

**Małgorzata SIKORA**

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I CHŁODNICTWA

**Pomiar parametrów geometrycznych i przepływowych struktur przepływu dwufazowego w minikanalach**

Dr inż. Małgorzata SIKORA

Dr inż. Małgorzata Sikora pracuje jako adiunkt w Zakładzie Mechaniki Płynów 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: [malgorzata.sikora@tu.koszalin.pl](mailto:malgorzata.sikora@tu.koszalin.pl)**Streszczenie**

Przeprowadzono badania eksperymentalne skraplania czynnika chłodniczego HFE7100 w minikanale rurowym o średnicy wewnętrznej  $d = 2$  mm. Podczas badań wykonano wizualizację występujących podczas procesu skraplania struktur przepływu. Dokonano pomiaru parametrów geometrycznych i przepływowych w celu identyfikacji struktur przepływu dwufazowego skraplania w minikanale. Przeprowadzono identyfikację zakresu występowania poszczególnych struktur przepływu podczas skraplania niskociśnieniowego czynnika chłodniczego HFE7100. Badania wykonano w całym zakresie procesu skraplania ( $x = 0 - 1$ ).

**Słowa kluczowe:** skraplanie, struktury przepływu dwufazowego, minikanaly, czynnik chłodniczy HFE – 7100.

**Measurements of geometrical and flow parameters of two-phase flow structures in minichannels****Abstract**

Identification of flow patterns can be made by two methods. The first one is a calculation method consisting in calculating flow parameters and comparing their values with the ranges given by other authors or flow maps. This method has a number of limitations associated with a small amount of existing flow patterns maps, and many restrictions on their use. The second method visualizes the flow and identifies it from photos. This method is more accurate. This paper presents a methodology and results of experimental identification of the two-phase flow structure by measurement of flow and geometrical parameters. The test stand was designed and built. An optical measurement system was used for recording, processing and image analysis. Preliminary measurements were made for a two-phase flow mixture of HFE – 7100 refrigerant. The results of visualization and measurement of parameters are shown in the figures presented in the paper.

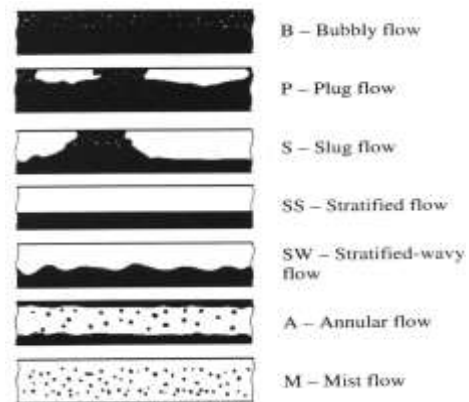
**Keywords:** condensation, flow patterns, two-phase flow structures, minichannel, HFE-7100 refrigerant.

**1. Wstęp**

Według Gibbsa faza jest to jednorodna część układu wykazująca w stanie równowagi stałe wartości parametrów termodynamicznych. Sąsiadujące fazy oddziela od siebie powierzchnia międzyfazowa. W momencie pokonania granicy faz w sposób skokowy zmieniają się wartości parametrów czynnika. Najczęściej spotykanymi układami wielofazowymi są układy dwufazowe typu ciecz – gaz lub ciecz – ciało stałe. Rozpatrując mieszaniny dwufazowe typu ciecz – gaz można wyróżnić mieszaniny dwufazowe adiabatyczne i nieadiabatyczne (z wymianą ciepła). Jeżeli przemiana fazowa ma miejsce podczas przepływu w kanale następuje deformacja powierzchni międzyfazowej. Podczas przepływu dwufazowego występują oddziaływania między ścianką kanału i mieszaniną dwufazową oraz oddziaływania na powierzchni

rozdziłu faz. Oddziaływania te mają wpływ na zmianę takich parametrów jak temperatura, ciśnienie, prędkość, stopień suchości, stopień zapelnienia itp. Deformacje powierzchni międzyfazowej oraz zmiana parametrów przepływu dwufazowego powodują powstawanie różnorodnych struktur przepływu. Od pewnego czasu na świecie trwają badania dotyczące powstawania, występowania i klasyfikacji struktur przepływu dwufazowego. Jeżeli chodzi o adiabatyczne przepływy dwufazowe to problem powstawania różnych struktur przepływu został znacznie lepiej rozpoznany zarówno w kanałach konwencjonalnych jak i w minikanalach. Badania były najczęściej prowadzone dla mieszaniny wody i powietrza. Wynikami badań struktur przepływu dwufazowego są zwykle mapy struktur przepływu

W pracy Troniewski i Ulbrich [1] przedstawiono podział struktur przepływu dwufazowego mieszaniny typu woda - powietrze. Podział ten powstał na podstawie analizy wyników badań własnych oraz innych autorów. Na rys. 1 przedstawiono graficzną klasyfikację struktur przepływu dwufazowego autorstwa Troniewski i Ulbrich [1]. Klasyfikacja została wykonana dla przepływu dwufazowego w kanałach o średnicy  $d_h = 6 \div 14$  mm i przy parametrach czynnika:  $\rho_v = 0,6 \div 56 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_l = 690 \div 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_l = 0,1 \div 76 \text{ cP}$ ,  $\mu_v = 10-2 \text{ cP}$ ,  $\sigma = 0,024 \div 0,098 \text{ N/m}$ .



Rys. 1. Klasyfikacja struktur przepływu dwufazowego w kanale konwencjonalnym wg Troniewski i Ulbrich [1]: B – struktura pęcherzykowa, P – korkowa typu Plug, S – korkowa typu Slug, SS – rozwarstwiona, SW – rozwarstwiono-falowa, A – pierścieniowa, M – mgłowa;

Fig. 1. Classification of two – phase flow structures in a conventional channel by Troniewski and Ulbrich [1]

Podobne badania wizualizacyjne przepływu dwufazowego w kanale poziomym o średnicy 19 mm podczas przepływu adiabatycznego mieszaniny wody i powietrza przeprowadził Ewing et al. [2]. Autorzy porównali wyniki badań z jedną z pierwszych map przepływu autorstwa Brebera [3] stwierdzając, że istnieją istotne odchylenia w zakresie występowania struktury falowej (wavy flow) i struktury rozwarstwionej (stratified flow). Ewing [2] w wyniku badań wizualizacyjnych zaproponował podział struktur przepływu na 10 rodzajów struktur przepływu, tzn.: pierścieniową, przejściową pierścieniowo-falową, falową, rozwarstwowaną, przejściową rozwarstwowaną – korkową, korkową typu slug, korkową typu plug, przejściową korkowo – pęcherzykową, pęcherzykową oraz przejściową pierścieniowo – pęcherzykową.

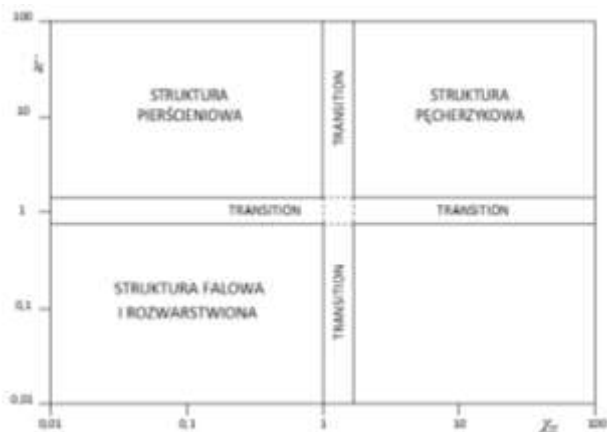
Na podstawie badań wizualizacyjnych oraz przepływowych powstają najczęściej tzw. mapy struktur przepływu dwufazowego. Na mapach struktur przepływu podaje się zakres występowania struktur przepływu w zależności od takich wielkości jak: parametru Martinellego  $\chi_{ti}$ :

$$\chi_w = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0.1}, \quad (1)$$

gdzie:  $x$  – stopień suchości,  $\rho_l$  – gęstość fazy ciekłej,  $\rho_v$  – gęstość fazy gazowej,  $\mu_l$  – lepkość fazy ciekłej,  $\mu_v$  – lepkość fazy gazowej; pozorna prędkość fazy gazowej  $j_v$ :

$$j_v = \frac{G \cdot x}{\sqrt{g \cdot d_w \cdot \rho_v \cdot (\rho_l - \rho_v)}}, \quad (2)$$

gdzie:  $G$  – gęstość strumienia masy [kg/m<sup>2</sup>s],  $d_w$  – średnica wewnętrzna kanału. Zakres występowania struktur przepływu może być również określony za pomocą stopień suchości  $x$  oraz gęstość strumienia masy  $G$ . Na rys. 3 przedstawiono przykładową mapę struktur przepływu autorstwa Brebera.



Rys. 3. Mapa struktur dwufazowego przepływu adiabatycznego wg Brebera. [3]  
Fig. 3. Map of adiabatic two-phase flow structures by Breber [3]

Podobne badania dla mieszaniny czynnika chłodniczego R134a i oleju w kanale o średnicy  $d = 7,8$  mm, przeprowadzili Wongwises et. al. [4].

Badania struktur przepływu podczas przemian fazowych czynników chłodniczych są zagadnieniem znacznie bardziej skomplikowanym. Wyniki takich badań dla przepływu w kanałach konwencjonalnych opublikowali Dobson i Chato [5], dotyczyły one przepływu dwufazowego następujących czynników chłodniczych: R12, R22, R32/R125 oraz R134a w poziomych kanałach o średnicy hydraulicznej  $d_h = 3,14 \div 7,04$  mm. W wyniku tych badań struktury przepływu dwufazowego nieadiabatycznego w kanałach konwencjonalnych wyróżniono struktury: rozwarstwowaną (stratified), falową (wavy), pierścieniowo – falową (wavy-annular), pierścieniową (annular) i pierścieniowo – mgłową (annular-mist), przy niskich wartościach stopnia zapelnienia  $\phi$ :

$$\phi_{ob} = \frac{V_v}{V_v + V_l}, \quad (3)$$

Gdzie:  $V_v$  – objętość fazy gazowej,  $V_l$  – objętość fazy ciekłej. Przy wyższych wartościach stopnia zapelnienia  $\phi$  zaobserwowano natomiast następujące struktury: korkowe (typu slug i plug) oraz pęcherzykową (bubbly flow).

Najczęściej przeprowadzano badania identyfikacji struktur przepływu dwufazowego z przemianą faz dla czynnika chłodniczego R134a, zarówno w kanałach konwencjonalnych jak i w minikanalach. Zaznaczyć należy, że procesy przemian fazowych oraz struktury przepływu w kanałach konwencjonalnych i w mini kanałach mogą się znacznie od siebie różnić. Colemann i Garimella [6, 7] przedstawili wyniki badań struktur przepływu dwufazowego podczas skraplania czynnika chłodniczego R134a w kanale o przekroju kwadratowym i prostokątnym w zakresie średnicy hydraulicznej  $d_h = 1 \div 5$  mm oraz gęstości strumienia

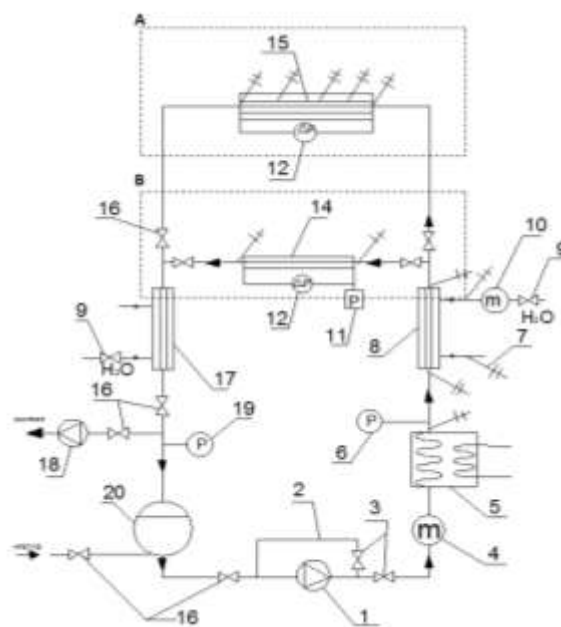
masy  $G = 150 \div 750$  kg/m<sup>2</sup>s. Na podstawie analizy obrazu sklasyfikowali oni cztery podstawowe zakresy przepływów tzn.:

- pierścieniowy (annular flow),
- falowy (wavy flow),
- przerywany, nieciągły (intermittent flow),
- rozproszony (dispersed flow).

W klasyfikacji struktur przepływu dwufazowego, oprócz wartości parametrów przepływowych oraz cieplnych, duże znaczenie mają parametry geometryczne powstających struktur. Szczególnie duże znaczenie ma to w przypadku przepływów dwufazowych w minikanalach, gdzie wymiary struktur są znacznie ograniczone wielkością średnicy hydraulicznej kanału.

## 2. Stanowisko pomiarowe

Pomiary parametrów geometrycznych i przepływowych struktur przepływu dwufazowego w minikanalach rurowych wykonano na stanowisku przedstawionym na rys. 4. Badania przeprowadzono w zakresie skraplania niskociśnieniowego czynnika chłodniczego HFE 7100.



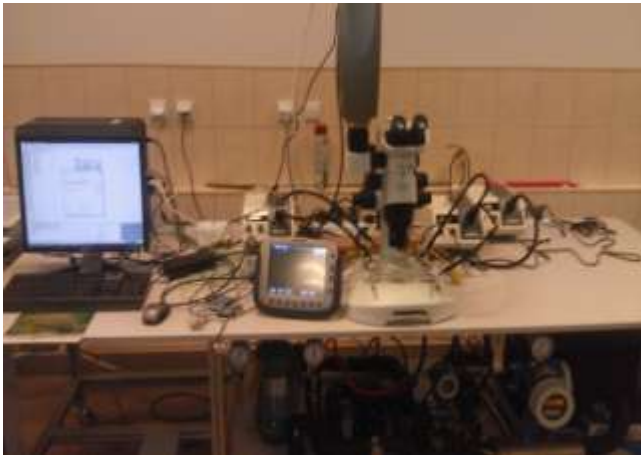
Rys. 4. Schemat stanowiska do badań cieplno-przepływowych i wizualizacyjnych przepływu dwufazowego: A – sekcja do badań cieplno-przepływowych skraplania, B – sekcja do badań wizualizacyjnych struktur przepływu dwufazowego; 1 – pompa ceramiczna, 2 – obejście do regulacji natężenia przepływu, 3 – zawór, 4 – przepływomierz czynnika chłodniczego, 5 – parownik, 6 – manometr, 7 – czujnik temperatury typu K, 8 – wstępny wymiennik typu „rura w rurze”, 9 – zawór, 10 – przepływomierz wody chłodzącej, 11 – czujnik ciśnienia, 12 – czujnik różnicy ciśnienia, 14 – poziomy odcinek sekcji wizualizacyjnej, 15 – poziomy odcinek sekcji cieplno-przepływowej, 16 – zawór, 17 – wymiennik ciepła (dochładzacz), 18 – pompa próżniowa, 19 – manowakumetr, 20 – zbiornik cieczy czynnika HFE-7100

Fig. 4. Schematic diagram of the stand for thermal, flow and visualization tests of adiabatic flow: A - section for thermal and flow condensation tests, B - section to study two-phase flow visualization structures; 1 - ceramic pump, 2 - bypass for the flow control, 3 - valve 4 - refrigerant flow meter, 5 - evaporator, 6 - manometer, 7 - K-type thermocouples, 8 - pre-heater "pipe in pipe" type, 9 - valve, 10 - cooling water flow meter, 11 - pressure sensor, 12 - differential pressure sensor, 14 - horizontal section of visualization, 15 - horizontal section of a heat and flow tests, 16 - valve, 17 - heat exchanger, 18 - vacuum pump, 19 - vacuum meter, 20 - tank of refrigerant HFE-7100liquid

Sekcja typu B z oprzyrządowaniem pomiarowo – rejestrującym umożliwiła wizualizację struktur przepływu dwufazowego skraplania czynnika HFE-7100 w minikanale szklanym o średnicy wewnętrznej  $d = 2$  mm. Oprzyrządowanie pomiarowe sekcji B pozwala na obserwację obrazów struktur przepływu pod mikro-

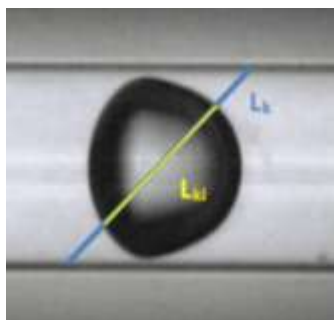
skopem i ich rejestrację za pomocą kamery poklatkowej i-SPEED Suite.

Na rys. 5 przedstawiono widok ogólny stanowiska badawczego.



Rys. 5. Widok ogólny stanowiska badawczego  
Fig. 5. General view of the test stand

Na stanowisku pomiarowym wykonywano zdjęcia struktur przepływu oraz pomiary parametrów ciepło - przepływowych. Zdjęcia poddawane były analizie obrazu w programie komputerowym i-SPEED Suite, gdzie dokonywano pomiarów parametrów geometrycznych badanych struktur. Na podstawie pomiarów parametrów geometrycznych wyznaczano stopień zapełnienia kanału metodą liniową Cavalieriego – Hacqueta wg której udział objętościowy zajęty przez fazę rozproszoną w jednostce objętości mieszaniny dwufazowej równy jest udziałowi powierzchniowemu tej fazy na obrazie dwuwymiarowym oraz udziałowi długości jednostkowego odcinka przypadającego na płaskie przekroje obiektów fazy rozproszonej [8]. Na rys. 6 przedstawiono graficzny opis tej metody, gdzie  $L_k$  jest całkowitą długością wyznaczonego odcinka zaś  $L_{ki}$  długością tego odcinka przechodzącą przez badane struktury.

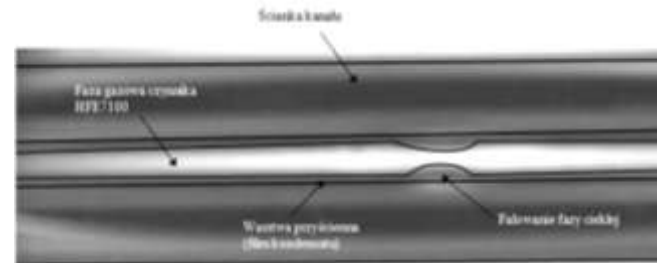


Rys. 6. Ilustracja metody liniowej wyznaczania stopnia zapełnienia kanału  
Fig. 6. Illustration of the linear method for determining the void fraction

### 3. Wyniki badań eksperymentalnych

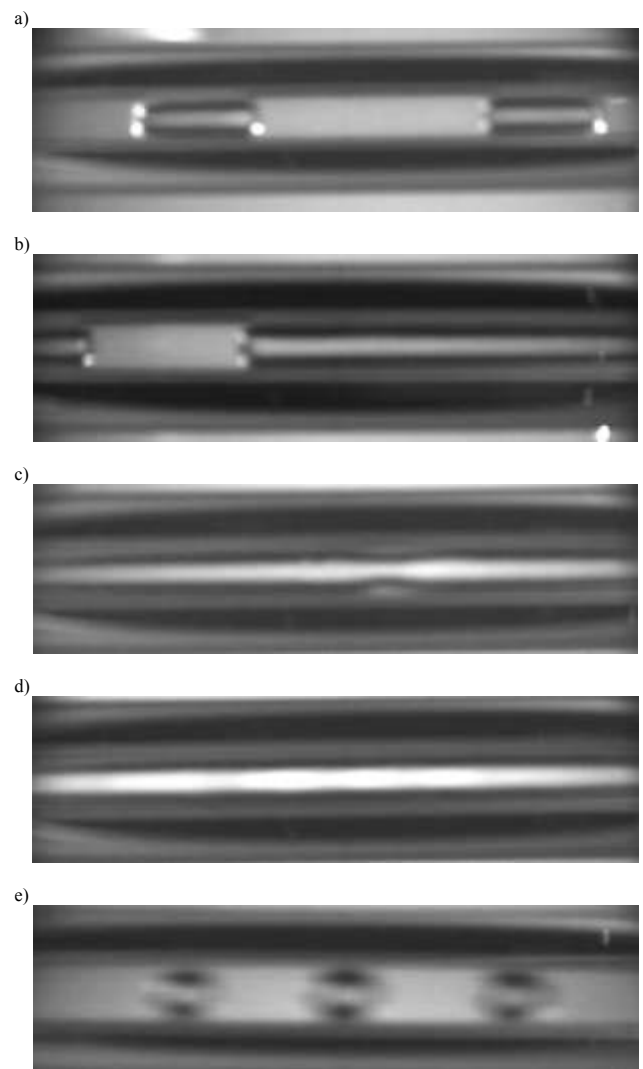
Przeprowadzono własne badania wizualizacyjne struktur przepływu dwufazowego podczas skraplania czynnika chłodniczego HFE – 7100 w minikanale rurowym o średnicy wewnętrznej 2 mm. Wyniki badań w postaci zdjęć poddano analizie w celu określenia zakresu parametrów ciepło – przepływowych występowania poszczególnych struktur przepływu dwufazowego. Analizy dokonano częściowo na podstawie oceny parametrów geometrycznych struktury przepływu. Na rys. 7 przedstawiono podział obrazu na podstawowe elementy badanego przepływu tj. fazę ciekłą, gazową i ścianki rurki co pozwala na analizę dalszych wyników badań. Na rys. 8 przedstawiono zaobserwowane struktury przepływu podczas badań eksperymentalnych (widoki z góry),

natomiast na rys. 9 przedstawiono widok struktury pierścieniowo – falowej z boku.



Rys. 7. Opis pomocniczy obrazu struktury przepływu dwufazowego podczas skraplania czynnika chłodniczego HFE-7100 w minikanale rurowym o średnicy 2 mm

Fig. 7. Description of the two – phase flow structure picture during HFE-7100 refrigerant condensation in a pipe minichannel with internal diameter of 2 mm



Rys. 8. Struktury przepływu zaobserwowane podczas skraplania czynnika HFE-7100 w kanale o średnicy wewnętrznej  $d = 2$  mm: a) korkowa  $T_s = 83^\circ\text{C}$ ,  $G = 56 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $x = 0,40$ ; b) korkowa  $T_s = 53^\circ\text{C}$ ,  $G = 192 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $x = 0,54$ ; c) pierścieniowo - falowa  $T_s = 81^\circ\text{C}$ ,  $G = 80 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $x = 0,62$ ; d) pierścieniowa  $T_s = 76^\circ\text{C}$ ,  $G = 91 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $x = 0,69$ ; e) pęcherzykowa  $T_s = 63^\circ\text{C}$ ,  $G = 162 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $x = 0,30$

Fig. 8. Flow patterns observed during HFE-7100 refrigerant condensation in a pipe minichannel with internal diameter  $d = 2$  mm: a) slug flow  $T_s = 83^\circ\text{C}$ ,  $G = 56 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $x = 0,40$ ; b) slug flow  $T_s = 53^\circ\text{C}$ ,  $G = 192 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $x = 0,54$ ; c) annular - wavy  $T_s = 81^\circ\text{C}$ ,  $G = 80 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $x = 0,62$ ; d) annular  $T_s = 76^\circ\text{C}$ ,  $G = 91 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $x = 0,69$ ; e) bubbly  $T_s = 63^\circ\text{C}$ ,  $G = 162 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $x = 0,30$



Rys. 9. Widok z boku dla struktury falowej  
Fig. 9 Side view of the wavy flow

Badania wykazały, że w większości zakresów badanych parametrów występują struktury rozwarstwione (pierścieniowa, pierścieniowo – falowa i falowa), a przy wysokich wartościach gęstości strumienia masy  $G > 500$  [kg/m<sup>2</sup>s] występuje głównie struktura falowa. Spadek stopnia suchości  $x$  w takim wypadku powoduje jedynie narastanie grubości warstwy kondensatu. Potwierdza to wyniki analiz obliczeniowych autorki [9].

#### 4. Wnioski

Oprzeżądowanie stanowiska badawczego pozwoliło na zastosowanie analizy obrazów struktur przepływu dwufazowego podczas skraplania czynnika HFE-7100 w minikanale rurowym o średnicy wewnętrznej  $d = 2$  mm. Badania te są oryginalne i wypełniają pewną lukę informacyjną w podanym zakresie, zwłaszcza dla czynnika chłodniczego HFE -7100. Stwierdzono, że w zakresie prowadzonych badań zaobserwowano takie struktury przepływu jak: korkowe, pierścieniowo – falowe, pierścieniowe i pęcherzykowe. Dla parametrów występujących podczas skraplania najczęściej występują w miniskraplaczach kompaktowych struktury rozwarstwione tzn. pierścieniowe i pierścieniowo – falowe, co potwierdziło wyniki wcześniejszej analizy obliczeniowej. Ponadto wykonane badania wizualizacyjne wykazały możliwość i potrzebę dalszych badań nad strukturami przepływu dwufazowego podczas skraplania czynników chłodniczych oraz podjęcie próby uogólnienia map struktur przepływu dla skraplania nie tylko czynnika HFE-7100, ale i innych czynników, stosowanych w technice klimatyzacyjnej i chłodniczej. Mapy tego typu mają za zadanie ułatwienie projektowania kompaktowych wymienników ciepła oraz doboru optymalnych parametrów ich

pracy. Planuje się wykonanie tego typu badań oraz uogólnienie ich wyników w postaci map struktur przepływu

*Praca została wykonana w ramach grantu NCN nr N N 456740. Podziękowania za pomoc przy opracowaniu artykułu dla prof. dr hab. inż. Tadeusza Bohdala i dr inż. Henryka Charuna.*

#### 5. Literatura

- [1] Troniewski L., Ulbrich R.: The analysis of flow regime maps of two-phase gas-liquid flow In pipe. Chem. Eng. Sci., vol. 39(7/8), p. 1213-1220, 1984.
- [2] Ewing M.E., Weinandy J.J., Christensen R., N.: Observations of two-phase flow patterns in a horizontal circular channel. Heat Transfer engineering, vol. 20 (1), p. 9-14, 1999.
- [3] Breber G., Palen J.W., Taborek J.: Prediction of Horizontal Tube side Condensation of Pure Components Using Flow Regime Criteria. Journal of Heat Transfer, Transaction ASME, vol. 102 (3), 471-476, 1980.
- [4] Wongwises S., Wongchang T., Kaewon J.: A visual study of two-phase flow patterns of HFC-134a and lubricant oil mixtures. Heat Transfer Engineering, vol. 23, p. 13-22, 2002.
- [5] Dobson M.K., Chato J.C.: Condensation in Smooth Horizontal Tubes. Journal of Heat Transfer, vol. 120(1), 193-213, 1998.
- [6] Coleman J., Garimella S.: Two-Phase Flow Regime Transitions in Microchannel Tubes: The Effect of Hydraulic Diameter. Proc. of IMECE, Orlando, 2000.
- [7] Coleman J., Garimella S.: Two-Phase Flow Regimes in Round, Square and Rectangular Tubes During Condensation of Refrigerant R134a. Int. J. of Refrigeration, vol. 26(1), 117-128, 2003.
- [8] Sikora M.: Pomiary i analiza oporów przepływu podczas skraplania w minikanalach rurowych, Pomiary Automatyka Kontrola 6 (58): 559-562, 2012.
- [9] Bohdal T., Sikora M.: Identyfikacja struktur przepływu podczas skraplania czynników chłodniczych w mini kanałach rurowych, Chłodnictwo 1, 6-13, 2013.

otrzymano / received: 26.06.2014

przyjęto do druku / accepted: 02.09.2014

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

### Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo–technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.

Tadeusz SKUBIS  
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK