

## BADANIE WYMIANY CIEPŁA PODCZAS WRZENIA W PRZEPLYWIE FC-72 W MINIKANALACH PRZY UŻYCIU TERMOWIZJI I TERMOGRAFII CIEKŁOKRYSTALICZNEJ

### Streszczenie

*W artykule wyznaczono współczynnik przejmowania ciepła w badaniach wymiany ciepła podczas przepływu płynu chłodniczego FC-72 przez dwa pionowe, równoległe minikanale ogrzewane asymetrycznie. Temperaturę powierzchni grzejnej i płyty szklanej każdego z kanałów mierzono odpowiednio za pomocą dwóch bezkontaktowych metod pomiaru: termowizji (IRT) i termografii ciekłokrystalicznej (LCT). Na podstawie dostępnej literatury zaprezentowano zastosowanie obu bezstykowych metod pomiaru powierzchni temperatury w badaniach wymiany ciepła. W pracy omówiono stanowisko pomiarowe oraz pokazano uzyskane wyniki pomiarów temperatury powierzchni w formie: termogramów metod: IRT i LCT. Przedstawiono i omówiono uzyskane zależności współczynnika przejmowania ciepła w funkcji długości minikanalu podczas zwiększania strumienia ciepła. Zastosowanie obu bezkontaktowych metod pomiaru temperatury pozwoliło na uzyskanie pełniejszych danych pomiarowych, dokładne wyznaczenie ilości ciepła generowanego z folii grzejnej do płyty szklanej, a w efekcie otrzymania bardziej wiarygodnych wartości lokalnego współczynnika przejmowania ciepła.*

### WSTĘP

Miniaturyzacja to występujący trend zmniejszania gabarytów urządzeń, który rozwija się stosunkowo szybko w wielu dziedzinach życia codziennego, począwszy od elektroniki, optyki aż do przemysłu. Głównym problemem miniaturyzacji urządzeń jest chłodzenie ich podzespołów, gdyż wytwarzają one duże strumienie ciepła. Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu jest zastosowanie zjawiska wymiany ciepła, któremu towarzyszy zmiana stanu skupienia. Proces wymiany ciepła w mini przestrzeniach jest trudny do zaobserwowania, zweryfikowania, ale pozwala na uzyskanie intensywnej wymiany ciepła w minikanalach [4, 14].

Termowizja i termografia ciekłokrystaliczna to bezkontaktowe metody pomiaru temperatury badanej powierzchni, które znajdują szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach życia. Przykładem takiej dziedziny jest wymiana ciepła w przepływie przez kanały o różnych wymiarach i przekrojach (również w kanałach o niewielkich wymiarach: mikro- czy minikanalach), dla której te metody są pomocnym narzędziem do badań i analizy procesów wymiany ciepła, również przebiegających ze zmianą fazy.

Zastosowanie pomiarów termowizyjnych (IRT) w badaniach naukowych znacząco poprawia jakość uzyskiwanych informacji o procesach termodynamicznych czy wymianie ciepła. Wszędzie tam, gdzie występuje generowanie lub przesył energii, zastosowanie IRT sprawia, że kontrola procesu jest szybsza, łatwiejsza, dokładniejsza oraz niezależna od odległości lub dostępności pomiaru [8]. Termowizja to technika pomiaru temperatury wykorzystująca detekcję promieniowania podczerwonego. W porównaniu do standardowych czujników pomiaru temperatury (np. termopar) IRT jest lepszym rozwiązaniem ze względu na to, że kamera termowizyjna posiada większą czułość pomiarów, krótki czas reakcji oraz pozwala na otrzymanie dwuwymiarowego pola temperatury badanej powierzchni. Kamera termowizyjna może być wykorzystywana do: analizy procesów wymiany ciepła, złożonych badaniach przepływu płynu, oceny średnich konwekcyjnych strumieni ciepła czy badań zachowania pola powierzchni przepływu [1]. Termowizję stosować można przykładowo do identyfikacji wymiany ciepła w początkowym okresie rozwoju wrzenia pęcherzykowego podczas przepływu płynu

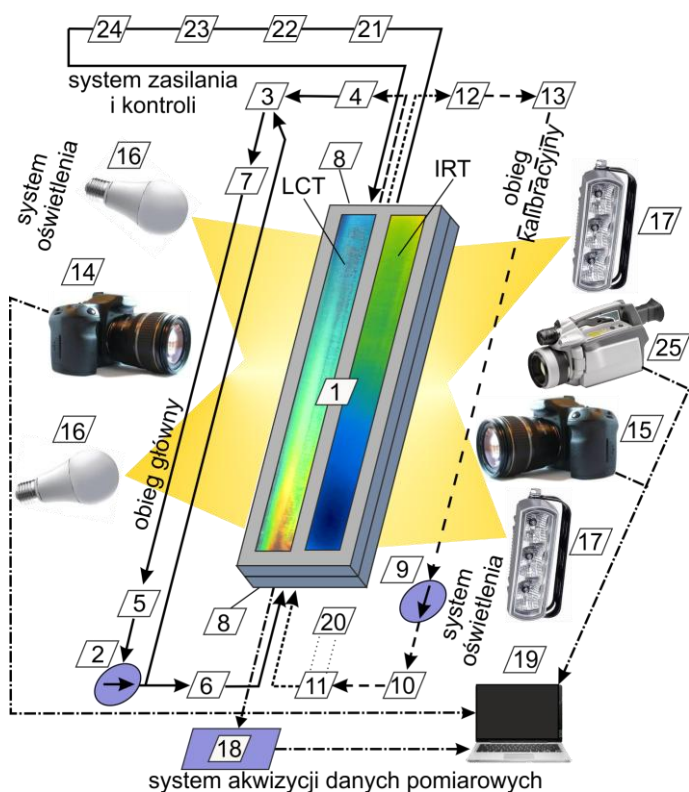
roboczego przez minikanal o przekroju kwadratowym. We wspomnianych badaniach termografia IR umożliwiła pomiar przestrzenny o wysokiej rozdzielczości lokalnej temperatury ścianki przy założeniu jednowymiarowego przepływu ciepła w kierunku poprzecznym [4]. Pomiar temperatury ścianki za pomocą IRT przeprowadzono w badaniach wymiany ciepła dla rozwoju wrzenia pęcherzykowego wraz z analizą zjawiska „dryout” dla różnych płynów chłodniczych [7]. Badania wykorzystujące kamerę IR, pozwoliły na wyznaczenie lokalnego współczynnika przejmowania ciepła podczas wymiany ciepła dla przepływu pęcherzykowego Taylora w minikanale o kwadratowym przekroju poprzecznym [5]. Przy jej użyciu określono pole temperatury powierzchni grzejnej podczas wrzenia rozwiniętego w przepływie oraz warunki krytycznego strumienia ciepła [15].

Oprócz termowizji do bezstykowych metod pomiaru temperatury powierzchni, wykorzystano również termografię ciekłokrystaliczną (LCT), w której powierzchnię grzejną pokrywa się czarną farbą z warstwą termoczułych ciekłych kryształów [11]. Ciekłe kryształy to związki organiczne, które posiadające zdolność płynięcia i wykazujące fazę pośrednią pomiędzy fazą ciekłą, a stałą [2]. Są one przygotowywane przez producenta do wskazywania barwy w określonych zakresach temperatury i wykazują zmiany barwy w całym zakresie widma od czerwonego (dolny zakres) do niebieskiego (górny zakres) w tzw. "paśmie aktywnym" danej mieszanki ciekłokrystalicznej [11]. Wartości odcieni koloru są przypisane odpowiedniej wartości temperatury. Przed przystąpieniem do właściwych badań ciekłe kryształy należy skalibrować. Termografię ciekłokrystaliczną stosuje się w badaniach wymiany ciepła podczas przepływu płynu w minikanalach do jednoczesnej rejestracji rozkładu temperatury na powierzchni oraz zobrazowaniu ruchu pęcherzyków podczas wrzenia w przepływie w wąskim kanale poziomym [11] oraz pionowym [9]. Za pomocą termografii ciekłokrystalicznej określono lokalny współczynnik przejmowania ciepła podczas początkowego wrzenia w przepływie dla radiatora mikrokanalowego krzemowego [3]. Termoczułe ciekłe kryształy, oprócz analizy wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie, znalazły również zastosowanie do badań wrzenia w objętości, gdzie za ich pomocą określa się oscylujące pole temperaturowe, dynamikę zarodkowania wrzenia oraz przepływ dwufazowy [6].

Głównym celem artykułu jest wyznaczenie lokalnego współczynnika przejmowania podczas rozwiniętego wrzenia w przepływie przez mini kanał prostokątny. Do obliczeń zastosowano uproszczony jednowymiarowy model przepływu ciepła przez główne elementy modułu testowego z pionowym minikanalem. Współczynnik przejmowania ciepła wyznaczono na styku powierzchnia (folia) grzejna - ciecz wrząca w kanale, gdzie czynnikiem roboczym jest FC-72. Do osiągnięcia przedstawionego celu wykorzystano dwie bezkontaktowe metody pomiaru temperatury powierzchni grzejnej: termowizję i termografię ciekłokrystaliczną.

## 1. STANOWISKO BADAWCZE Z MODUŁEM POMIAROWYM

Stanowisko badawcze składa się z kilku systemów: czynnika roboczego FC-72 (obieg główny), akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych, zasilania oraz kalibracji. Główną częścią składową całego stanowiska jest moduł pomiarowy z dwoma równoległymi minikanalami o przekroju prostokątnym.

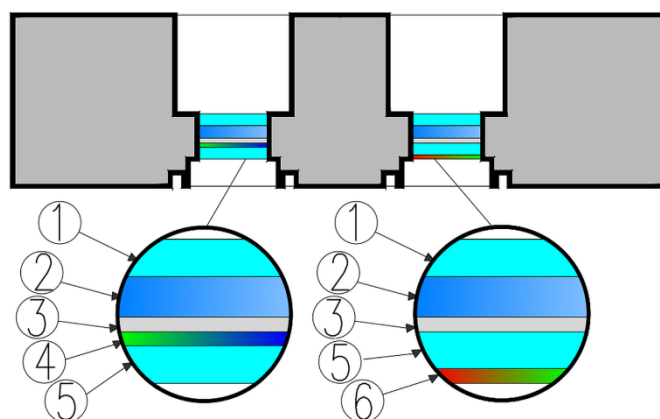


**Rys. 1.** Schemat stanowiska badawczego wraz z jego głównymi obiegami: 1-moduł pomiarowy z minikanalami, 2,9-pompa przepływowa wirnikowa, 3-regulator ciśnienia, 4 wymiennik ciepła (rura w rurze), 5,10,13-filtry, 6-zespół rotametrów, 7,12-separatory powietrza, 8-przetworniki ciśnienia, 11-przepływowy podgrzewacz wody, 14-aparat cyfrowy lustrzanka, 15-aparat cyfrowy, 16-światłówki LED, 17-lampy halogenowe, 18-stacja akwizycji danych pomiarowych, 19-komputer, 20-autotransformator, 21-spawarka inwertorowa, 22-bocznik, 23-amperomierz, 24-woltmierz, 25-kamera termowizyjna

Każdy z kanałów posiada takie same wymiary: głębokość - 1 mm, szerokość - 24 mm i długość - 360 mm (rysunek 1), przy czym moduł testowy ustawiony jest pionowo. Z jednej strony modułu realizuje się jednoczesny pomiar pola temperatury powierzchni grzejnej metodą termografii ciekłokrystalicznej (minikanal LCT) i metodą termowizji (minikanal IRT). Z drugiej strony modułu obserwuje się struktury przepływu dwufazowego. Na rysunku 2 przedsta-

wiono przekrój modułu pomiarowego, gdzie głównym elementem wspólnym obu kanałów jest folia grzejna (3) wykonana ze stopu Haynes-230 firmy Haynes Int. (USA) [13]. Pozostałe elementy wspólne dla obu minikanalów (2) to: dwie płyty szklane: jedna (1) stykająca się bezpośrednio z płynem w minikanale.

W minikanale IRT na płytę szklaną (5) napylono warstwę czarnej farby podkładowej (6) o znanym współczynniku emisyjności (0,83) [10]. W tym przypadku mierzy się temperaturę zewnętrznej powierzchni płyty szklanej przy użyciu kamery termowizyjnej. Podstawowymi elementami systemu akwizycji i przetwarzania danych i obrazów są: aparat cyfrowy *Canon Power Shot G-11* (termogramy LCT), aparat cyfrowy typu lustrzanka *Canon EOS 550D* (obrazy struktur przepływu płynu), kamera termowizyjna typ *SC640* firmy *Flir* (termogramy IRT), stacja akwizycji danych pomiarowych *DaqLab 2005* wraz z odpowiednim oprogramowaniem komputerowym (akwizycja podstawowych danych eksperymentalnych), dwa systemy oświetlenia: wykorzystujące lampy halogenowe (oświetlenia struktur przepływu), świetlówki LED - emitującymi zimne światło białe (badania z LCT).



**Rys. 2.** Przekrój modułu pomiarowego z dwoma równoległymi kanałami: 1, 5-płyta szklana, 2-minikanal, 3-folia grzejna, 4-warstwa ciekłych kryształów na czarnej farbie podkładowej, 5-czarna farba podkładowa o znanym współczynniku emisyjności do pomiarów termowizyjnych

## 2. METODOLOGIA BADAŃ

Przed rozpoczęciem badań niezbędne jest przeprowadzenie kalibracji ciekłych kryształów. Ta procedura pozwala przyporządkować zaobserwowanej barwie ciekłych kryształów odpowiadającą jej temperaturę powierzchni. W efekcie procesu kalibracji otrzymywana jest tzw. krzywa kalibracyjna [12], zależność temperatury w funkcji barwy *hue*. Kamera termowizyjna kalibruje się automatycznie po włączeniu, jednak należy ustawić odpowiednie parametry panujące w badanym pomieszczeniu. Do parametrów zalicza się: odległość od badanego obiektu, temperatura otoczenia i wilgotność względna. Po odpowietrzeniu modułu badawczego następuje przepływ laminarny płynu chłodniczego FC-72 w głównym obiegu stanowiska pomiarowego. Po uzyskaniu ustabilizowanych wartości ciśnienia i natężenia przepływu, stopniowo zwiększa się moc elektryczną dostarczaną do folii grzejnej. Tym samym zwiększa się strumień ciepła przenoszony do płynu przepływającego przez minikanale. Prowadzi to do inicjacji, a następnie rozwoju wrzenia pęcherzykowego w minikanalach. Pomiaru prowadzono przy ustalonym przepływie ciepła w stabilnych warunkach cieplnych i przepływowych.

Pomiar temperatury powierzchni grzejnej przy zastosowaniu dwóch bezstykowych metod pomiaru temperatury powierzchni realizowano jednocześnie w obu kanałach. W minikanale LCT pomiar temperatury folii grzejnej wykonywano przy zastosowaniu

termografii ciekłokrystalicznej. Natomiast w minikanale IRT pomiar temperatury płyty szklanej z naniesioną warstwą czarnej farby podkładowej umożliwia kamera termowizyjna. Dwufazowe struktury płynu w minikanalach są rejestrowane za pomocą aparatu cyfrowego typu lustrzanka, jednak to zagadnienie nie jest omawiane w niniejszym artykule.

W wyniku pomiarów z wykorzystaniem LCT otrzymano barwne obrazy, które za pomocą odpowiedniego programu w języku Delphi, po dokonaniu kalibracji, pozwalają na uzyskanie danych temperaturowych powierzchni grzejnej [13]. W przypadku kamery termowizyjnej otrzymywano wizualny zapis obrazu (termogram), który jest jakościową (obraz) i ilościową (temperatura) informacją o badanym obiekcie [17].

Współczynnik przejmowania ciepła przy założeniu jednowymiarowego modelu przepływu wyznaczano na podstawie wyników temperatury powierzchni z wykorzystaniem termowizji i termografii ciekłokrystalicznej. Lokalną wartość współczynnika przejmowania ciepła na styku folia grzejna - ciecz robocza wyznaczono z warunku brzegowego trzeciego rodzaju. W artykule wartości tego współczynnika określono tylko dla obszaru nasyconego wrzenia pęcherzykowego.

### 3. OBLICZENIA WSPÓŁCZYNNIKA PRZEJMOWANIA CIEPŁA

Model jednowymiarowy uwzględnia kierunek przepływu ciepła, który jest prostopadły do kierunku przepływu cieczy w minikanale. W dwóch równoległych minikanalach realizowano jednoczesny pomiar temperatury na folii grzejnej i na płycie szklanej z naniesioną odpowiednią warstwą czarnej farby przy zastosowaniu odpowiednio metodach LCT i IRT. Strumień ciepła generowany przez folię grzejną wyznaczono oddzielnie dla każdego z minikanalów i przedstawiono poniżej jako gęstości strumienia ciepła  $q_w$ .

$$q_w = \frac{I \cdot \Delta U}{A_F} \quad (1)$$

gdzie:  $I$  – natężenie prądu,  $\Delta U$  – spadek napięcia,  $A_F$  – powierzchnia folii grzejnej przypadająca na każdy z minikanalów.

Strumień ciepła przekazywany do cieczy roboczej przepływającej przez oba minikanale to różnica między strumieniem ciepła generowanym przez folię grzejną i strumieniem ciepła przekazywanym do płyty szklanej według równania:

$$q_w(x) = q_w - q_{wl}(x) \quad (2)$$

gdzie:  $q_{wl}$  – gęstość strumienia ciepła przekazywany z folii grzejnej do płyty szklanej proporcjonalnie dla każdego z minikanalów,  $x$  – odległość od wlotu minikanalu w kierunku przepływu.

Strumień gęstości ciepła przekazywany z folii grzejnej do płyty szklanej obliczano na zasadzie przewodzenia ciepła z wykorzystaniem prawa Fouriera. Temperatura zewnętrznej powierzchni płyty szklanej z naniesioną czarną farbą mierzono za pomocą termowizji (minikanal IRT), natomiast temperaturę folii grzejnej wyznaczono za pomocą termografii ciekłokrystalicznej (minikanal LCT). Założono, że temperatura na styku folia grzejna–ciecz robocza posiada taką samą wartość. Strumień ciepła przekazywany od folii grzejnej do płyty szklanej ma następującą postać:

$$q_{wl}(x) = \frac{\lambda_G}{\delta_G} [(T_F^{LCT}(x, \delta_G) - T_G^{IRT}(x, 0))] \quad (3)$$

gdzie:  $\delta_G$  – grubość płyty szklanej,  $\lambda_G$  – współczynnik przewodzenia ciepła płyty szklanej,  $T_F^{LCT}$  – temperatura folii grzejnej uzyskana za pomocą LCT,  $T_G^{IRT}$  – temperatura płyty szklanej otrzymana z zastosowaniem metody IRT.

Strumień ciepła transportowany z folii grzejnej do płyty szklanej  $q_{wl}$  posiada stosunkowo niską wartość, gdyż stanowi ok. 3,4 % całkowitego strumienia ciepła generowanego przez folię grzejną  $q_w$ .

W obliczeniach modelu jednowymiarowego założono równość temperatur  $T_F(x, \delta_G + \delta_F) = T_F^{LCT}(x, \delta_G)$  ze względu na niewielką grubość folii grzejnej (ok. 0,1 mm). W badaniach przeprowadzonych przez autorów, stwierdzono, że gradient temperatury wzdłuż grubości folii był bardzo niski i wpływa w niewielkim stopniu na wartość współczynnika przejmowania ciepła [14]. Lokalną wartość współczynnika przejmowania ciepła na styku folia grzejna-ciecz robocza wyznaczono z prawa Newtona:

$$\alpha_{1D}(x) = \frac{q_w(x)}{T_F^{LCT}(x, \delta_G) - T_{sat}(x)} \quad (4)$$

gdzie:  $T_{sat}(x)$  – temperatura saturacji obliczana na podstawie liniowego rozkładu ciśnienia wzdłuż odległości od wlotu do wylotu minikanalu.

### 4. DOKŁADNOŚĆ METOD POMIAROWYCH

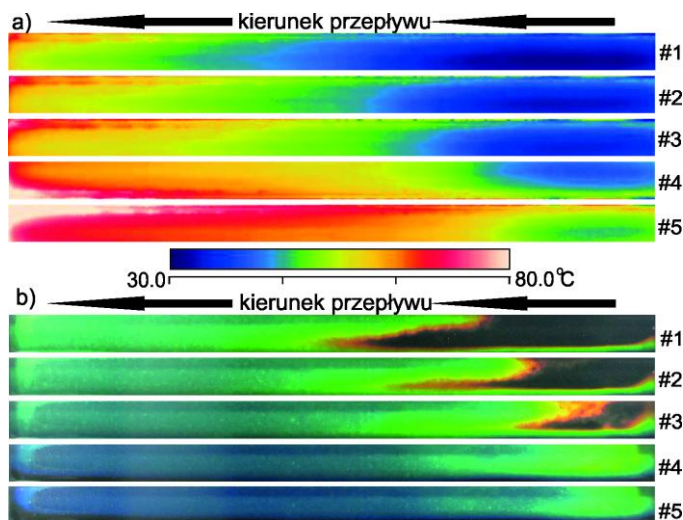
Kamera termowizyjna typ SC640 firmy FLIR wyposażona jest w oprogramowanie komputerowe z systemem pracującym w zakresie widmowym od 7,5 do 13  $\mu\text{m}$  [16]. Obraz kamery termowizyjnej zapisywany jest w systemie cyfrowym z częstotliwością obrazu 30 Hz. Kamera posiada dokładność odczytu  $\pm 2^\circ\text{C}$  lub  $\pm 2\%$  odczytu i jest przystosowana do zdalnego pomiaru w czasie rzeczywistym o rozdzielczości termicznej 0,06  $^\circ\text{C}$  dla 30  $^\circ\text{C}$ . Urządzenie IR umożliwia uzyskanie wyników w pożądanej formie. Otrzymujemy pomiar temperatury w określonym punkcie albo wzdłuż linii wykreślonej w dowolnym miejscu termogramu [16].

Dokładność pomiaru temperatury folii grzejnej z zastosowaniem termografii ciekłokrystalicznej wyniósł omówiono w pracy [12]. Średni błąd pomiaru temperatury folii grzejnej z zastosowaniem termografii ciekłokrystalicznej w przybliżeniu wyniósł około 0,86 K.

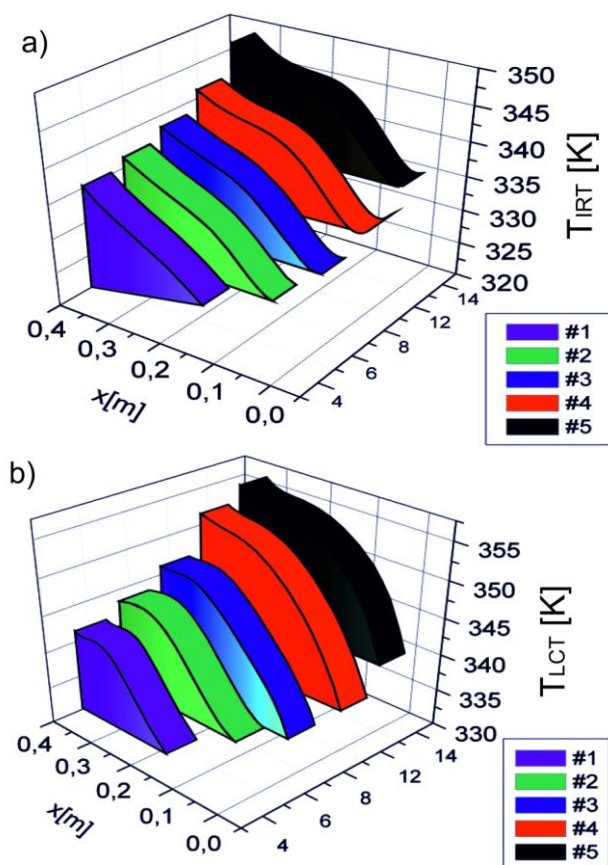
### 5. WYNIKI

Rysunek 3 prezentuje termogramy serii pomiarowej (obrazy rozkładu barwy na badanej powierzchni) podczas zwiększania strumienia ciepła doprowadzanego do powierzchni grzejnej otrzymane odpowiednio przy zastosowaniu: IRT (rys. 3a) i LCT (rys. 3b). Wyniki temperatury otrzymane z pomiarów zostały wygładzone z wykorzystaniem wielomianu 5-ego stopnia i zaprezentowane na rysunku 4 w formie wykresów 3D. Na rysunku 4a przedstawiono zależności temperatury powierzchni płyty szklanej z naniesioną czarną farbą w funkcji odległości od wlotu do kanału (uzyskana poprzez zastosowanie IRT). Rysunek 4b obrazuje wykres temperatury powierzchni folii grzejnej w funkcji odległości od wlotu do kanału (otrzymany za pomocą LCT). Na wykresach temperatury (rysunek 4) dla obu metod pomiarowych można zauważyć, że podczas wzrostu strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej, wzrasta stopniowo temperatura powierzchni.





**Rys. 3.** Termogramy serii pomiarowej a) powierzchni zarejestrowanej kamerą termowizyjną a) powierzchni z warstwą ciekłokrystaliczną; parametry eksperymentalne: a,b): prędkość przepływu płynu 0,17 m/s, ciśnienie na wlocie do kanału: ok. 148 kPa, niedogrzanie cieczy do temperatury nasycenia na wlocie do kanału 39,7 K; strumień ciepła: #1) 13,039 kW/(m<sup>2</sup>K), #2) 14,160 kW/(m<sup>2</sup>K), #3) 16,219 kW/(m<sup>2</sup>K), #4) 18,453 W/(m<sup>2</sup>K), #5) 19,889 W/(m<sup>2</sup>K)

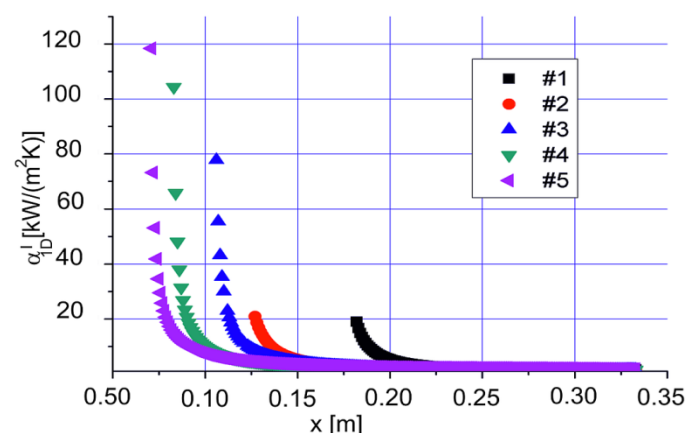


**Rys. 4.** Zależności: a) temperatura powierzchni płyty szklanej od odległości od wlotu minikanalu, otrzymana przy wykorzystaniu termowizji, b) temperatura powierzchni grzejnej od odległości od wlotu minikanalu, otrzymana przy wykorzystaniu techniki ciekłokrystalicznej; parametry eksperymentalne jak podane dla rys. 3

Analiza wykresy temperatury otrzymanych przy wykorzystaniu dwóch technik bezstykowych wskazuje na podobny równoległy przebieg. Dane temperaturowe otrzymane z metody LCT osiągają wyższe wartości, ponieważ pomiar wykonywany był bezpośrednio

na folii grzejnej. Natomiast wartości temperatury otrzymane z termowizji wykazują niższe wartości (o ok. 7 K), ponieważ pomiary wykonywane były na zewnętrznej powierzchni płyty szklanej. Straty ciepła z folii grzejnej do powierzchni płyty szklanej, wyznaczone z równania (3), stanowią kilka procent całkowitego strumienia ciepła generowanego przez folię grzejną. Część danych pomiarowych dla obu metod detekcji temperatury dotyczących wlotu i wylotu do/z minikanalu (ok. 15%) została pominięta w analizie ze względu na największe błędy metody pomiarowych.

Rysunek 5 przedstawia zależność współczynnika przejmowania ciepła na styku folia grzejna-płyn w funkcji odległości od wlotu kanału dla pięciu wzrastających strumieni ciepła. Współczynnik przejmowania ciepła zmniejsza się znacząco wraz ze wzrostem odległości od wlotu kanału. Jest to spowodowane zwiększaniem udziału objętościowego pary w mieszaninie cieczy i gazu. Najniższe wartości współczynnika odnotowano przy wylocie kanału. Wraz ze wzrostem strumienia ciepła współczynnik przejmowania ciepła osiągał wyższe wartości na wlocie kanału.



**Rys. 5.** Zależności współczynnika przejmowania ciepła, w funkcji odległości od wlotu kanału; parametry eksperymentalne jak podane dla rys. 3

## PODSUMOWANIE

Równoczesne zastosowanie dwóch technik bezkontaktowych pomiarów temperatury (LCT i IRT) w module testowym z minikanalami pozwoliło uzyskać szczegółowe dane do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła na styku folia grzejna-płyn. Analiza lokalnych wartości tego współczynnika wskazuje, że jego wartości gwałtownie spadają wraz z odległością od wlotu kanału. Dla wyższych udziałów fazy gazowej, w mieszaninie dwufazowej podczas rozwiniętego wrzenia, wartości współczynników przejmowania ciepła zmniejszają się w łagodniejszy sposób. Wartości współczynnika przejmowania ciepła na wylocie kanału są nawet 100-krotnie niższe w porównaniu do najwyższych wartości osiągniętych przy jego wlocie, a z kolei na wylocie - osiągają wartości współczynnika przejmowania ciepła zbliżone do konwekcji jednofazowej.

## BIBLIOGRAFIA

1. Carlomagno G. M., Cardone, G., *Infrared thermography for convective heat transfer measurements*. Experimental Fluids vol. 49, pp. 1187–1218, 2010.
2. Janik J., *Ciekłe kryształy*, Foton 94, 2006.
3. Megahed A., *Local flow boiling heat transfer characteristics in silicon microchannel heat sinks using liquid crystal thermography*. International Journal of Multiphase Flow, vol. 39, pp. 55–65, 2012.

4. Mehta B., Abhimanyu D., Khandekar S., *Estimation of laminar single-phase heat transfer coefficient in the entrance region of a square minichannel using infra-red thermography*. Proceedings of the 21st National & 10th ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference, December 27-30, IIT Madras, India ISHMT\_IND\_02\_041, 2011.
5. Mehta B., Khandekar S., *Measurement of local heat transfer coefficient during gas-liquid Taylor bubble train flow by infra-red thermography*. International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 45, pp. 41–52, 2014.
6. Miglani A., Joo D., Basu S., Kumar R., *Nucleation dynamics and pool boiling characteristics of high pressure refrigerant using thermochromic liquid crystals*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 60, pp. 188–200, 2013.
7. Mikielewicz 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, 2014.
8. Minkina W., *Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody*. Częstochowa 2014.
9. Murshed S.M. S., Vereen K., Strayer D., Kumar, R., *An experimental investigation of bubble nucleation of a refrigerant in pressurized boiling flows*. Energy, vol. 35, pp. 5143–5150, 2010.
10. Orzechowski T., *Wymiana ciepła przy wrzeniu na żebrach z mikropowierzchnią strukturalną*. Monografie, studia, rozprawy, nr 39, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2003.
11. Ozer A.B., Oncel A.F., Hollingsworth D.K., and 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.
12. Piasecka M., *Determination of the temperature field using liquid crystal thermography and analysis of two-phase flow structures in research on boiling heat transfer in a minichannel*. Metrology and Measurement Systems, vol. XX, No. 2, pp. 205–216, 2013.
13. Piasecka M., *Monografia. Wrzenie w przepływie na rozwiniętych powierzchniach minikanalów*, Monografie, studia, rozprawy, nr M61, Kielce 2014.
14. Piasecka M., Poniewski M.E., *Flow boiling incipience in minichannels*. Proc. of 3rd Int. Symp. on Two-phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa, Italy, paper No. mt-13, 2004.
15. Seo H., Chu J. H., Kwon S.-Y., Bang I. Ch., *Pool boiling CHF of reduced graphene oxide, graphene, and SiC-coated surfaces under highly wettable FC-72*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 82, pp. 490–502, 2015.
16. *User's manual ThermaCam B640, P640, SC640*, Publ. No 155850 Rev.a 201-ENGLISH (EN), 2007.
17. Ziętala K., Piasecka M., *Bezkontaktowe metody pomiaru temperatury powierzchni stosowane w badaniach wymiany ciepła w minikanalach*. Logistyka 2014, nr 6, s. 11784-11793.

## A STUDY OF FLOW BOILING FC-72 IN MINICHANNEL BY USING INFRARED THERMOGRAPHY AND LIQUID CRYSTAL THERMOGRAPHY

### Abstract

*The article presented calculate heat transfer coefficient on FC-72 flow boiling heat transfer in two parallel asymmetrically heated vertical minichannels. The temperature of the heated foil and glass plate of each channel was measured by applying two methods: infra-red thermography (IRT) and liquid crystal thermography (LCT). Based on the available literature demonstrates the use of both the contactless methods for measuring the surface temperature in the study heat transfer. The paper discusses the workstation and the results of the measurements are shown in graphical form as thermographs method: IRT and LCT. Presented and discussed obtained depending on the heat transfer coefficient as a function of the length of minichannel while increasing heat flux. The use of both contactless of taking measurements in the temperature field methods made it possible to obtain a more complete measurement data, accurate determination of the amount of heat generated from the heating foil to a glass plate, and as a result obtain a more reliable value of the local heat transfer coefficient.*

Autorzy:

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