

Robert KANIOWSKI

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA,
Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Pomiar lokalnego stopnia zapełnienia, stopnia suchości oraz współczynnika przejmowania ciepła w prostokątnym minikanale asymetrycznie ogrzewanym

Dr inż. Robert KANIOWSKI



Urodzony 14 kwietnia 1979r. Ukończył studia na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach w 2004r. W 2011r. uzyskał stopień doktora na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechniki Warszawskiej w Płocku. Pracuje jako asystent na katedrze Mechatroniki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach.

e-mail: kaniowski@tu.kielce.pl

Streszczenie

W artykule omówiono technikę jednoczesnego pomiaru stopnia zapełnienia przy wrzeniu w przepływie i rozkładu temperatury powierzchni grzejnej. Przedmiotem badań było rozpoznanie struktur przepływu dwufazowego, stopnia zapełnienia i stopnia suchości oraz zmiennych wraz z nimi współczynników przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie płynu przez pionowy, prostokątny minikanal.

Słowa kluczowe: minikanal, stopień zapełnienia, wymiana ciepła.

Measurement of local void fraction, vapor quality distribution and heat transfer coefficient in a rectangular, vertical minichannel heated asymmetrically

Abstract

Heat transfer to boiling liquid flowing through narrow minichannels has become a modern solution to heat transfer enhancement in small, mainly electronic devices. The paper discusses the method for simultaneous measurement of the flow boiling void fraction and heating surface temperature distribution, which aims at determining local values of the vapor quality and heat transfer coefficients. The studies were conducted for boiling FC-72 in a rectangular, vertical and asymmetrically heated minichannel. Employing a high-speed camera on the measurement stand constructed by the author helped to determine, for the set sections, the void and liquid fractions as a function of variable thermal and flow parameters such as channel hydraulic diameter, heat flux, pressure, mass flux and temperature of liquid subcooling at the minichannel inlet. Measurements of the heating surface temperature distribution and photographic observations of the two-phase flows, when conducted simultaneously, allow determining the dependence of the recorded local void fraction on the local temperature. The liquid crystal thermography technique helped to perform the repetitious measurements of the temperature on the heating surface. One of the advantages of this technique is a possibility of observing the instantaneous temperature field of the heating surface. There were observed the following flow patterns: bubbly flow, bubbly-slug flow, slug flow, slug-wispy flow and wispy flow.

Keywords: minichannel, void fraction, heat transfer.

1. Wstęp

Rozwój techniki narzuca konieczność odprowadzania dużych ilości ciepła. Przekazywanie ciepła do wrzącej cieczy przepływającej przez wąskie kanały jest nowoczesnym rozwiązaniem intensyfikacji wymiany.

Podczas wrzenia występuje kilka następujących po sobie etapów, związanych ze wzrostem udziału fazy parowej w mieszaninie dwufazowej, wskutek oddziaływania płynu z ogrzewaną ścianką kanału. W trakcie narastania rozwiniętego wrzenia *pęcherzykowego* zmienia się struktura pęcherzyków, co wynika ze wzrostu ich ilości i objęto-

ści. W konsekwencji tworzy się wtedy struktura *korkowa*, a przy dalszym doprowadzaniu ciepła powstaje struktura *pięścieniowa* (rozproszona faza ciekła w rdzeniu parowym i ciecz w postaci filmu na ściance kanału). Jeżeli doprowadzanie ciepła jest kontynuowane, to powstaje struktura *mglowa*. Sposób kształtowania się struktur przepływu zależy od ciśnienia, strumienia masy, średnicy hydraulicznej oraz orientacji przestrzennej kanału. Dlatego też analizuje się oddzielnie przepływy z wrzeniem w kanałach poziomych [1, 2] i pionowych [3, 4]. Pomimo podobieństwa mechanizmu powstawania pęcherzy parowych występują istotne różnice. W zależności od średnicy hydraulicznej kanału obserwuje się odmienne struktury przepływu dwufazowego dla tej samej orientacji przestrzennej kanału. Struktury przepływu przy wrzeniu w kanale poziomym są podobne do struktur występujących w kanale pionowym. Dla małych wartości strumienia masy może wystąpić asymetria rozkładów cieczy i pary, wskutek oddziaływania siły ciężkości. Niekorzystne warunki kształtują się w górnej części kanału, co objawia się gwałtownym wzrostem temperatury ścianki wskutek wysychania na niej filmu cieczy [5].

Wizualizacja przepływu cieczy niedogrzonej w kanale pionowym pokazuje, że dynamika powstawania pęcherzyków pary przy przepływie czynnika w dół jest odmienna niż przy przepływie do góry. Jeżeli przepływ płynu skierowany jest w górę, pęcherzyki pary ślizgają się wzdłuż powierzchni ogrzewanej i nie odrywają się od niej. Natomiast przy przepływie w dół, pęcherzyki pary albo odrywają się po powstaniu i następnie ślizgają się wzdłuż ścianki, albo ślizgają się i następnie odrywają się od ścianki. Proces ślizgania się pęcherzyków pary po powierzchni powoduje zwiększoną wymianę ciepła pomiędzy ścianką a płynem, co skutkuje wyższą wartością współczynnika przejmowania ciepła przy przepływie do góry niż przy przepływie w dół, dla tych samych wartości strumienia masy i różnicy temperatur [6].

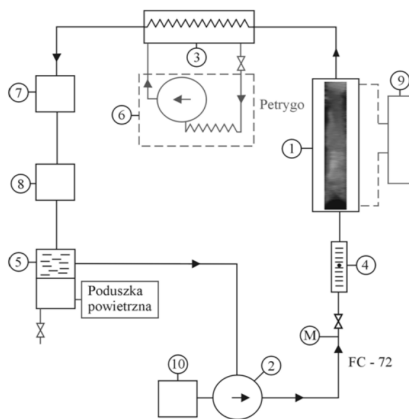
Wiele publikacji Thomego dotyczyło mechanizmów wymiany ciepła w mikro- i minikanalach. W [7] poruszone zostały zagadnienia dotyczące m. in. przepływu dwufazowego, wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie, mechanizmów wymiany ciepła i modeli wrzenia dla przepływu w mikrokanalach. Zauważono, że otrzymane eksperymentalnie współczynniki przejmowania ciepła dla wrzenia w przepływie są silnie zależne od strumienia ciepła i ciśnienia, a nieznacznie zależą od strumienia masy i stopnia suchości. Stwierdzono, że modele dla kanałów konwencjonalnych (makroskala) nie są właściwe dla określenia współczynników przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie przez mikrokanale. W pracy [8] badano wpływ średnicy kanału na wymianę ciepła przy wrzeniu w przepływie, dla makro- i mikro-kanału. Porównano otrzymane eksperymentalnie współczynniki przejmowania ciepła i rozwiązania dla modelu trzystrefowego, w wyniku czego stwierdzono: dla niskich wartości stopnia suchości $X < 0,04$ współczynnik przejmowania ciepła maleje ze wzrostem średnicy, dla wartości stopnia suchości $X > 0,18$ współczynnik przejmowania ciepła rośnie ze zwiększaniem się średnicy, dla wartości $0,04 > X > 0,18$ współczynnik przejmowania ciepła gwałtownie rośnie, a następnie zmniejsza się wraz ze wzrostem średnicy.

2. Stanowisko pomiarowe

Obieg przepływowy dla badanego procesu wrzenia czynnika chłodniczego FC-72 zawiera następujące elementy (rysunek 1): moduł główny (1), pompę (2) wraz z falownikiem (10) regulującym prędkość obrotową wirnika pompy, rurowy wymiennik ciepła (3), rotametr (4), zbiornik wyrównawczy (5), chłodziarkę recyrkulacyjną (6), filtr siatkowy (7), odpowietrzacz (8), źródło prądu (9).

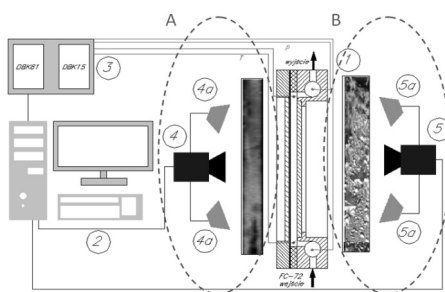
Na stanowisku z minikanalem realizowane są trzy tory pomiarowe, rysunek 2: a) akwizycja obrazu kolorowego kamerą CCD (4) wraz z oświetleniem emitującym „zimne” światło (4a), b) akwizycja obrazu przepływu dwufazowego monochromatyczną, szybką kamerą CMOS – 347klatek/s (5) wraz z oświetleniem LED (5a), c) system akwizycji danych pomiarowych (3). Kontrolę i akwizycję temperatury, ciśnienia oraz natężenia prądu elektrycznego umożliwia stacja akwizycji danych pomiarowych *DaqBoard 2000* (3). Wszystkie tory pomiarowe są sprzężone z komputerem (2). Natężenie przepływu płynu odczytywane jest z rotametrów.

Z jednej strony minikanalu jest prowadzony dwuwymiarowy pomiar temperatury przy wykorzystaniu termografii ciekłokrystalicznej, strona A. Na wlocie i wylocie czynnika roboczego do/z minikanalu zamontowano dwie termopary (typ K) oraz dwa czujniki ciśnienia. Kanał posiada dwie powierzchnie ważne dla procesu wymiany ciepła. Jedna z nich jest powierzchnią grzejną, o zadanej i stałej gęstości strumienia ciepła, druga jest powierzchnią szklaną, przez którą obserwujemy proces wrzenia, strona B.



Rys. 1. Układ ciepło – przepływowy: 1 – moduł pomiarowy; 2 – pompa wirowa; 3 – rurowy wymiennik ciepła; 4 – rotametr; 5 – zbiornik wyrównawczy; 6 – chłodziarka, 7 – filtr, 8 – odpowietrzacz, 9 – przekształtnik tyrystorowy, 10 – falownik

Fig. 1. Flow loop: 1 – measurement module; 2 – rotary pump; 3 – tubular heat exchanger; 4 – rotameter; 5 – compensating tank; 6 – refrigerator; 7 – filter; 8 – deaerator; 9 – thyristor converter; 10 – frequency inverter



Rys. 2. System akwizycji danych pomiarowych. 1 – moduł pomiarowy; 2 – komputer z kartą rejestracji obrazów i monitorem; 3 – stacja akwizycji danych pomiarowych; 4 – kolorowa kamera cyfrowa RGB; 4a – oświetlenie emitujące „zimne” światło białe; 5 – monochromatyczna, szybka kamera cyfrowa CMOS; 5a – oświetlenie typu LED

Fig. 2. Measurement data acquisition: 1 – measurement module; 2 – computer with frame grabber and monitor; 3 – measurement data acquisition station; 4 – color digital camera, RGB; 4a – lighting emitting white „cold” light; 5 – monochromatic, high-speed digital camera, CMOS; 5a – LED light

3. Wyznaczenie lokalnego stopnia zapęlenia, suchości oraz współczynnika przjmowania ciepła

Uzyskanie dobrej jakości zdjęcia ruchomej struktury dwufazowej wymaga znacznego powiększenia fotografowanego obiektu. Stąd potrzeba łączenia dwóch zdjęć w jedno, rysunek 4, 6. Powo-

dem jest geometria, długiego a zarazem wąskiego minikanalu. Zdjęcia struktur przepływu dwufazowego zostały wykonane w różnych czasach, jedno po drugim i jedno pod drugim, w stanie ustalonym (te same parametry cieplno – przepływowe, nastawy kamery i oświetlenia oraz te same odległości obiektywu od badanego obiektu). Każde zdjęcie cyfrowe jest dzielone na zbiór wierszy i kolumn, składających się z pól o znanych kolorach. Wybranemu przekrojowi poprzecznemu minikanalu odpowiada zbiór pól zawartych w jednym wierszu, jak na rysunku 3. W tym wierszu, w celu wyznaczenia lokalnego stopnia zapęlenia $\varphi(x)$, zliczono ilość pól A_v , odpowiadających fazie gazowej i podzielono przez całkowitą ilość pól A (1). Dla pikseli częściowo zapęlnionych parą zastosowano procedurę geometrycznego sumowania zapęlnionych powierzchni z innymi, podobnymi polami w wierszu. Ponieważ głębokość kanału jest niewielka 0,5 – 1,5 mm pominięto zakrzywienie pęcherzy w kierunku normalnym do powierzchni grzejnej [9]. Lokalny stopień suchości $X(x)$ wyznaczono z zależności (3). Błąd względny wyznaczenia lokalnego stopnia zapęlenia nie przekraczał 5%, a lokalnego stopnia suchości nie przekraczał 7%.

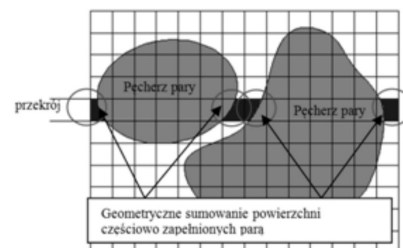
$$\varphi(x) = \frac{A_v}{A} \quad (1)$$

$$X(x) = \frac{m_v}{m_l + m_v} \quad (2)$$

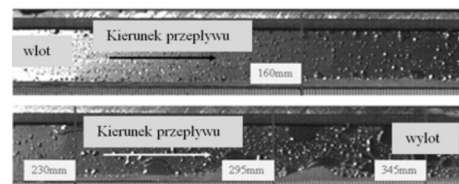
$$X(x) = \frac{V\varphi(x)\rho_v}{V[(1-\varphi(x))\rho_l + \varphi(x)\rho_v]} = \frac{\varphi(x)\rho_v}{(1-\varphi(x))\rho_l + \varphi(x)\rho_v} \quad (3)$$

gdzie: V – objętość, m – masa, ρ – gęstość, indeksy: l – ciecz, v – para.

Pomiary lokalnego stopnia zapęlenia prowadzono w czterech wybranych przekrojach rysunek 4. Przekroje te rozmieszczono w odległościach 160 mm, 230 mm, 295 mm, 345 mm od wlotu do minikanalu. Liniały umieszczone po obu stronach modułu pomiarowego z minikanalem ułatwiają kalibrację położenia obu kamer, jak i ustawienie punktów odniesienia. Lokalny stopień zapęlenia w jednym przekroju wyznaczono dla kolejnych 10 zdjęć z kamery przy stałej gęstości strumienia ciepła. Zdjęcia były wykonywane z prędkością 150 klatek/s o rozdzielczości 150 x 752 pikseli.



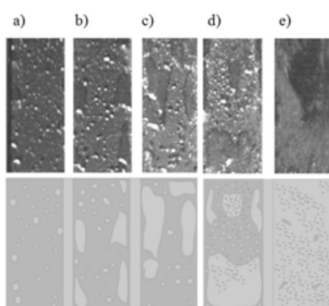
Rys. 3. Wyznaczenie stopnia zapęlenia φ
Fig. 3. Determining the void fraction φ



Rys. 4. Rozmieszczenie przekrojów, gdzie następuje pomiar stopnia zapęlenia
Fig. 4. Distribution of the cross-sections in which the void fraction was measured

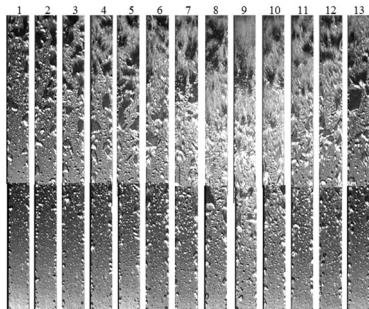
Wyznaczono rodzaje struktur przepływu wg schematu na rysunku 5: *struktura pęcherzykowa (P)* – pęcherzyki fazy gazowej przemieszczają się w fazie ciekłej o kształcie sferycznym i niewielkim rozmiarze, większe pęcherzyki tworzą się przy ścianie kanału, *struktura pęcherzykowo – korkowa (PK)* – pęcherzyki

zaczynają się łączyć w większe przy ścianie kanału, powstają niewielkie obszary fazy gazowej, w środku kanału tworzą się niewielkie pęcherzyki o kształcie sferycznym, *struktura korkowa (K)* - duże pęcherze gazu oddzielone od siebie fazą ciekłą tworzą się na całej szerokości kanału, *struktura korkowo – mgłowa (KM)* - duże pęcherze gazu zaczynają się łączyć ze sobą, pomiędzy występuje niewielki obszar gazu z drobkami cieczy, *struktura mgłowa (M)* - faza ciekła występuje tylko w postaci małych drobinek. Ponieważ badany minikanal ma kształt prostokątny i jest ogrzewany z jednej strony nie jest możliwe występowanie struktury pierścieniowej, co jest spowodowane osuszeniem filmu cieczy na brzegach minikanalu. Na rysunku 6 przedstawiono typowe zdjęcia struktur dwufazowych przy wzroście i spadku gęstości strumienia ciepła.



Rys. 5. Rodzaje struktur przepływu wyznaczone w eksperymencie: a) pęcherzykowa, b) pęcherzykowo-korkowa, c) korkowa, d) korkowo-mgłowa, e) mgłowa

Fig. 5. Flow patterns determined in the experiment: a) bubbly flow, b) bubbly-slug flow, c) slug flow wispy-slug flow, e) mist flow



Rys. 6. Typowe obrazy struktur przepływu przy wzroście (1 - 9) i spadku (10 - 13) gęstości strumienia ciepła, przykładowy eksperyment, $d_h = 1,9$ mm, $p_m = 1,19$ bar, $G = 569$ kg m⁻² s⁻¹, $q_w = 91,4 - 122,5$ W m⁻²

Fig. 6. Typical images of flow structures at increase (1 - 9) and decrease (10 - 13) in the heat flux, $d_h = 1,9$ mm, $p_m = 1,19$ bar, $G = 569$ kg m⁻² s⁻¹, $q_w = 91,4 - 122,5$ W m⁻²

Technikę kalibracji ciekłych kryształów oraz sposób pomiaru temperatury folii grzewczej podano w [10]. Maksymalny błąd termopar wynosił 0,2 K. Błąd pomiaru temperatury folii grzewczej (ciekłe kryształy) nie przekraczał 0,76 K. Schemat układu do obliczeń przedstawiono na rysunku 7. Rozważany jest układ składający się z badanego płynu FC-72, wpływającego do minikanalu przy temperaturze niższej od temperatury nasycenia oraz dwóch przegród: folii grzewczej oraz warstwy szklanej. Folia grzewcza stanowi źródło ciepła i na niej napyłone są termoczułe ciekłe kryształy. Ciekłe kryształy pozwalają zmierzyć rozkład temperatury na tej powierzchni. Podczas przepływu cieczy przez minikanal, zwiększanie mocy elektrycznej, doprowadzanej do folii powoduje wzrost strumienia ciepła dostarczanego do cieczy, co prowadzi do wrzenia. Poszukiwany jest współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni grzewczej a wrzącą cieczą. Jest to zagadnienie odwrotne, w którym na podstawie pomiaru temperatury w wewnętrznych punktach układu (rozkład temperatury na folii grzewczej od strony szkła) i mierzonej mocy elektrycznej, dostarczanej do grzejnika, wyznacza się lokalne współczynniki przejmowania ciepła na powierzchni folii grzewczej a płynem. Zadane są: ciśnienie na wlocie do kanału, objętościowe

natężenie przepływu cieczy, temperatura cieczy na wlocie i wylocie z/do minikanalu i lokalna wartość temperatury powierzchni grzewczej w obszarze czułości ciekłych kryształów. Na rysunku 8 pokazano typowe obrazy rozkładu temperatury na powierzchni grzewczej przy wzroście i spadku gęstości strumienia ciepła.

W prezentowanym podejściu jednowymiarowym zaniedbywana jest zmienność strumienia ciepła generowanego wewnątrz folii wzdłuż współrzędnej x , a na styku folia – płyn zachodzi warunek trzeciego rodzaju:

$$-\lambda_F \frac{\partial T_F(x)}{\partial y} = \alpha(x)(T_{F-f}(x) - T_{sat}(x)) = \frac{\dot{Q}}{A_F}, \quad (4)$$

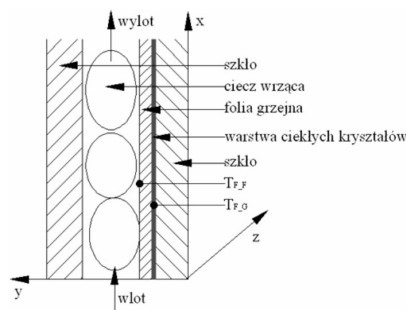
Ponieważ folia jest cienka (jej grubość $\delta_F \approx 0,1$ mm) więc pochodną $\frac{\partial T_F}{\partial y}$ można zastąpić ilorazem różnicowym:

$$\frac{\partial T_F(x)}{\partial y} = \frac{T_{F-f}(x) - T_{F-g}(x)}{\delta_F}, \quad (5)$$

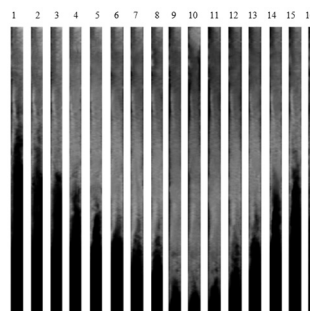
Ze wzoru (4) otrzymujemy zależność na współczynnik przejmowania ciepła:

$$\alpha(x) = \frac{\dot{Q}}{A_F \left(T_{F-g}(x) - \frac{\dot{Q} \delta_F}{A_F \lambda_F} - T_{sat}(x) \right)} \quad (6)$$

gdzie: λ – współczynnik przejmowania ciepła, \dot{Q} – strumień ciepła, A – pole powierzchni, T – temperatura, indeksy: F – folia grzewcza, f – płyn, sat – nasycenie, G – szkło.



Rys. 7. Schemat przepływu badanej cieczy przez minikanal
Fig. 7. The minichannel cross-section



Rys. 8. Typowe obrazy rozkładu temperatury na powierzchni grzewczej przy wzroście (1 - 10) i spadku (11 - 16) gęstości strumienia ciepła, przykładowy eksperyment, $d_h = 1,9$ mm, $p_m = 1,19$ bar, $G = 569$ kg m⁻² s⁻¹, $q_w = 91,4 - 122,5$ W m⁻²

Fig. 8. Typical images of the temperature distribution on the heating surface at increase (1 - 10) and decrease (11 - 16) in the heat flux, $d_h = 1,9$ mm, $p_m = 1,19$ bar, $G = 569$ kg m⁻² s⁻¹, $q_w = 91,4 - 122,5$ W m⁻²

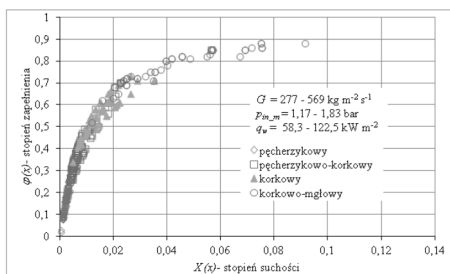
4. Wyniki

Wizualizacja przepływu wrzącego płynu pozwala poznać i zrozumieć mechanizm wymiany ciepła. Podczas wrzenia rozwiniętego

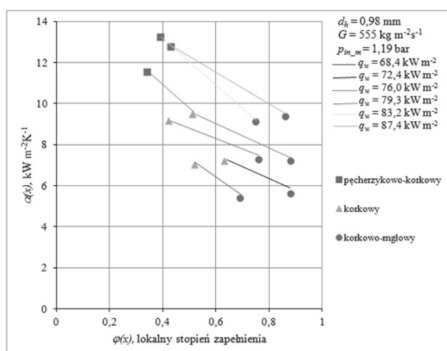
w minikanale nie można jednoznacznie określić rodzaju struktury przepływu dwufazowego w całym minikanale. Jest to związane z ciągłą zmianą fazy wzdłuż długości minikanalu. Rysunek 9 ilustruje zależność stopnia zapełnienia od stopnia suchości, przy stałej średnicy hydraulicznej. Jest on pomocny przy odczytywaniu zakreślowanych występowania zidentyfikowanych struktur przepływu dwufazowego. Zakresy ich występowania w zależności od średnicy hydraulicznej d_h i lokalnego stopnia zapełnienia $\varphi(x)$ są następujące:

- $d_h = 0,98$ mm: (P) $\varphi(x) \leq 0,32$; (PK) $0,3 \leq \varphi(x) \leq 0,55$; (K) $0,41 \leq \varphi(x) \leq 0,65$; (KM) $0,5 \leq \varphi(x) \leq 0,9$; (M) $\varphi(x) \geq 0,9$;
- $d_h = 1,9$ mm: (P) $\varphi(x) \leq 0,35$; (PK) $0,24 \leq \varphi(x) \leq 0,5$; (K) $0,34 \leq \varphi(x) \leq 0,7$; (KM) $0,6 \leq \varphi(x) \leq 0,9$; (M) $\varphi(x) \geq 0,9$;
- $d_h = 2,79$ mm: (P) $\varphi(x) \leq 0,6$; (PK) $0,3 \leq \varphi(x) \leq 0,7$; (KM) $0,65 \leq \varphi(x) \leq 0,9$; (M) $\varphi(x) \geq 0,9$.

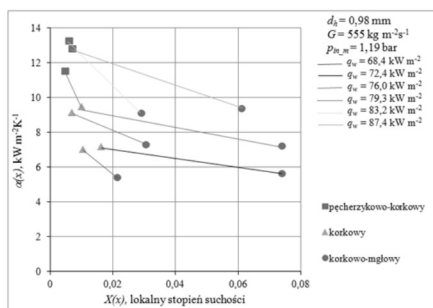
Wyniki pomiarów lokalnego współczynnika przejmowania ciepła w funkcji lokalnego stopnia zapełnienia i stopnia suchości pokazano na rysunkach 10, 11.



Rys. 9. Zależność stopnia zapełnienia w funkcji stopnia suchości, $d_h = 1,9$ mm
Fig. 9. The void fraction as a function of the vapor quality, $d_h = 1,9$ mm



Rys. 10. Współczynnik przejmowania ciepła w funkcji stopnia zapełnienia
Fig. 10. The heat transfer coefficient as a function of the void fraction



Rys. 11. Współczynnik przejmowania ciepła w funkcji stopnia suchości
Fig. 11. The heat transfer coefficient as a function of the vapor quality

Wraz ze wzrostem lokalnego stopnia zapełnienia jak i lokalnego stopnia suchości lokalny współczynnik przejmowania ciepła maleje. Jest to związane ze zmianą fazy czynnika i przyrostem udziału pary. Maksymalny błąd względny gęstości strumienia ciepła wyniósł od 0,5 do 3,1% a lokalnego współczynnika przejmowania ciepła od 2,5% do 19,4%. Z danych eksperymentalnych można odczytać rodzaj struktury przepływu przy lokalnym stopniu zapełnienia

i lokalnym stopniu suchości. Podczas przejścia z przepływu pęcherzykowo – korkowego w przepływ korkowy obserwuje się znaczny spadek współczynnika przejmowania ciepła.

5. Wnioski

Zastosowanie techniki termografii ciekłokrystalicznej umożliwiło powtarzalny, bezdotykowy pomiar rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej. Zaletą tej techniki pomiarowej jest możliwość obserwacji chwilowego pola temperatury powierzchni grzejnej, wadą wąski zakres pomiarowy wynoszący średnio 20 K.

Przy wykorzystaniu techniki wizualizacji przepływu określono nierównomierność rozprywu mieszaniny dwufazowej. Zaobserwowano struktury przepływu: pęcherzykową, korkowo – pęcherzykową, korkową, korkowo – mgłową oraz mgłową. Zakresy ich występowania, określone wyłącznie w funkcji lokalnego stopnia zapełnienia $\varphi(x)$, wzajemnie nakładają się na siebie i wynoszą: struktura pęcherzykowa – $\varphi(x) \leq 0,45$; struktura korkowo – pęcherzykowa – $0,25 \leq \varphi(x) \leq 0,7$; struktura korkowa – $0,3 \leq \varphi(x) \leq 0,74$; struktura korkowo – mgłowa – $0,55 \leq \varphi(x) \leq 0,9$; struktura mgłowa $\varphi(x) \geq 0,9$. Podane zakresy występowania poszczególnych struktur są rozłączne dla ustalonej wartości d_h minikanalu.

Jednoczesne pomiary rozkładu temperatury powierzchni grzejnej, za pomocą ciekłych kryształów oraz struktur przepływu, dają możliwość uzależnienia rejestrowanego lokalnego współczynnika przejmowania ciepła od lokalnego stopnia zapełnienia.

Przy konstruowaniu wymienników ciepła ważnym parametrem jest lokalny stopień zapełnienia i występowanie, kolejnych po sobie, struktur dwufazowych. Powstanie struktury korkowej wpływa niekorzystnie na współczynnik przejmowania ciepła, co jest wynikiem powstawania coraz większej ilości pary.

6. Literatura

- [1] Saisorn S., Kaew-On J., Wongwiset S.: Flow pattern and heat transfer characteristics of R-134a refrigerant during flow boiling in a horizontal circular mini-channel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 53, pp. 4023-4038, 2010.
- [2] Piasecka M., Maciejewska B.: The study of boiling heat transfer in vertically and horizontally oriented rectangular minichannels and the solution to the inverse heat transfer problem with the use of the Beck method and Trefftz functions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 38, pp. 19-32, 2012.
- [3] Kandlikar S. G.: Scale effects on flow boiling heat transfer in microchannels: A fundamental perspective, *Int. J. Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 1073-1085, 2010.
- [4] Ong C. L., Thome J. R.: Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part 1 -Two-phase flow patterns and film thickness measurements, *Experimental Thermal Fluid Science*, vol. 35, pp. 37-47, 2011.
- [5] Bohdal T.: Przyczyny niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Monografia Wydziału Mechanicznego PK, nr 130, Koszalin, 2006.
- [6] Thomcroft G. E., Klausner J.F., Mei R.: An experimental investigation of bubble growth and detachment in vertical upflow and downflow boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 41, pp. 3857-3871, 1998.
- [7] Thome J. R.: Engineering data book III, Wolverine Tube Inc., 2004.
- [8] Dupont V., Thome J. R.: Evaporation in microchannels; influence of the channel diameter on heat transfer, *Proc. 2nd Int. Conf. on Micro- and Minichannels*, Rochester, NY, USA, pp. 461-468, 2004.
- [9] Kaniowski R., Poniewski M.E.: Two-phase flow patterns and boiling heat transfer in asymmetrically heated minichannels, *Proc. ECI 8th Int. Conf. on Boiling and Condensation Heat Transfer*, CD - paper - o_s1_1509, pp.10, 2012.
- [10] Kaniowski R., Poniewski M.E.: Measurement of void fraction distribution and heating surface local temperature in a rectangular, vertical minichannel heated asymmetrically, *The Six International Conference on Transport Phenomena in Multiphase System*, Heat 2011, pp. 263-270, 2011.