

BADANIE WYMIANY CIEPŁA PODCZAS WRZENIA W PRZEPŁYWIE CZYNNIKÓW ROBOCZYCH - FC-72 I WODY DESTYLOWANEJ W MINIKANALACH

Streszczenie

W artykule zestawiono wartości lokalnych współczynników przejmowania ciepła uzyskane z badań wymiany ciepła podczas przepływu czynnika chłodniczego FC-72 i wody destylowanej przez pionowy minikanal podczas zmiany przepływu. Minikanal posiadał wymiary: głębokość - 1,7 mm, szerokość - 16 mm, długość - 180 mm oraz był ogrzewany asymetrycznie. Elementem grzejnym była płyta grzejna z super stopu Haynes - 230 o grubości 0,45 mm. Lokalne współczynniki przejmowania ciepła wyznaczono na styku ciecz wrząca - powierzchnia grzejna z warunku brzegowego trzeciego rodzaju, przy wykorzystaniu metody jednowymiarowej. Temperatura powierzchni na zewnętrznej powierzchni grzejnej stykającej się bezpośrednio z otoczeniem rejestrowana była za pomocą termowizji (IRT). Płyta szklana stanowiąca drugą ściankę kanału pozwoliła na jednoczesną obserwację struktur przepływu dwufazowego. W pracy omówiono i pokazano stanowisko pomiarowe z jego obiegami i systemami. Przedstawiono przegląd literatury dotyczący zastosowania różnych czynników roboczych w badaniach innych naukowców. Zestawiono i przeanalizowano uzyskane zależności współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do wylotu minikanalu podczas zwiększania strumienia ciepła i skonstruowano krzywe wrzenia, otrzymane na podstawie badań z wykorzystaniem dwóch czynników roboczych: FC-72 i wody destylowanej, przy uziemianiu natężenia przepływu. Porównano uzyskane wyniki oraz zarejestrowane struktury wrzenia.

WSTĘP

Badania wymiany ciepła w kanałach o małej średnicy są obiektem badań wielu naukowców. Oprócz zmiany geometrii kanałów, parametrów cieplno-przepływowych czy stosowania różnego rozwinienia powierzchni grzejnej stosuje się również zmianę czynnika roboczego. Na Politechnice Świętokrzyskiej najczęściej stosowanym czynnikiem roboczym był czynnik chłodniczy FC-72 w badaniach wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie [7, 11, 20-23, 25, 27-28] oraz wrzenia w objętości [17-19]. Ten bezbarwny, przezroczysty i szybko odparowujący płyn charakteryzuje się stosunkowo niskim punktem wrzenia - 56 °C (punktu wrzenia - temperatura, przy której ciecz staje się gazem, zależy od substancji i ciśnienia), dlatego można go stosować przy niższych strumieniach ciepła [32]. Innymi czynnikami wykorzystywanymi w wymianie ciepła podczas przepływu były czynniki robocze: R11 [8], R123 [8, 24, 28]. W badaniach wymiany ciepła podczas wrzenia w objętości stosowano również inne czynniki robocze, takie jak: wodę [16-19], etanol [16] i R123 [16]. W innych ośrodkach, zarówno polskich jak i zagranicznych, prowadzone były badania z wykorzystaniem wielu czynników roboczych. W pracy Mikielwicz i innych [14] zaprezentowano wyniki badań wymiany ciepła podczas przepływu w dwóch rurkach o średnicach wewnętrznych 1,15 mm i 2,3 mm, uzyskane przy zastosowaniu czterech czynników roboczych: SES36, R134a, R123 i etanolu. W wymienionym artykule zestawiono parametry wszystkich użytych do badań czynników roboczych oraz porównano te wyniki. Zahid i inni [34] w badaniach wymiany ciepła w przepływie w pionowym minikanale stosowali czynnik R152a, a uzyskane wyniki porównali z wynikami badań przeprowadzonych w zbliżonych warunkach eksperymentalnych otrzymanych z zastosowaniem czynnika R134a. W wyniku porównania stwierdzono, że oba czynniki pozwoliły na otrzymanie podobnych wyników współczynników przejmowania ciepła. Woda jako czynnik roboczy (najczęściej odgazowana, dejonizowana) stosowana jest rzadziej, ze względu na

wysoki punkt wrzenia, jednak można odnaleźć wiele publikacji z wykorzystaniem tego płynu, jak np. [1, 4, 12, 30, 31]. W artykule [5] przedstawiono wyniki badań z wrzeniem w przepływie przez mikrokanały prostokątne dla wody i etanolu. Stwierdzono, że podczas badań z etanolem uzyskano mniejsze wahania temperatury ścianki w obszarze wrzenia przechłodzonego. Współczynnik przejmowania ciepła zmniejszał się wraz ze wzrostem stopnia suchości zarówno dla wody jak i etanolu. W artykule Ozer i inni [15] dotyczącym badań wymiany ciepła w przepływie zastosowano dwa czynniki robocze: Novec 649 and R11, przepływające przez poziomy minikanal. Innymi stosowanymi czynnikami w badaniach wymiany ciepła są również: Novec 7000 [6, 33], Novec 649 [2], etanol, R123, R141b [13] oraz R134a [10].

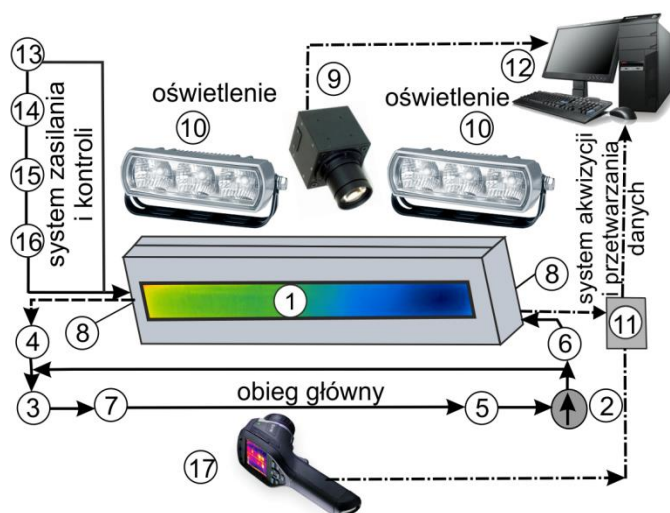
Nadrzędnym celem artykułu jest wyznaczenie i porównanie lokalnych współczynników przejmowania podczas wrzenia w przepływie FC-72 i wody destylowanej przez pojedynczy minikanal podczas zmiany przepływu. Do obliczeń wykorzystano uproszczoną jednowymiarową metodę (1D) modelowania przepływu ciepła przez główne elementy modułu pomiarowego z minikanalem. Współczynnik przejmowania ciepła został wyznaczony na styku powierzchnia grzejna - ciecz wrząca w kanale. Uzyskane wyniki zaprezentowano w formie wykresów współczynników przejmowania ciepła w funkcji długości minikanalu oraz w postaci krzywych wrzenia. Przedstawiono również struktury wrzenia, zarejestrowane podczas przepływów wrzących w kanale obu czynników roboczych.

1. STANOWISKO EKSPERYMENTALNE I METODYKA BADAŃ

Stanowisko eksperymentalne przedstawione na rysunku 1 składa się z kilku obiegów i systemów. Do głównych systemów oraz obiegów stanowiska eksperymentalnego wlicza się: obieg główny czynnika roboczego, system akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych, system zasilania i kontroli oraz system oświetlenia. Obieg główny czynnika roboczego składa się z: modułu testowego

(1), pompy zębatej (2), zbiornika wyrównawczego/regulatora ciśnienia (3), wymiennika ciepła (4), filtra (5), przepływomierza masowego (6), odpowietznika (7) oraz przetwornika ciśnienia (8). W skład podstawowych urządzeń systemu akwizycji i przetwarzania danych i obrazów oprócz kamery termowizyjnej Flir E60 (17) wchodzi: kamera do zdjęć szybkich (9) (do rejestracji struktur przepływu płynu dwufazowego), wydajne oświetlenie LED (10) o mocy 400 W (emitujące zimne światło białe), stacja akwizycji danych pomiarowych DaqLab 2005 (11) i komputer (12). System zasilania i kontroli zawiera: źródło zasilania (13), bocznik (14), amperomierz (15) oraz woltomierz (16).

Najważniejszą częścią stanowiska badawczego jest moduł pomiarowy z pojedynczym, pionowym minikanalem o przekroju prostokątnym o wymiarach: głębokość - 1,7 mm, szerokość - 16 mm i długość - 180 mm (rysunek 1). Z jednej strony modułu pomiarowego rejestruje się pole temperatury powierzchni grzejnej za pomocą kamery termowizyjnej i jednocześnie z drugiej strony modułu oświetlonego światłem LED - obserwuje się struktury przepływu dwufazowego.

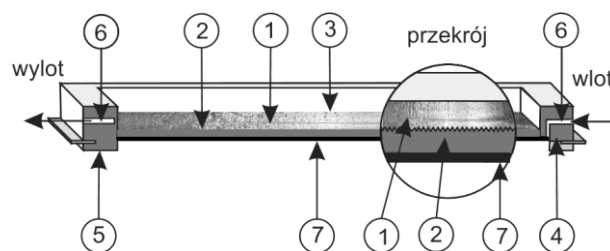


Rys. 1. Stanowisko eksperymentalne, 1-moduł pomiarowy z minikanalem, 2-pompa zębata, 3-zbiornik wyrównawczy/regulator ciśnienia, 4-wymiennik ciepła, 5-filtr, 6-przepływomierz masowy 7-odpowietznik, 8-przetwornik ciśnienia, 9-kamera do zdjęć szybkich, 10-światło LED (400 W), 11-stacja akwizycji danych pomiarowych, 12-komputer, 13-źródło zasilania, 14-bocznik, 15-amperomierz, 16-woltomierz, 17-kamera termowizyjna.

Przekrój modułu pomiarowego wraz z jego podstawowymi elementami prezentuje rysunek 2. W skład modułu wchodzi: minikanal (1), powierzchnia grzejna wykonana ze stopu Haynes-230 (2), płyta szklana przez którą obserwowano struktury przepływu (3), korpus kanału (4), przednia płyta (5), termopara (6), czarna farba podkładowa (7). Na wlocie i wylocie do/z minikanalu zainstalowano termopary oraz przetworniki ciśnienia.

Na zewnętrzną powierzchnię płyty grzejnej, mającą bezpośredni kontakt z otoczeniem, napyłono warstwę czarnej farby podkładowej o znanym współczynniku emisyjności, wynoszącym - 0,83. Z tej strony modułu za pomocą kamery termowizyjnej firmy Flir typ E60 rejestruje się rozkład pola temperatury powierzchni grzejnej. Kamera termowizyjna posiada dokładność pomiaru $\pm 1^\circ\text{C}$ lub $\pm 1\%$ z pomiaru w zakresie temperatur $0 \div 120^\circ\text{C}$. Według specjalnej dodatkowej kalibracji kamery, dokładność ta została zwiększona zgodnie z certyfikatem [3]. Badania były wykonywane w stabilnych warunkach cieplno-przepływowych przy ustalonych gęstościach strumieni ciepła. Po wstępnym ustabilizowaniu wartości

ciśnienia i natężenia przepływu rozpoczęto właściwe badania. W trakcie kolejnych serii pomiarowych następował stopniowy wzrost sumienia ciepła i mocy elektrycznej dostarczanej do płyty grzejnej. Prowadziło to do pojawienia się wrzenia pęcherzykowego i rozwoju wrzenia. Pierwszym obszarem wrzenia był obszar wrzenia przechłodzonego, gdzie występowała ciecz przegrzana jedynie w pobliżu ogrzewanej powierzchni, podczas gdy w rdzeniu przepływu była nadal przechłodzona (temperatura cieczy nie osiągała temperatury nasycenia). Kolejny obszar wrzenia to obszar wrzenia nasyconego, w którym temperatura płynu w rdzeniu przepływu również osiągała temperaturę nasycenia.



Rys. 2. Moduł pomiarowy: 1-minikanal, 2-powierzchnia grzejna, 3-płyta szklana 4-korpus kanału, 5-przednia płyta, 6-termopara, 7-czarna farba.

2. WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEJMOWANIA CIEPŁA

W literaturze [9, 26-27] można odnaleźć kilka metod obliczania współczynnika przejmowania ciepła wykorzystujących funkcje Trefftza. W prezentowanym artykule lokalny współczynnik przejmowania ciepła wyznaczono przy założeniu jednowymiarowej (1D) metody przepływu ciepła na styku powierzchnia grzejna - ciecz wrząca. Metoda ta uwzględnia kierunek przepływu ciepła prostopadły do kierunku przepływu cieczy w minikanale. Wartości tego współczynnika określono dla obu obszarów wrzenia: przechłodzonego i nasyconego [29] i zapisano w postaci poniższego równania:

$$\alpha(x) = q_w / (T_p(x, \delta) - T_l(x) - q_w \cdot \frac{\delta_p}{\lambda_p}) \quad (1)$$

gdzie: x - odległość od wlotu minikanalu w kierunku przepływu, q_w - gęstość strumienia ciepła przekazywana do płynu w minikanale, $T_p(x)$ - temperatura płyty grzejnej po przeciwnej stronie struktur, mierzona przez kamerę termowizyjną, $T_l(x) = T_f(x)$ - w obszarze wrzenia przechłodzonego, $T_f(x)$ - temperatura płynu wyznaczana liniowo wzdłuż odległości od wlotu do wylotu z minikanalu, $T_l(x) = T_{sat}(x)$ w obszarze wrzenia nasyconego, $T_{sat}(x)$ - temperatura nasycenia obliczana na podstawie liniowego rozkładu ciśnienia wzdłuż odległości od wlotu do wylotu minikanalu, λ_p - współczynnik przewodzenia ciepła dla płyty grzejnej, δ_p - grubość płyty grzejnej.

Centralna część płyty grzewczej, w której mierzono temperaturę powierzchni za pomocą kamery IR (4 mm x 180 mm), nie jest izolowana, natomiast pozostałą powierzchnię grzejną osłaniają płyty mikanitu zabezpieczające przed deformacją powierzchni.

W obliczeniach uwzględniono straty ciepła do otoczenia, które są stosunkowo niskie. Wyznaczanie strat ciepła szerzej opisano w [29], gdzie oszacowano je na poziomie 1,3% gęstości strumienia ciepła.

3. WYNIKI

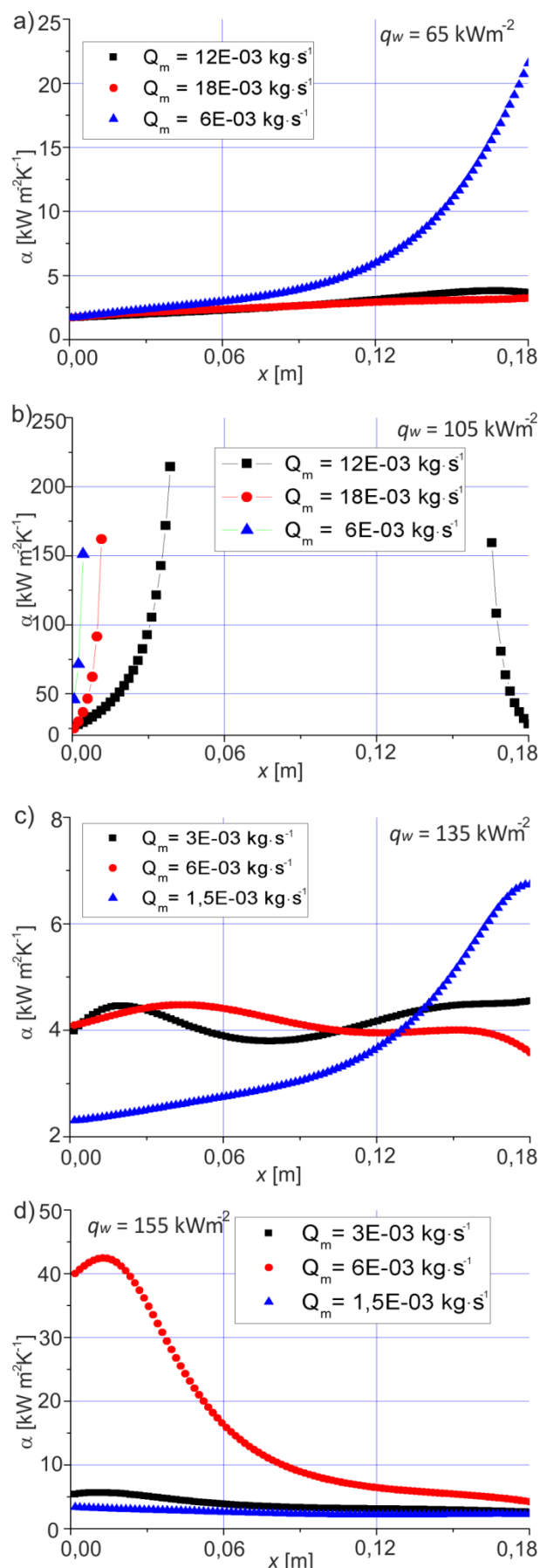
Badania przeprowadzono dla dwóch czynników chłodniczych i kilku masowych natężeń przepływu podczas wzrostu strumienia ciepła dostarczanego do płyty grzewczej. Wszystkie pomiary zostały wykonane dla założonych strumieni ciepła dostarczanych do powierzchni grzewczej minikanalu w podobnych (stabilnych) warunkach cieplno-przepływowych i stanie stacjonarnym. Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono w postaci: zależności lokalnych współczynników ciepła od odległości od wlotu do wylotu minikanalu dla obszaru wrzenia przechłodzonego i nasyconego (rysunek 3) oraz krzywych wrzenia (rysunek 4). Na rysunku 5 pokazano również struktury wrzenia uzyskanych podczas zmiennych masowych natężeń przepływu, zarejestrowane podczas przepływu czynników roboczych FC-72 i wody destylowanej, odpowiednio dla trzech wzrastających gęstości strumieni ciepła.

Woda oraz FC-72 to czynniki robocze o zasadniczo różnych parametrach fizycznych. Newralgicznym parametrem podczas badań wymiany ciepła jest punkt wrzenia, który dla FC-72 (56 °C dla ciśnienia 1 atm) jest prawie dwukrotnie wyższy od punktu wrzenia dla wody (100 °C dla ciśnienia 1,033 atm). W związku z tym, aby osiągnąć wrzenie płynu w kanale w warunkach eksperymentu, podczas badań z FC-72 stosowano niższe strumienie ciepła niż w eksperymentach z wodą. Ze względu na ograniczenia materiałowe i aparaturowe w przypadku wody (szybkie przegrzewanie urządzeń przy wyższych temperaturach) nie można było wymuszać tak dużych masowych natężeń przepływu, jak w przypadku FC-72, dlatego tylko jedno masowe natężenie przepływu jest jednakowe dla obu płynów w przeprowadzonej analizie.

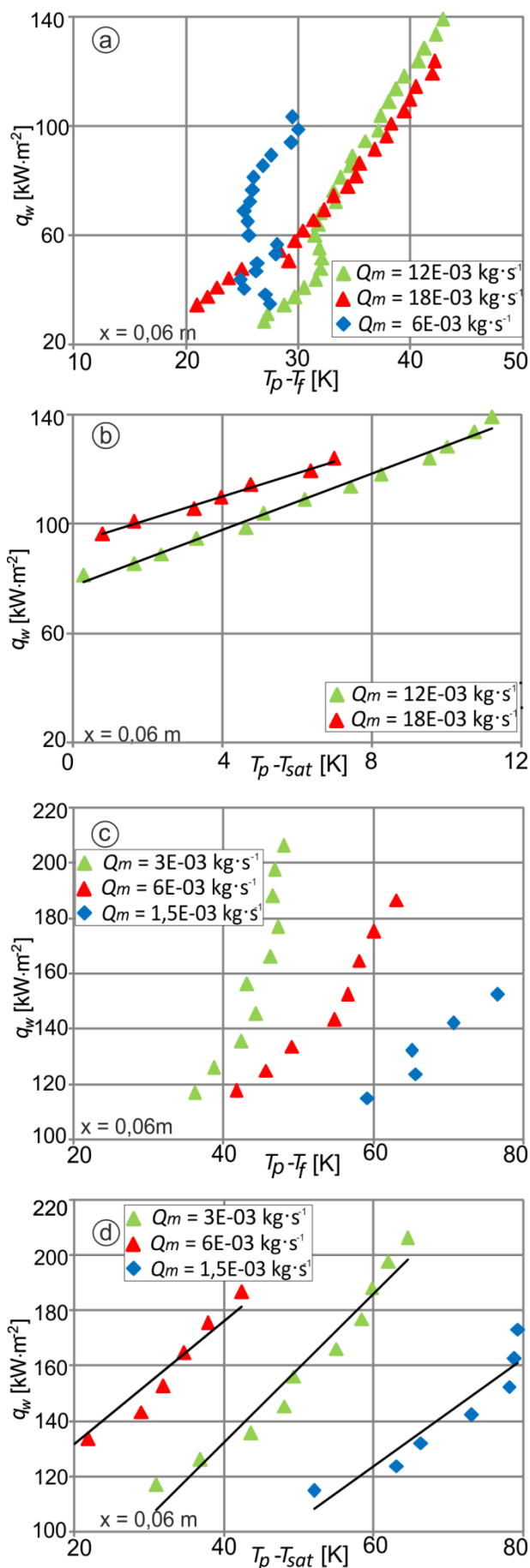
Lokalną wartość współczynników przejmowania ciepła wzdłuż długości kanału zaprezentowano dla dwóch obszarów wrzenia: wrzenia przechłodzonego dla FC-72 (rysunek 3a) i wody (rysunek 3c) oraz wrzenia nasyconego dla FC-72 (rysunek 3b) i wody (rysunek 3d). Zaobserwowano, że w obszarze wrzenia przechłodzonego współczynnik przejmowania ciepła rośnie wraz z odległością od wlotu do minikanalu. Podczas zwiększania strumienia ciepła, różnica temperatur między powierzchnią grzejną a temperaturą płynu w rdzeniu przepływu maleje wraz z odległością od wlotu do wylotu kanału.

Najwyższe wartości współczynnika przejmowania ciepła dla obu czynników roboczych otrzymano dla najniższych przepływów. W przypadku płynu FC-72 (rysunek 3a) najwyższą wartość współczynnika przejmowania ciepła (około 22 kW·m⁻²K⁻¹) osiągnięto dla najniższego masowego natężenia przepływu $Q_m = 6 \cdot 10^{-3}$ kg·s⁻¹. Dla wody (rysunek 3c) mamy taką samą zależność, najwyższą wartość α (około 7 kW·m⁻²K⁻¹) uzyskano również dla najniższego masowego natężenia przepływu ($Q_m = 1,5 \cdot 10^{-3}$ kg·s⁻¹). Dla wyższych masowych natężeń przepływu ($Q_m = 6 \cdot 10^{-3}$ kg·s⁻¹ i $Q_m = 3 \cdot 10^{-3}$ kg·s⁻¹) dla wody (rysunek 3c) zaobserwowano wahania współczynnika przejmowania ciepła wzdłuż odległości. Dla masowego natężenia przepływu $Q_m = 6 \cdot 10^{-3}$ kg·s⁻¹ dla obu płynów, uzyskano zbliżone wartości lokalnych współczynników przejmowania ciepła w przedziale wartości 3,5÷4,5 kW·m⁻²K⁻¹ (pomimo prawie dwa razy wyższych strumieni ciepła dla wody).

W obszarze wrzenia nasyconego współczynnik przejmowania ciepła osiągał około 10 i 6 razy wyższe wartości niż w przypadku wrzenia przechłodzonego odpowiednio dla: FC-72 (rysunek 3b) i wody (rysunek 3d). Współczynnik α dla: FC-72 początkowo wzrastał, następnie malał wraz z odległością od wlotu kanału. W przypadku wody zaobserwowano typowy przebieg współczynnika α , który najwyższą wartość osiągał przy wlocie kanału, a następnie malał wraz z odległością.



Rys. 3. Zależności współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu kanału dla różnych strumieni masowych przepływu; dla czynników roboczych: FC-72 (a, b), wody destylowanej (c, d) oraz dwóch obszarów wrzenia przechłodzonego (a, c) i nasyconego (b, d).



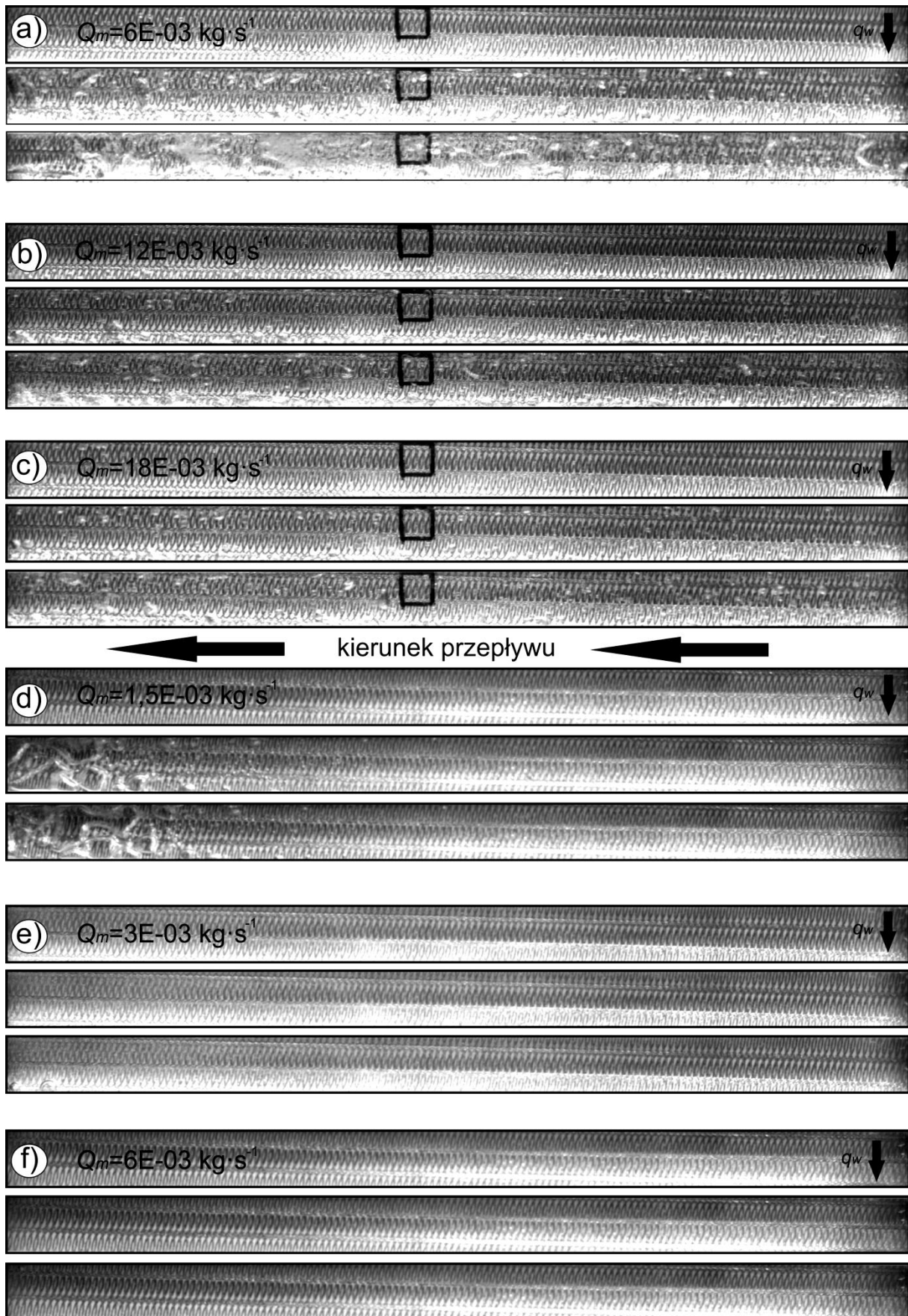
Rys. 4. Krzywe wrzenia dla odległości od wlotu minikanalu 0,06 m dla zadanych masowych natężeń przepływu i czynników roboczych: FC-72 (a, b), wody destylowanej (c, d).

Krzywe wrzenia sporządzono dla przykładowej odległości od wlotu minikanalu - 0,06 m dla wybranych masowych natężeń przepływu (analogicznie wybranych jak przedstawione na rysunku 3) oraz dwóch czynników roboczych: FC-72 (rysunek 4a, b), wody destylowanej (rysunek 4c, d). Przebieg krzywych wrzenia przedstawiono jako zależność gęstości strumienia ciepła q_w w funkcji różnicy temperatury powierzchni grzejnej T_p i średniej temperatury płynu T_f , czyli $(T_p - T_f)$ i różnicy temperatury powierzchni grzejnej T_p i temperatury nasycenia T_{sat} , czyli $(T_p - T_{sat})$ i przedstawiono odpowiednio na rysunku 4 a, c i rysunku 4 b, d. Dla FC-72 krzywe wrzenia były sporządzone przy niższych gęstościach strumienia ciepła do około 140 kW·m⁻² (rysunek 4a-b), natomiast dla wody do 210 kW·m⁻² (rysunek 4c-d). Wyższe różnice temperatury: $T_p - T_f$ i $T_p - T_{sat}$ (do 80 K) uzyskano dla wody, natomiast najwyższe różnice dla FC-72 wyniosły maksimum 50 K. Krzywe wrzenia sporządzone dla FC-72 (rysunek 4a) mają nieco podobny przebieg jak krzywe wrzenia dla wody (rysunek 4c), jednak dla wody przebieg jest bardziej zbliżony do liniowego. Najmniejszą różnicę temperatur $T_p - T_f$ dla FC-72 (rysunek 4a) uzyskano dla $Q_m = 6 \cdot 10^{-3}$ kg·s⁻¹ (25÷30 K), a najwyższą dla $Q_m = 18 \cdot 10^{-3}$ kg·s⁻¹ (20÷43 K). Natomiast dla wody (rysunek 4c) najmniejszą różnicę temperatur $T_p - T_f$ otrzymano dla najniższego $Q_m = 1,5 \cdot 10^{-3}$ kg·s⁻¹ (59 ÷ 79 K), a najwyższą dla najwyższego $Q_m = 6 \cdot 10^{-3}$ kg·s⁻¹ (40÷62 K).

W przypadku krzywych wrzenia sporządzonych dla różnicy temperatur $T_p - T_{sat}$ zaobserwowano podobny przebieg zbliżony do liniowego dla obu płynów (rysunek 4b, d). Najwyższe wartości różnic temperatur $T_p - T_{sat}$ uzyskano dla masowych natężeń przepływu: $Q_m = 18 \cdot 10^{-3}$ kg·s⁻¹ (0 K ÷ 12 K) i $Q_m = 3 \cdot 10^{-3}$ kg·s⁻¹ (25 K ÷ 63 K), odpowiednio dla FC-72 i wody.

Na rysunku 5 pokazano przykładowe struktury wrzenia podczas przepływu dwufazowego, zarejestrowane podczas zwiększania gęstości strumienia ciepła doprowadzanego do powierzchni grzejnej, dla wybranych serii pomiarowych. Badania wykonywano uzmienniając natężenie masowe przepływu podczas eksperymentów z wykorzystaniem czynników roboczych: FC-72 (rysunek 5 a÷c) oraz wody destylowanej (rysunek 5 d÷f). Struktury przepływu dla FC-72 (obrazy z czarnym kwadratem - rysunek 5 a÷c) różnią się zasadniczo od struktur otrzymanych dla wody (rysunek 5 d÷f). Te struktury przepływu charakteryzują się występowaniem większej ilości pęcherzyków parowych o większych rozmiarach w porównaniu do drugiego czynnika roboczego - wody. W przypadku wody można zaobserwować nieliczne, pojedyncze pęcherzyki parowe znacznie rozdrobione. Dla obu płynów zaobserwowano, że wraz ze zmniejszaniem masowym natężenia przepływu ilość pęcherzyków w mieszaninie dwufazowej rośnie.

W przypadku analizy przepływu FC-72 podczas najniższego natężenia masowego przepływu (rysunek 5 a) można zauważyć, że wraz ze wzrostem gęstości strumienia ciepła struktura pęcherzykowa przechodzi w korkowo-mgłową o dużym stopniu fazy parowej w mieszaninie. Dla wyższych natężeń masowego przepływu (rysunek 5 b, c) przy wzroście strumienia ciepła obserwowano podobne struktury przepływu od pęcherzykowych do korkowych. Dla czynnika roboczego - wody obserwowano nieliczne drobne pęcherzyki parowe dla wyższych masowych natężeń przepływu (rysunek 5 e, f). Natomiast przy najniższym masowym natężeniu przepływu (rysunek 5 d), podczas wzrostu gęstości strumienia ciepła, zaobserwowano przejście od struktury drobnych pojedynczych pęcherzyków do struktury korkowej w części wylotowej kanału. Przyczyną różnych struktur przepływu dla obu czynników roboczych są duże różnice we właściwościach fizycznych obu płynów: temperatura wrzenia, gęstość, napięcie powierzchniowe, ciepło właściwe itp.



Rys. 5. Obrazy struktur przepływu zarejestrowane dla wybranych serii pomiarowych dla zadanych masowych natężeń przepływu i dla czynników roboczych: FC-72 (a÷ c) oraz wody destylowanej (d÷f).

PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano wartości lokalnych współczynników przejmowania ciepła w badaniach wymiany ciepła podczas zmiany strumienia masowego przepływu oraz przepływu dwóch czynników roboczych: FC-72 i wody destylowanej przez pojedynczy pionowy minikanal. Lokalny współczynnik przejmowania ciepła wyznaczono za pomocą metody jednowymiarowej na styku cieczy wrząca - powierzchnia grzejna z warunku brzegowego trzeciego rodzaju. Z jednej strony minikanalu za pomocą kamery termowizyjnej rejestrowano temperaturę powierzchni na zewnętrznej powierzchni płyty grzejnej, mającej bezpośredni kontakt z otoczeniem. Struktury przepływu dwufazowego obserwowano przez płytę szklaną z drugiej strony minikanalu.

Wyniki badań przedstawiono w postaci zależności lokalnych współczynników ciepła w funkcji odległości kanału dla dwóch obszarów wrzenia przechłodzonego i nasyconego oraz krzywych wrzenia. Pokazano również obrazy struktur przepływu dwufazowego, zarejestrowane dla zmiennych masowych natężeń przepływu i dla dwóch czynników roboczych (FC-72 i wody destylowanej) podczas wzrostu strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej.

Użyte w eksperymentach płyny wrzące: woda destylowana oraz fluorinert FC-72 posiadają różne właściwości fizyczne, które mają zasadniczy wpływ na wartości współczynnika przejmowania ciepła, przebieg krzywych wrzenia oraz rodzaj obserwowanych struktur przepływu dwufazowego. Istotnie różnym parametrem jest punkt wrzenia czynnika chłodniczego.

Analizując uzyskane wyniki można wywnioskować, że:

- w obszarze wrzenia przechłodzonego, współczynnik przejmowania ciepła rośnie wraz z odległością i najwyższe wartości osiąga dla najniższego masowego natężenia przepływu: $Q_m = 6 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ($22 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$) i $Q_m = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (około $7 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$), odpowiednio dla FC-72 i wody,
- w obszarze wrzenia nasyconego, współczynnik przejmowania ciepła głównie maleje wraz z odległością, osiągał znacznie wyższe wartości, najwyższe wartości α około $220 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ osiągał dla $Q_m = 12 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (FC-72) i $42 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ dla $Q_m = 6 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (woda),
- krzywe wrzenia dla różnic temperatur $T_p - T_{\text{sat}}$ charakteryzował podobny przebieg dla obu płynów zbliżony do liniowego,
- struktury przepływu dla obu płynów różnią się zasadniczo od siebie, dla FC-72 obserwowano liczne, większe pęcherzyki parowe, które przy najniższym masowym natężeniu przepływu "przechodziły" w strukturę korkowo-mgłową w całym kanale; w eksperymentach z wodą zaobserwowano nieliczne pojedyncze pęcherzyki parowe, które przy najniższym masowym natężeniu przepływu zmieniały się w strukturę korkową, widoczną jedynie w części wylotowej kanału.

OŚWIADCZENIE

Praca powstała w ramach projektu NCN, nr umowy UMO-2013/09/B/ST8/02825. Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2013/09/B/ST8/02825.

BIBLIOGRAFIA

1. Bang K.H., Kim K.K., Lee S.K., Lee B.W. *Pressure effect on flow boiling heat transfer of water in minichannels*. International Journal of Thermal Sciences, vol. 50, pp. 280–286, 2011.
2. Bloch G., Bruder M., Sattelmayer T. *A study on the mechanisms triggering the departure from nucleate boiling in subcooled vertical flow boiling using a complementary experimental approach*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 92, pp. 403–413, 2016.
3. Calibration certificate No. K1501035, Calibration laboratory No. 2372, accredited by Czech accreditation Institute under ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 for: Calibration of non-contact temperature measuring instruments.
4. Deng D., Xie Y., Huang Q., Tang Y., Huang L., Huang X. *Flow boiling performance of Ω -shaped reentrant copper microchannels with different channel sizes*. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 69, pp. 8–18, 2015.
5. Diaz M.C., Schmidt J. *Experimental investigation of transient boiling heat transfer in microchannels*. International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 28, pp. 95–102, 2007.
6. Estrada-Perez C.E., Yoo J., Hassan Y.A., 2015. *Feasibility investigation of experimental visualization techniques to study subcooled boiling flow*. International Journal of Multiphase Flow, vol. 73, pp. 17–33.
7. Hozejowska S., Piasecka M. *Equalizing calculus in Trefftz method for solving two-dimensional temperature field of FC-72 flowing along the minichannel*. Heat and Mass Transfer, vol. 50, pp. 1053–1063, 2014.
8. Hozejowska S., Piasecka M., Poniewski M.E. *Boiling heat transfer in vertical minichannels. Liquid crystal experiments and numerical investigations*. International Journal of Thermal Sciences, vol. 48, pp. 1049–1059, 2009.
9. Hozejowska S., Maciejewska B., Hozejowski L. *Application of adjustment calculus in the nodeless Trefftz method for a problem of two-dimensional temperature field of the boiling liquid flowing in a minichannel*. EPJ Web of Conferences, vol. 67, no. 02037, 2014.
10. Jokar A., Hosni M.H., Eckels S.J. *Correlations for heat transfer and pressure drop of glycol-water and air flows in minichannel heat exchangers*. ASHRAE Transactions, pp. 213–224, 2005.
11. Kaniowski R., Poniewski M. *Measurements of two-phase flow patterns and local void fraction in vertical rectangular minichannel*. Archives of Thermodynamics, vol. 34, pp. 3–21, 2013.
12. Mehta B., Khandekar S. *Infra-red thermography of laminar heat transfer during early thermal development inside a square minichannel*. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 42, pp. 219–229, 2012.
13. Mikielwicz D., Mikielwicz J. *A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP*. Applied Thermal Engineering, vol. 30, pp. 2357–2362, 2010.
14. Mikielwicz D., Wajs J., Gliński M., Zrooga A.B.R.S. *Experimental investigation of dryout of SES 36, R134a, R123 and ethanol in vertical small diameter tubes*. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 44, pp. 556–564, 2013.
15. Ozer A.B., Oncel A.F., Hollingsworth D.K., Witte L.C. *A method of concurrent thermographic-photographic visualization of flow boiling in a minichannel*. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 35, pp. 1522–1529, 2011.
16. Pastuszko R. *Pool boiling for extended surfaces with narrow tunnels - visualization and a simplified model*. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 38, pp. 149–164, 2012.
17. Pastuszko R. *Pool boiling on micro-fin array with wire mesh structures*. International Journal of Thermal Sciences, vol. 49, pp. 2289–2298, 2010.
18. Pastuszko R., Piasecka M. *Pool boiling on surfaces with minifins and micro-cavities*. Journal of Physics: Conference Series, vol. 395, no. 12137, 2012.

19. Pastuszko R., Wójcik T.M. *Experimental investigations and a simplified model for pool boiling on micro-fins with sintered perforated foil*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 63, pp. 34–44, 2015.
20. Piasecka M. *Impact of selected parameters on refrigerant flow boiling heat transfer and pressure drop in minichannels*. *International Journal of Refrigeration*, vol. 56, pp. 198–212, 2015.
21. Piasecka M. *The use of enhanced surface in flow boiling heat transfer in a rectangular minichannel*. *Experimental Heat Transfer*, vol. 27, pp. 231–255, 2014.
22. Piasecka M. *Flow boiling heat transfer in a minichannel with enhanced heating surface*. *Heat Transfer Engineering*, vol. 35, pp. 903–912, 2014.
23. Piasecka M. *Heat transfer mechanism, pressure drop and flow patterns during FC-72 flow boiling in horizontal and vertical minichannels with enhanced walls*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 66, pp. 472–488, 2013.
24. Piasecka M., Hozejowska S., Poniewski M.E. *Experimental evaluation of flow boiling incipience of subcooled fluid in a narrow channel*. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 25, pp. 159–172, 2004.
25. Piasecka M., Maciejewska B. *Heat transfer coefficient during flow boiling in a minichannel at variable spatial orientation*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 68, pp. 459–467, 2015.
26. Piasecka M., Maciejewska B. *Enhanced heating surface application in a minichannel flow and the use of the FEM and Trefftz functions for the solution of inverse heat transfer problem*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 44, pp. 23–33, 2013.
27. 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.
28. Piasecka M., Poniewski M.E. *Hysteresis phenomena at the onset of subcooled nucleate flow boiling in microchannels*. *Heat Transfer Engineering*, vol. 25, pp. 44–51, 2004.
29. Piasecka M., Strąk K., Maciejewska B. *Calculations of flow boiling heat transfer in a minichannel based on Liquid Crystal and Infrared Thermography data*. *Heat Transfer Engineering*, vol. 38, no. 3, 2017, DOI: 10.1080/01457632.2016.118927.
30. Sobierska E., Kulenovic R., Mertz R. *Heat transfer mechanism and flow pattern during flow boiling of water in a vertical narrow channel-experimental results*. *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pp. 1172–1181, 2007.
31. Trieu Phan H., Caney N., Marty P., Colasson S., Gavillet J. *Flow boiling of water in a minichannel: The effects of surface wettability on two-phase pressure drop*. *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 1894–1905, 2011.
32. www.multimedia.3m.com/mws/media/648920/fluorinert-electronic-liquid-fc-72.pdf.
33. Yoo J., Estrada-Perez C.E., Hassan Y.A. *An accurate wall temperature measurement using infrared thermometry with enhanced two-phase flow visualization in a convective boiling system*. *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 90, pp. 248–266, 2015.
34. Zahid A., Palm B., Khodabandeh R. *Flow boiling heat transfer, pressure drop and dryout characteristics of R152a in a vertical mini-channel*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 66, pp. 137–149, 2015.

FLOW BOILING HEAT TRANSFER IN MINICHANNELS WITH FC-72 AND DISTILLED WATER AS WORKING FLUIDS

Abstract

The present paper compares local heat transfer coefficients obtained from the study of flow boiling heat transfer with FC-72 and distilled water in a vertical, asymmetrically heated minichannel at variate flow rate. The minichannel dimensions were as follows: depth – 1.7 mm, width - 16 mm, length - 180 mm. A 0.45 mm thick Haynes-230 plate was the heating element. The local heat transfer coefficients were determined by the one-dimensional method from the third type boundary condition at the interface between the boiling liquid and the heated surface. The temperature at the external face of the heated surface in direct contact with the ambient was registered with infrared thermography (IRT). One of the minichannel walls was made of a glass pane, thus allowing observations of two-phase flow structures. The measurement setup with its circuits and systems was described in detail. The literature review focused on the use of different working fluids in the studies conducted by other researchers. The dependencies of the heat transfer coefficient as a function of the distance from the inlet to the outlet of the minichannel at increasing heat flux were compared and analysed. Boiling curves obtained based on the studies with FC-72 and distilled water were plotted for variated flow rate. The results and recorded boiling structures were compared.

Autorzy:

mgr inż. **Kinga Strąk** - Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
dr hab. inż. **Magdalena Piasecka**, prof. PŚk - Politechnika Świętokrzyska w Kielcach