally friendly CFC substitutes also help to reduce harmful effects on the environment and costs due to the absorptivity of material decrease. Based on the analysis of the investigation results the author has developed own correlation describing change of the pressure drop on the minichannel length, depending on its internal diameter, flow parameters and refrigerant properties.

Keywords: condensation, flow resistance, measures, minichannel, refrigerant.

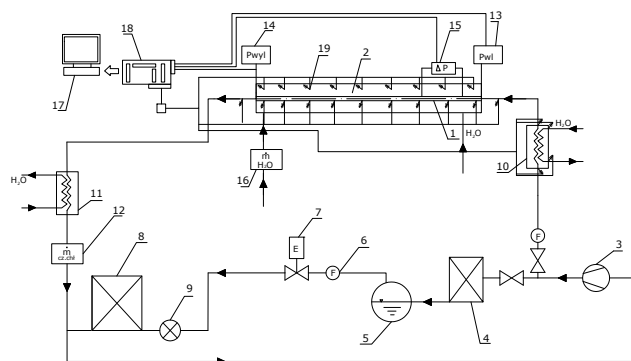
1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach dużą uwagę przykłada się do miniaturyzacji urządzeń, przy jednoczesnym wzroście ich wydajności. Podobnie jest z wymiennikami ciepła, które mają przekazywać stosunkowo duże strumienie ciepła na małych powierzchniach. Poprzez wykorzystanie minikanalów (kanały o średnicy hydraulicznej poniżej 3 mm) oraz przemian fazowych możliwa jest miniaturyzacja wymienników z jednoczesną intensyfikacją wymiany ciepła. Niestety spadek wymiaru niesie za sobą problemy związane ze wzrostem oporu przepływu, co jest zjawiskiem niekorzystnym gdyż zwiększa zużycie energii na transport czynnika. Poznanie zależności oporów przepływu od parametrów przepływu, właściwości czynnika i średnicy minikanalu pozwoli na uspra-

wienie projektowania, konstrukcji i eksploatacji kompaktowych wymienników ciepła. Umożliwia również optymalizację wartości współczynnika przejmowania ciepła α i oporów przepływu na długości kanału ($\Delta p/L$). W tym celu przeprowadzono badania dla 3 różnych czynników chłodniczych: R134a, R404A, R407C w kanałach o średnicy wewnętrznej z zakresu $d_w = 0,31 \text{ mm} - 3,3 \text{ mm}$, zarówno w warunkach lokalnych jak i uśrednionych. Miniaturyzacja kompaktowych wymienników ciepła oraz użycie proekologicznych substytutów freonów pozwalają również na minimalizację szkodliwego wpływu na środowisko naturalne oraz zmniejszenie kosztów ze względu na małą materiałochłonność. Bardzo duże znaczenie przy określeniu wielkości oporów przepływu, jak i współczynnika przejmowania ciepła ma dodatkowo identyfikacja struktur przepływu [1].

2. Stanowisko pomiarowe

Na rys. 1 przedstawiono schemat stanowiska, na którym prowadzone były badania oporów przepływu czynników chłodniczych średnio i wysokociśnieniowych w minikanalach rurowych.



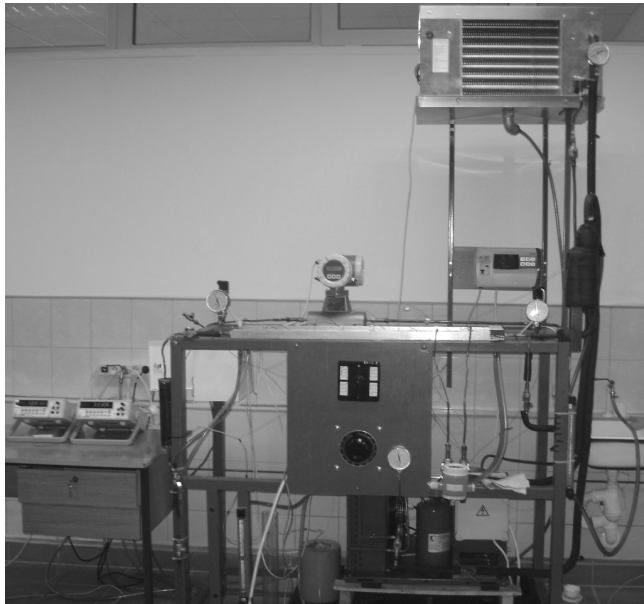
Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska badawczego
Fig. 1. Schematic diagram of the test stand

Proces skraplania czynników chłodniczych: R134a, R404A i R407C odbywał się w przepływie wewnątrz minikanalu rurowego 1. Para przegrzana czynnika, po opuszczeniu króćca tłoczniczego sprężarki tłokowej 3 przepływała przez filtr F, a następnie za pomocą zaworu 7 kierowana była do układu zasilającego odcinek pomiarowy 1. Przed dopływem czynnika chłodniczego do odcinka pomiarowego zainstalowano wymiennik ciepła 10 chłodzony wodą. Mierzony był strumień masy (natężenie przepływu) wody chłodzącej ten wymiennik, jej temperatura oraz temperatura czynnika w przekroju wlotowym i wylotowym z wymiennika. Intensywność chłodzenia czynnika miała wpływ na parametry czynnika (przede wszystkim stopień suchości) w przekroju wlotowym do odcinka pomiarowego. Ciśnienie czynnika chłodniczego na dopływie do odcinka pomiarowego mierzone było piezorezystancyjnym czujnikiem 13 z przetwornikiem typu PMP 131-A1401A1W produkcji firmy Endress + Hauser o zakresie pomiarowym $0 \div 40 \text{ MPa}$ wykonanym w klasie 0,5. Na wyjściu z przetwornika ciśnienia uzyskiwany był sygnał napięciowy doprowadzany do układu akwizycji danych. W przekroju wypływowym odcinka pomiarowego zainstalowano czujnik ciśnienia 14 tego samego typu. Ponadto mierzony był spadek ciśnienia czynnika chłodniczego w minikanale rurowym za pomocą czujnika różnicy ciśnienia 15, z przetwornikiem typu Deltabar SPMP o zakresie pomiarowym $0 \div 1,5 \text{ MPa}$ oraz klasie 0,075. Czynnik chłodniczy opuszczający odcinek pomiarowy mógł być dochłodzony w wymienniku ciepła 11, chłodzonym wodą. Strumień masy czynnika mierzono za pomocą przepływomierza 12 typu

Coriolis 34XIP67 wykonanego w klasie 0,52. Po opuszczeniu odcinka pomiarowego czynnik doprowadzono do instalacji chłodnicy 8.

Podstawowym elementem układu pomiarowego był odcinek minikanalu rurowego o średnicy wewnętrznej $d_w < 3$ mm i całkowitej długości 950 mm (na długości 10 mm mierzony był spadek ciśnienia czynnika chłodniczego za pomocą miernika różnicy ciśnień 15). Odcinek minikanalu rurowego umieszczono w kanale wodnym 2, zbudowanym z kształtownika aluminiowego o przekroju prostokątnym i wymiarach 28x24 mm. Temperaturę powierzchni zewnętrznej ścianki minikanalu na jego długości mierzono za pomocą 9 czujników termoelektrycznych 19 typu K (o średnicy termoelektrody 0,1 mm) zainstalowanych w równych odległościach, co 100 mm. W tych samych przekrojach rozmieszczono czujniki termoelektryczne typu K do pomiaru temperatury wody przepływającej w kanale wodnym. Spoiny tych czujników umieszczono w jego osi pionowej w odległości 19 mm od dna kanału wodnego. Termoelektrody czujników temperatury wyprowadzono do złączek i dalej do systemu akwizycji danych 18. Wszystkie czujniki termoelektryczne, przed ich zainstalowaniem na stanowisku, wywzorcowano termometrem szklanym o niepewności granicznej 0,1 K. Sporządzono indywidualne charakterystyki termoelektryczne wszystkich czujników termoelektrycznych, które wprowadzono do komputerowego programu akwizycji danych. Strumień masy wody chłodzącej mierzony jest za pomocą elektronicznego przepływomierza 16 o klasie 0,52. Podczas badań wstępnych stosowano do pomiaru ciśnienia również manometry sprężynowe w klasie 0,2. Badano zarówno średnie, jak i lokalne opory przepływu.

Na rys. 2 przedstawiono widok ogólny stanowiska badawczego.



Rys. 2. Widok ogólny stanowiska badawczego
Fig. 2. Overview of the test stand

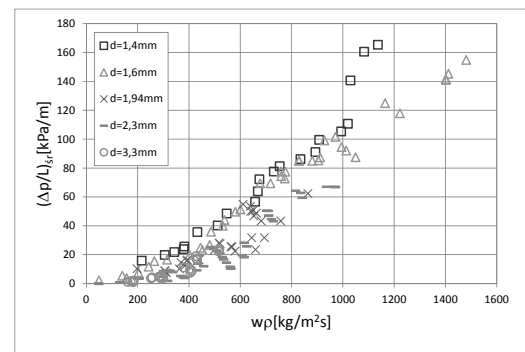
3. Wyniki badań i ich analiza

Badania eksperymentalne oporów przepływu wykonano podczas skraplania czynników chłodniczych R134a, R404A i R407C w minikanalach rurowych. W badaniach zastosowano minikanaly rurowe o średnicy wewnętrznej $d_w = 0,31; 0,45; 0,64; 0,98; 1,4; 1,6; 1,94; 2,3; 3,3$ mm dla czynników chłodniczych R134a i R404A, oraz $d_w = 0,31; 0,98; 1,6; 2,3$ mm dla czynnika chłodniczego R407C. Podczas eksperymentu mierzono zarówno średnie jak i lokalne opory przepływu. Charakterystyki oporów przepływu ujmują wpływ najważniejszych parametrów procesu, a w tym: gęstości powierzchniowej strumienia masy (gęstości strumienia masy) ($w\rho$), stopnia suchości x , średnicy wewnętrznej kanału d_w

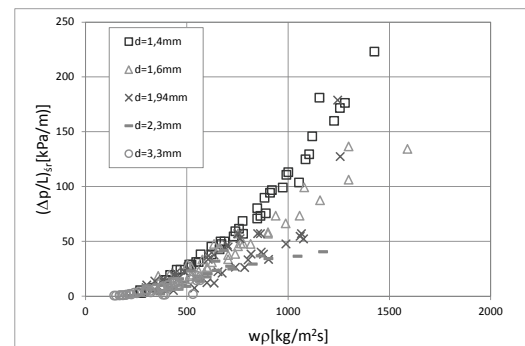
oraz rodzaju czynnika. Dokonano dodatkowo porównania wyników badań eksperymentalnych z wynikami obliczeń wg zależności wyprowadzonych przez innych autorów.

Na rys. 3 przedstawiono zależność średnich oporów przepływu $(\Delta p/L)_s$ od gęstości strumienia masy ($w\rho$) dla skraplania czynników chłodniczych R134a, R404A i R407C w kanałach o średnicy $d_w > 1$ mm. Można zauważyć, że wzrostowi gęstości strumienia masy ($w\rho$) towarzyszy wzrost średnich oporów przepływu. Wykres tej zależności jest zbliżony do krzywej parabolicznej, co jest zgodne z prawami hydromechaniki. Wartość oporów przepływu zależy także od rodzaju skraplanego czynnika. Najwyższe opory przepływu, przy $(w\rho) = \text{const}$ powoduje skraplanie czynnika średniociśnieniowego R134a. Stosunkowo niższą wartość oporów przepływu otrzymano dla czynników wysokociśnieniowych R404A i R407C.

a)



b)



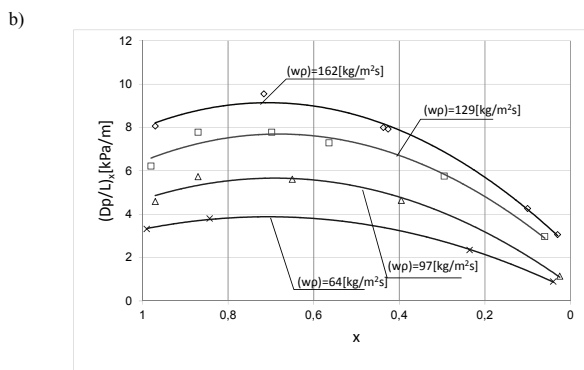
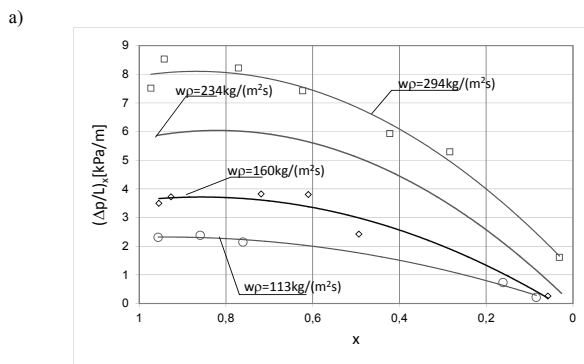
Rys. 3. Zestawienie zbiorcze wyników badań eksperymentalnych średnich wartości oporów przepływu $(\Delta p/L)_s = f(w\rho)$ dla średnic kanałów $d_w = 1,4 \div 3,3$ mm, dla czynników: a) R134a, b) R404A

Fig. 3. A summary of experimental investigations results of the mean values of flow resistance $(\Delta p/L)_s = f(w\rho)$ for the internal diameter $d_w = 1,4 \div 3,3$ mm, for refrigerants: a) R134a, b) R404A

Dla wszystkich badanych minikanalów wykonane zostały również charakterystyki opisujące lokalną wartość oporów przepływu $(\Delta p/L)_x$ od stopnia suchości x , dla stałych poziomów gęstości strumienia masy $(w\rho) = \text{const}$. Z charakterystyk przedstawionych na rys. 4 wynika, że spadek stopnia suchości w zakresie $x = 1 \div 0,7$ powoduje wzrost wartości lokalnych oporów przepływu. Dla stopnia suchości poniżej $x = 0,7$ spadek wartości oporów przepływu jest znaczny, następuje bowiem spadek stopnia zapełnienia ϕ związany z rozpoczęciem się procesu skraplania właściwego. Ponadto zauważyć można, że wraz ze wzrostem gęstości strumienia masy ($w\rho$) rosną opory przepływu. Na rys. 3 widoczny jest również wpływ średnicy wewnętrznej kanału na opory przepływu, tzn. im mniejsza średnica tym wyższe opory przepływu w tych samych warunkach procesu skraplania.

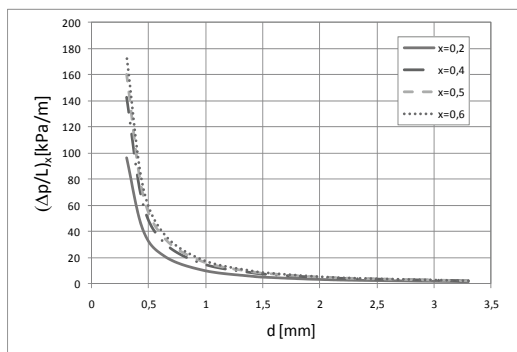
Charakterystyka przedstawiona na rys. 5 przedstawia zależność oporów przepływu od średnicy wewnętrznej minikanalu. Zaobserwować można, że wzrost oporów przepływu następuje wraz ze spadkiem wymiaru średnicy wewnętrznej minikanalu rurowego, a dla kanałów o średnicy poniżej 1 mm opory przepływu rosną

bardzo gwałtownie. Jest to spowodowane rosnącym wpływem napięcia powierzchniowego.



Rys. 4. Zestawienie zbiorcze wyników badań eksperymentalnych lokalnych wartości oporów przepływu $(\Delta p/L)_x = f(x)$ dla średnic kanałów $d_w = 2,3$ mm, dla czynników: a) R407C, b) R134a

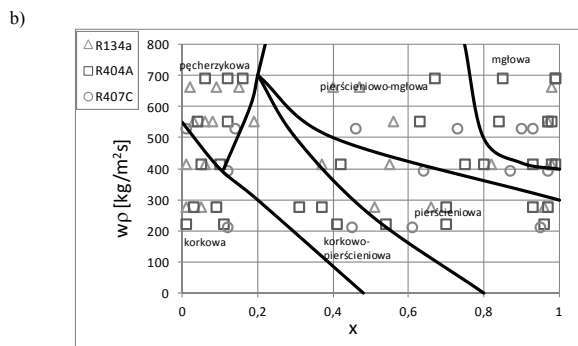
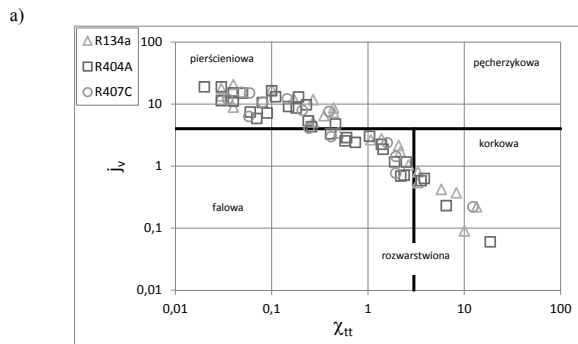
Fig. 4. A summary of experimental investigations results of the local values of flow resistance $(\Delta p/L)_x = f(x)$ for the internal diameter $d_w = 2,3$ mm, for refrigerants: a) R407C, b) R134a



Rys. 5. Zależność oporów przepływu od wymiaru średnicy wewnętrznej minikanalu $(\Delta p/L) = f(d)$, przy $w\rho = 300$ kg/(m²s) i $x = \text{const}$, podczas skraplania czynnika chłodniczego R404A

Fig. 5. Dependence of the flow resistance of minichannel internal diameter $(\Delta p/L) = f(d)$ for $w\rho = 300$ kg/(m²s) and $x = \text{const}$ during condensation of R404A refrigerant

Analiza wyników badań dotyczyła również określenia rodzaju struktur przepływu występujących podczas skraplania czynników chłodniczych w minikanalach. Do analizy wykorzystano wartości obliczeniowe pozornej prędkości gazu w_p , parametru Lockharta - Martinello χ_{tt} , stopień suchości x oraz gęstość strumienia masy ($w\rho$). Biorąc pod uwagę wyniki badań eksperymentalnych skraplania czynników chłodniczych R134a, R404A i R407C podjęto próbę graficznej identyfikacji struktur przepływu podczas tej przemiany fazowej. Do identyfikacji struktur przepływu wykorzystano mapę przepływu zaproponowaną przez Cavallini'ego (2002) [3] oraz Collemana i Garimellę (2002, 2003) [4]. Klasyfikacja ta polega na przyporządkowaniu wartości wyżej wymienionych parametrów zakresowi występowania poszczególnych struktur przepływu.



Rys. 6. Mapa struktur przepływu z naniesionymi wynikami badań własnych: a) mapa wg Cavallini'ego et al. (2002); b) mapa wg Collemana i Garimelli (2002, 2003) [1, 2, 3, 4, 5, 7]

Fig. 6. Map of the flow regimes with marked results of own research: a) map made by Cavallini et al. (2002); b) map made by Collemana i Garimelli (2002, 2003) [1, 2, 3, 4, 5, 7]

Na rys. 6 przedstawiono identyfikację struktur przepływu dwufazowego podczas skraplania czynników chłodniczych R134a, R404A i R407C w minikanale rurowym o średnicy wewnętrznej $d_w = 1,6$ mm. Na podstawie rys. 6 można stwierdzić, że w zakresie prowadzonych badań, w dużej części występowały głównie struktury rozdzielone (pierścieniowa, pierścieniowo mgłowa czy falowa) oraz struktura mgłowa, rzadziej struktura korkowa czy pęczerykowa. Niestety, istniejące mapy przepływu znacząco od siebie odbiegają i są za mało uogólnione, aby jednoznacznie określić i zidentyfikować występujące podczas przepływu struktury przepływu. Przedstawione wyżej mapy zalecane są dla czynnika R134a; dla pozostałych, powszechnie stosowanych czynników chłodniczych (R404A, R407C czy R410A), nie zostały opublikowane dotychczas żadne mapy przepływu. Tak więc bardzo duże znaczenie ma przeprowadzenie wizualizacji przepływu i identyfikacji poszczególnych struktur.

W literaturze brak jest aktualnie, uogólnionych zależności do obliczenia oporów przepływu podczas skraplania czynników chłodniczych w minikanalach, które miałyby odpowiednie podstawy teoretyczne i byłyby sprawdzone dla wielu czynników. Jest to powodem zaistnienia potrzeby wyprowadzenia nowej, bardziej uogólnionej zależności służącej do opisu oporów przepływu podczas skraplania czynników chłodniczych w minikanalach rurowych, która miałaby zastosowanie przy projektowaniu miniwymenników ciepła na skalę przemysłową. Dlatego stosując zasady analizy wymiarowej w odniesieniu do wyników badań eksperymentalnych własnych określono postać równania korelacyjnego. W celu znalezienia współczynników (w tym wykładników potęg) zastosowano model regresji nieliniowej z metodą największej wiarygodności, zaś dobór parametrów modelu wykonano metodami *quasi-Newtona* i *Symplex*, które są standardowymi w pakiecie *Statistica* [1]. Otrzymano korelację eksperymentalną do obliczenia lokalnych oporów przepływu w postaci:

$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{TPF} = \left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{lo} \cdot \Phi_{lo}^2, \quad (1)$$

gdzie:

$$\Phi_{lo}^2 = \left[0,003 \cdot p_r^{-4,722} \cdot E^{-0,992} + \left(\frac{F^{0,671} \cdot H^{-0,019}}{We^{0,308}} \right) \right] \quad (2)$$

$$E = (1-x)^2 + x^2 \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right) \cdot \left(\frac{f_{go}}{f_{lo}} \right), \quad (3)$$

$$F = x^{0,98} \cdot (1-x)^{0,24}, \quad (4)$$

$$H = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,91} \cdot \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0,19} \cdot \left(1 - \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0,7}, \quad (5)$$

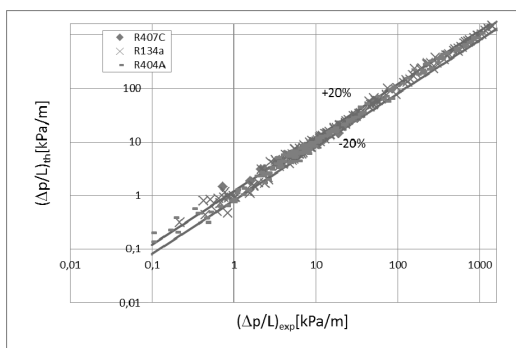
$$We = \frac{(w\rho)^2 \cdot d_w}{\sigma \cdot \rho_g}, \quad (6)$$

f_{lo} i f_{vo} to współczynnik tarcia Fanninga dla przepływu jednofazowego odpowiednio cieczy i gazu. Współczynnik tarcia oblicza się z zależności Baroczy'ego [6] w postaci:

$$f_x = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{Re_x} \right)^{12} + \left\{ \left[2,457 \cdot \ln \left(\frac{Re_x}{7} \right) \right]^{16} + \left(\frac{37530}{Re_x} \right)^{16} \right\}^{-1,5} \right]^{1/12}, \quad (7)$$

gdzie indeks $x = lo$ lub vo . W równaniach (2-7) symbole: We – liczba Webera, Re – liczba Reynoldsa, x – stopień suchości, ρ – gęstość [kg/m^3], μ – lepkość dynamiczna [$Pa \cdot s$], σ – napięcie powierzchniowe [$N \cdot m$], natomiast indeksy: l – ciecz, g – gaz.

W zależności (2) występuje ciśnienie zredukowane p_r opisane stosunkiem ciśnienia nasycenia do wartości krytycznej ciśnienia $p_r = p_s / p_k$. Wprowadzenie tej wielkości umożliwia rozszerzenie stosowalności zależności (2) dla czynników średnio – i wysokociśnieniowych. Powoduje to rozszerzenie zakresu stosowalności korelacji i znaczne jej uogólnienie. W zależności tej uwzględniono również napięcie powierzchniowe mające duży wpływ na opory przepływu w minikanalach rurowych, a w szczególności tych, o średnicy poniżej 1 mm, w przeciwieństwie do kanałów konwencjonalnych. Prosta forma równania (2) pozwala na użycie korelacji własnej w projektowaniu kompaktowych wymienników ciepła. Na rys. 7 przedstawiono porównanie wyników badań eksperymentalnych oporów przepływu z wynikami obliczeń wg zależności własnej (1,2). Jak widać, 80% wyników pomiarów mieści się w przedziale $\pm 20\%$. Jest to wystarczająca dokładność jak dla przepływu dwufazowego.



Rys. 7. Porównanie wyników eksperymentalnych badania oporów przepływu podczas skraplania czynników chłodniczych R134a, R404A i R407C w minikanalach rurowych z wynikami obliczeń wg zależności własnej

Fig. 7. Comparison of experimental investigation results during condensation of R134a, R404A and R407C refrigerants in pipe minichannels with calculation results by own correlation

4. Wnioski

Do badań wytypowano trzy czynniki chłodnicze: R134a, R404A i R407C. Pierwszy z nich jest proekologicznym substytutem wycofanego freonu R12, zaś czynniki R404A i R407C są proponowanymi zamiennikami freonu R22.

Badania eksperymentalne przeprowadzono podczas skraplania wymienionych czynników w minikanalach rurowych zbudowanych ze stali nierdzewnej o wymiarze średnicy wewnętrznej $d_w = 0,31; 0,45; 0,64; 0,98; 1,4; 1,6; 1,94; 2,3$ i $3,3$ mm,

Na podstawie badań eksperymentalnych stwierdzono, że opory przepływu zależą przede wszystkim od gęstości strumienia masy ($w\rho$), średnicy wewnętrznej minikanalu d_w , stopnia suchości x oraz napięcia powierzchniowego σ . Wymiernym odzwierciedleniem tego wpływu jest opracowana korelacja (2).

Badania eksperymentalne potwierdziły, że zmniejszenie wymiaru średnicy minikanalu prowadzi do znacznego wzrostu oporów przepływu podczas skraplania. Stwierdzono, że zmniejszenie średnicy w zakresie $d_w < 1$ mm powoduje znaczącą zmianę charakterystyk przepływowych i znaczący wzrost wpływu napięcia powierzchniowego. Te okoliczności wpływają na to, że stosowanie procedur obliczeniowych opracowanych i sprawdzonych dla kanałów konwencjonalnych nie może być bezkrytycznie przeniesione dla minikanalów, zwłaszcza gdy ich średnica wewnętrzna jest mniejsza od 1 mm. Ponadto wzrost gęstości strumienia masy również powoduje wzrost oporów przepływu.

Podczas procesu skraplania znaczący wpływ odgrywają struktury przepływu. Jedne z nich są bardziej korzystne jeżeli chodzi o wymianę ciepła i opory przepływu, inne natomiast mniej. Dlatego poznanie tych struktur, umiejętność ich identyfikacji i zaproponowanie odpowiednich map przepływu ma duże znaczenie dla procesu projektowania i eksploatacji kompaktowych wymienników ciepła. Wyniki powyższych badań oraz tych prowadzonych w dalszym ciągu umożliwią dobór geometrii kanałów, czynnika chłodniczego oraz parametrów przepływu tak, aby zmaksymalizować wymianę ciepła i zminimalizować energochłonność układu.

Podziękowania za pomoc przy opracowaniu artykułu dla prof. dr hab. inż. Tadeusza Bohdala i dr inż. Henryka Charuna.

Praca została wykonana w ramach grantu NCN nr N N512 456740.

5. Literatura

- [1] Bohdal T., Charun H., Sikora M.: Porównawcze badania eksperymentalne skraplania czynników chłodniczych R134a i R404A w minikanalach rurowych. International Journal of Mass and Heat Transfer vol. , pp. 1963–1974, 2011.
- [2] Cavallini A., Del Col D., Doretti L., Matkovic M. Rossetto L., Zilio C.: Condensation heat transfer and pressure gradient inside multipoint minichannels. Heat Transfer Eng., vol. 26, No. 3, pp. 45 – 55. 2005.
- [3] Chen Y.I., Yang K., Wang CH.: An empirical correlation for two – phase frictional performance in small diameter tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 45, pp. 3667 – 3671, 2002.
- [4] Coleman J.W., Garimella S.: Two – phase flow regimes in round, square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a. Int. Journal Refrigeration, vol. 26, No. 1, pp. 117 – 128, 2003.
- [5] Garimella S.: Condensation flow mechanisms in microchannels: basis for pressure drop and heat transfer models. Heat Trans. Eng., vol. 25, No. 3, pp. 104 – 116, 2004.
- [6] Shah R.K.: Classification of heat exchangers In heat exchangers: Thermal Hydraulic Fundamentals and Design (Edited by S. Kakac, A.E. Bergles and F. Mayinger, Hemisphere Publishing Corp., Washington, D.C., s. 9 – 46, 1986.
- [7] White Stewart S.: Enhanced fined – tube condenser design and optimization. PHD work, Georgia Institute of Technology, 2003.

otrzymano / received: 01.03.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.05.2012

artykuł recenzowany / revised paper