

## Magdalena PIASECKA, Robert PASTUSZKO

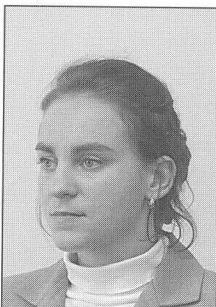
POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA W KIELCACH, WYDZIAŁ MECHATRONIKI I BUDOWY MASZYN, KATEDRA TERMODYNAMIKI I MECHANIKI PŁYNÓW

# Wyznaczanie pól temperatury przy zastosowaniu termografii ciekłokrystalicznej oraz kamery termowizyjnej w badaniach wymiany ciepła w minikanalach

Dr inż. Magdalena PIASECKA

Adiunkt w Katedrze Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Obroniła pracę doktorską na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn w roku 2002. Przedmiotem jej zainteresowania jest wymiana ciepła przy wrzeniu w przepływie czynników chłodniczych przez minikanaly, ze szczególnym zwróceniem uwagi na inicjację wrzenia pęcherzykowego. W swoich badaniach wykorzystuje termografię ciekłokrystaliczną. Jest autorem ponad 20 artykułów z tej tematyki.

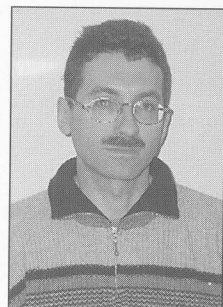
e-mail: [tmpmj@tu.kielce.pl](mailto:tmpmj@tu.kielce.pl)



Dr inż. Robert PASTUSZKO

Adiunkt w Katedrze Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Zainteresowania naukowe: wymiana ciepła przy wrzeniu na powierzchniach strukturalnych, chłodzenie układów wydzielających duże strumienie ciepła i elementów elektronicznych. Jest autorem ponad 20 publikacji, w latach 2001 - 2004 kierował projektem badawczym KBN Analiza wymiany ciepła przy wrzeniu na powierzchniach ożebrowanych pokrytych folią perforowaną i warstwą porowatą.

e-mail: [tmprp@tu.kielce.pl](mailto:tmprp@tu.kielce.pl)



### Streszczenie

W artykule omówiono wykorzystanie dwu bezstykowych metod do wyznaczenia pól temperatury w badaniach wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie przez minikanal: termografię ciekłokrystaliczną oraz metodę termowizyjną. Termografię ciekłokrystaliczną wykorzystano do identyfikacji rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej minikanalu, co pozwoliło na określenie inicjacji wrzenia. Za pomocą kamery termowizyjnej zarejestrowano rozkład temperatury na powierzchni szkła (izolacja) przykrywającego powierzchnię grzejną, co umożliwiło dokładne oszacowanie strat ciepła do otoczenia. Załączono przykładowe wyniki otrzymane przy wykorzystaniu obu technik pomiarowych.

### Abstract

The paper discusses the application of two contactless methods for the determination of temperature fields in heat transfer investigations of minichannel flow boiling. They are liquid crystal thermography and thermovision. The first one is applied to the identification of temperature distribution on the minichannel heating surface, Fig. 1. It requires, however, a complex system of measurement data acquisition and processing, Fig. 2. Hue distribution on the surface, corresponding to the temperature distribution on the heating foil, makes it possible, first of all, to specify the boiling incipience location when the heat flux increases, Fig. 3. With the use of IR camera (Fig. 5) for the registration of temperature distribution on the surface of the glass covering the heating surface (Fig. 6), it is possible to accurately estimate heat losses to the environment. Exemplary results obtained with both measurement techniques are included. With liquid crystal thermography, the heating foil temperature dependence on the distance from the minichannel inlet was found out (Fig. 4a). Owing to that, it was possible to determine local heat transfer coefficients at a distance from the minichannel inlet, Fig. 4b. Heat losses, estimated with thermovision, turned out to be very small and could be disregarded.

**Słowa kluczowe:** pomiar temperatury, wrzenie w przepływie, minikanal, termografia

**Key words:** temperature measurement, flow boiling, minichannel, liquid crystal thermography, IR camera

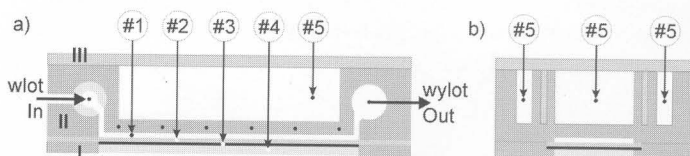
## 1. Wstęp

Zagadnienie przekazywania ciepła do wrzącej cieczy przepływającej przez minikanaly, o różnej geometrii i orientacji przestrzennej, znajduje szerokie zastosowanie w nowoczesnych urządzeniach technicznych generujących duże strumienie ciepła, takich jak reaktory jądrowe, aparatura elektroniczna i układy scalone o bardzo wysokiej skali integracji, silniki spalinowe, turbiny gazowe, źródła promieniowania rentgenowskiego i świetlnego dużej mocy oraz zwarte wymienniki ciepła. Wrzenie jako bardzo efektywny proces wymiany ciepła wykorzystywane jest szeroko w energetyce, inżynierii chemicznej i jądrowej, a zatem w gałęziach przemysłu, gdzie zachodzi wymiana strumieni ciepła o dużej gęstości. Jedną z istotnych cech wrzenia jest wysoka wartość współczynnika przemieszczania ciepła, z czego wynika możliwość przenoszenia dużych strumieni ciepła. Jednocześnie spełnienie przeciwstawnych wymagań, tj. uzyskanie możliwie dużego strumienia ciepła przy małej różnicy temperatur między powierzchnią grzejną i cieczą nasyconą oraz

małych wymiarów układu wymiany ciepła, jest możliwe dzięki wykorzystaniu zjawiska zmiany stanu skupienia, towarzyszącemu wrzeniu. Identyfikacja pól temperatury, niezbędna do rozwiązań zagadnień wymiany ciepła przy wrzeniu, zwykle sprawia trudności eksperymentalne w układach z minikanalami. Metoda termografii ciekłokrystalicznej oraz metoda termowizyjna pozwalają na dokładny pomiar temperatury powierzchni. Zastosowanie obu metod wymaga rozbudowanego układu do akwizycji i przetwarzania danych i obrazu kolorowego, przy czym metody te wykazują wiele innych ograniczeń. W przypadku termografii przed właściwymi badaniami niezbędna jest kalibracja barwy powierzchni z ciekłymi kryształami względem odpowiadającej barwie temperatury.

## 2. Moduł pomiarowy, sformułowanie zagadnienia

Najważniejszym elementem stanowiska badawczego jest moduł pomiarowy (rys. 1) z pionowym minikanalem o głębokości: 0,7; 1; 1,5 oraz 2 mm, przez który przepływa płyn chłodniczy (R 11, R 123). Jedną ze ścian kanału stanowi folia grzejna zasilana prądem stałym o kontrolowanym natężeniu. Na folii, na czarnej farbie podkładowej znajduje się warstwa ciekłych kryształów. Obserwację zmian barwy powierzchni folii umożliwia przesłonięty szklaną szybą otwór. Kanały pomocnicze w tylnej pokrywie modułu umożliwiają utrzymanie pożądanej temperatury na ścianie minikanalu, uznawanej za quasiadiabatyczną. Celem badań jest identyfikacja początku wrzenia oraz wyznaczenie lokalnych współczynników przemieszczania ciepła na powierzchni oddzielającej folię grzejną i płyn chłodniczy. Obliczenia współczynników przemieszczania ciepła dokonywane są na podstawie pomiaru temperatury w wewnętrznych punktach układu, tj. temperatury folii grzejnej od strony szkła, mierzonej dzięki termografii ciekłokrystalicznej oraz zadanej mocy elektrycznej, dostarczanej do grzejnika, według modelu jedno- i dwuwymiarowego przepływu ciepła przez folię i szkło [1, 2]. W modelu dwuwymiarowym zakłada się brak strat ciepła do otoczenia lub też oszacowuje się rozkład temperatury na szkło od strony zewnętrznej przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej [2].



Rys. 1. Schemat modułu pomiarowego z minikanalem, a) przekrój wzdłużny, b) przekrój poprzeczny, I-pokrywa przednia, II-część główna z minikanalem i kanałami pomocniczymi, III-pokrywa tylna, #1-minikanal, #2-folia grzejna, #3-ciekłe kryształy, #4-szkło, #5-woda (o regulowanej temperaturze), • termopara  
Fig. 1. Schematic diagram of the test section with a minichannel: a) longitudinal section, b) crosssection, I-front cover, II-main part with minichannel of preset depth and auxiliary channels, III-rear cover, #1-minichannel, #2-heating foil, #3-liquid crystals, #4-glass, #5-water (temperature controlled), • thermocouple

### 3. Techniki wykorzystywane do pomiaru pól temperatury

#### 3.1. Termografia ciekłokrystaliczna

##### 3.1.1. Charakterystyka techniki

Termografia ciekłokrystaliczna jest doskonałą i uznaną metodą pomiarową stosowaną w różnych dziedzinach techniki. Unikalne własności ciekłych kryształów, sygnalizowane poprzez zmianę barwy i/lub jej intensywności, można wykorzystać do obserwacji bardzo małych zmian temperatury, naprężeń, promieniowania elektromagnetycznego i zmian własności czynników chemicznych. W zastosowaniach ciekłych kryształów wykorzystuje się własność selektywnego odbicia światła od płaszczyznowo zorientowanych warstw tych substancji. Barwa światła selektywnie odbitego zależy od wielu czynników zewnętrznych, takich jak: oddziaływania mechaniczne, kąt padania światła białego, itd. Szczególnie ważna dla zastosowań w dziedzinie wymiany ciepła jest zależność tej barwy od temperatury obserwowanej powierzchni. Warstwa ciekłych kryształów substancji, pokrywająca powierzchnię ciała stałego, dokładnie odwzorowuje rozkład temperatury tej powierzchni, w postaci barwnej mapy. Zakres temperatury dla której cząstki termoczułych ciekłych kryształów odbijają widmo widzialne nazywany jest *pasmem aktywnym*. Przystępując do badań termograficznych, należy dobrać odpowiednią mieszaninę ciekłokrystaliczną w taki sposób, aby w najniższej temperaturze, jaka wystąpi na badanej powierzchni, barwa selektywnego odbicia była czerwona, a następnie zmieniała się w sekwencji widma widzialnego (czerwień, żółty, zieleń, niebieski, fiolet) w barwę fioletową występującej przy najwyższej temperaturze. Gdy temperatura powierzchni jest wyższa lub niższa od granic pasma aktywnego, widziana jest jedynie barwa czarna podłoża absorpcyjnego. Pasma aktywne wynosi zazwyczaj od kilku do kilkunastu stopni Kelwina, choć stosując różne kombinacje termoczułych ciekłych kryształów można mierzyć temperatury z szerokiego zakresu, od 240 do 473 K [3]. Według [4], zastosowanie różnych rodzajów ciekłych kryształów umożliwia pomiar temperatury zakresie od 253 do 623 K i pozwala na detekcję zmian temperatury rzędu 0,1 K.

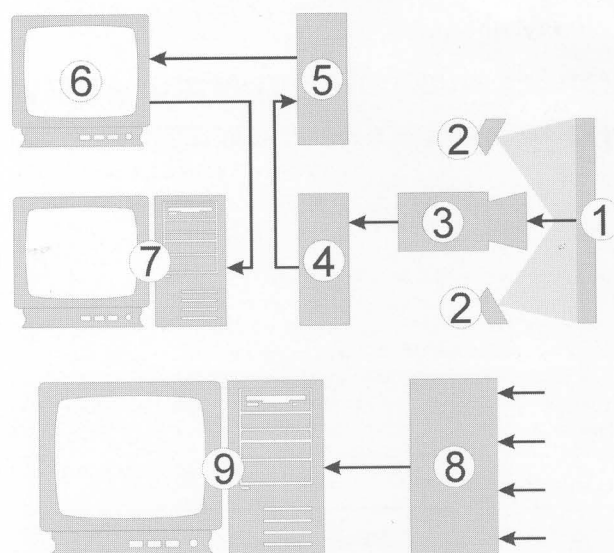
Jakkolwiek wygodna, metoda wykorzystania ciekłych kryształów w badaniach termograficznych ma również wady. Duże trudności techniczne sprawiają przede wszystkim procedury kalibracji, które muszą bezpośrednio towarzyszyć pomiarowi temperatury bezwzględnej. Przed każdym pomiarem przy użyciu ciekłych kryształów, należy przeprowadzić ich kalibrację, celem ustalenia związku pomiędzy demonstrowaną barwą na powierzchni a odpowiadającą jej temperaturą. Należy pamiętać również o tym, że obraz pól temperatur powierzchni z naniesionymi ciekłymi kryształami zmienia się wraz z kątem obserwacji i jest zależny od składu widmowego padającego światła. Stąd wynika konieczność zachowywania jednakowych warunków oświetleniowych podczas przeprowadzania eksperymentów.

##### 3.1.2. Układ do pomiarów termograficznych

Wykorzystanie termografii ciekłokrystalicznej wymaga rozbudowanego systemu akwizycji i przetwarzania danych i obrazów kolorowych. Schemat stosowanego systemu podano na rys. 2.

Rejestrowanie obrazu rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej minikanale możliwe jest dzięki następującemu układowi (rys. 2):

- moduł pomiarowy z minikanalem (#1), w którym folia grzejna, pokryta jest warstwą termoczułych ciekłych kryształów na czarnej warstwie podkładowej (rys. 1);
- system oświetlenia (#2), który stanowią jednakowo oddalone, ustawiane pod jednakowym kątem do badanego obiektu dwa źródła światła białego - świetlówki emitujące "zimne" światło białe (kąt i odległości świetlówek względem powierzchni oświetlanej są regulowane);



Rys. 2. Schemat systemu akwizycji i przetwarzania danych i obrazów pomiarowych; #1-moduł pomiarowy z minikanalem, #2-źródła światła białego, #3-kamera wideo CCD, #4-dekompozytor sygnału na RGB, #5-magnetowid, #6-monitor, #7-komputer z kartą akwizycji obrazu, #8-stacja akwizycji danych pomiarowych, #9-komputer

Fig. 2. The diagram of the system of acquisition of measurement data, colour images and their further processing: #1-test section; #2-lighting system; #3-CCD video camera, #4-RGB signal decomposer; #5- video recorder; #6-monitor; #7-computer with frame grabber; #8-data acquisition station, #9-computer

- kamera wideo CCD (#3) z dekompozytorem sygnału na RGB (#4), umieszczona w linii prostopadłej do badanego obiektu.

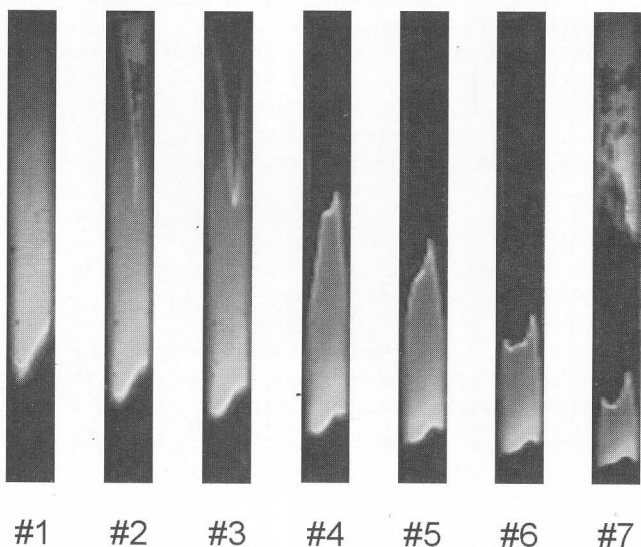
Pozostałe elementy układu to: magnetowid systemu *Betacam* (#5) wraz z monitorem (#6), podłączony do niego komputer PC z kartą akwizycji obrazu kolorowego. (#7). Układ rejestracji obrazu uzupełniają: oprogramowanie współpracujące z kartą akwizycji oraz oprogramowanie umożliwiające obróbkę danych pomiarowych. Kontrolę i akwizycję temperatury w różnych częściach modułu pomiarowego, umożliwia stacja akwizycji danych pomiarowych *Keithley 500A* (#8) wraz z oprogramowaniem *ViewDac*, zainstalowanym na kolejnym komputerze (#9).

##### 3.1.3. Kalibracja barwy względem temperatury

Wykorzystanie ciekłych kryształów do detekcji rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej w badaniach wymiany ciepła z wrzeniem w przepływie w minikanale, musi zostać poprzedzone wykonaniem kalibracji barwy powierzchni ciekłokrystalicznej względem temperatury, wykonanej w stałych warunkach oświetleniowych [2]. Kalibracja powinna być ponawiana po zastosowaniu nowej partii ciekłych kryształów, po zmianie jakichkolwiek parametrów geometrycznych układu rejestrującego obraz (ustawienie kamery i obiektywu, świetlówek, oświetlenie pomieszczenia, itp.). Trzeba mieć również na względzie, że ciekłe kryształy ulegają z czasem degradacji. Do przeprowadzenia kalibracji wykorzystywana jest woda, gdyż ma znacznie wyższą temperaturę nasycenia w stosunku do badanych płynów i w obszarze temperatur folii grzejnej, dla której taki płyn wrze, woda pozostaje w stanie ciekłym. W eksperymencie kalibracji barwy powierzchni pokrytej warstwą ciekłokrystaliczną względem odpowiadającej jej temperatury, podstawę do określenia dwuwymiarowego rozkładu temperatury na powierzchni stanowi rejestrowany obraz kolorowy. Ze względu na posiadaną aparaturę i oprogramowanie, wybrano system akwizycji obrazu kolorowego oparty na trzech kolorach podstawowych R, G i B. Do przetwarzania zarejestrowanego obrazu kolorowego wykorzystano system HSI, dzięki któremu sygnał trójskładnikowy RGB zamieniany jest w pojedynczą macierz barw, gdyż podstawę dla opisu barwy powierzchni badanej stanowi wyłącznie barwa, czyli *hue*. Końcowym rezultatem kalibracji jest znana zależność  $temperatura = funkcja\ barwy\ (hue)$ , zwana krzywą kalibracyjną [2, 5].

### 3.1.4. Wyniki

Dzięki technice termografii ciekłokrystalicznej w badaniach określa się wystąpienie inicjacji wrzenia w przepływie podczas przepływu płynu chłodniczego przez minikanal. Początek wrzenia rozpoznawany jest jako występujący po systematycznym wzroście temperatury powierzchni grzejnej nagły jej spadek, zwany "frontem wrzenia", przesuający się w kierunku przeciwnym do przepływu cieczy w minikanale wraz ze wzrostem strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej [1, 2, 6]. Przy wykorzystaniu własnych modeli przepływu ciepła przez folie i szkło, przy zmierzonej temperaturze powierzchni grzejnej, wyznacza się lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła [1, 2]. Na rys. 3 pokazano przykłady otrzymanych przy wykorzystaniu termografii ciekłokrystalicznej rozkładów barwy na powierzchni folii, z widocznym "frontem wrzenia". Na rys. 4 przedstawiono wyznaczone przy ich wykorzystaniu zależności temperatury powierzchni grzejnej oraz współczynnika przejmowania ciepła wzdłuż odległości od wlotu do minikanalu.



Rys. 3. Obrazy rozkładu temperatury powierzchni grzejnej minikanalu podczas zwiększania strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej  
Fig. 3. Images of hue temperature distribution on the heating foil while increasing heat flux supplied to the heating surface

Średni błąd pomiaru temperatury folii grzejnej przy wykorzystaniu termografii ciekłokrystalicznej oszacowano na 0.86 K [2, 5].

## 3.2. Pomiary termowizyjne

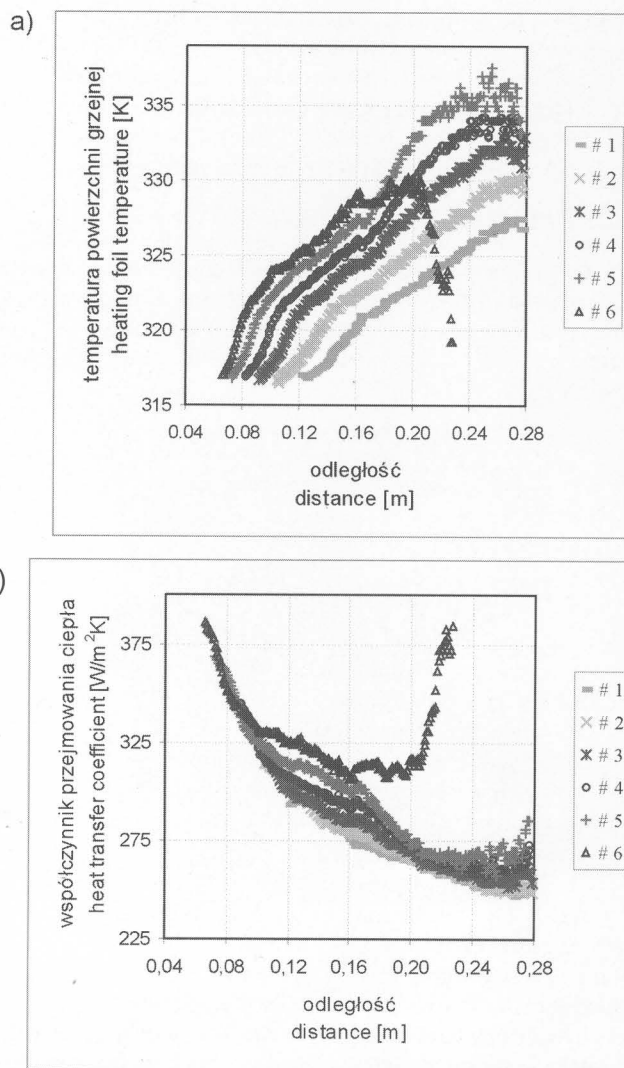
### 3.2.1. Charakterystyka techniki

Zadaniem kamery termowizyjnej jest przetwarzanie promieniowania cieplnego, pochodzącego od badanego obiektu, w sygnał elektryczny, który po wzmocnieniu i przejściu przez moduł analogowo-cyfrowy jest przekazywany do komputera. Wyszczególnione oprogramowanie przetwarza sygnał cyfrowy, tworząc na ekranie monitora barwny obraz (termograf), na którym danej barwie przypisana jest odpowiednia wartość temperatury [7].

### 3.2.2. Układ do pomiarów termowizyjnych

Podczas eksperymentalnych badań wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie przez minikanal, przez szklaną szybę modułu pomiarowego mają miejsce straty ciepła do otoczenia. Aby oszacować ich wpływ na lokalny współczynnik przejmowania ciepła, rozbudowano układ pomiarowy o kamerę termowizyjną ustawioną tuż za kamerą CCD (rys. 5), w celu dokonania pomiaru temperatury na zewnętrznej powierzchni szkła [2].

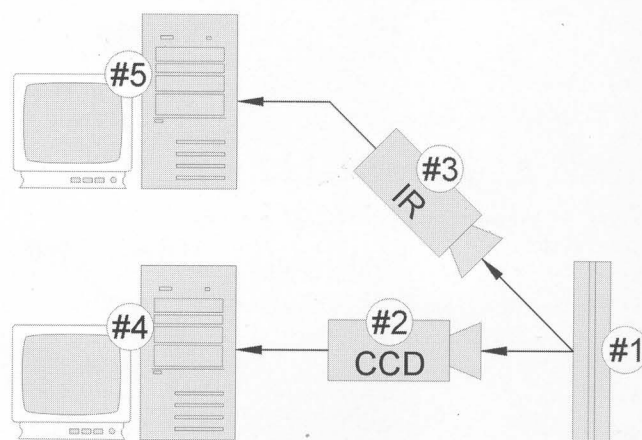
Jako kamerę termowizyjną zastosowano kamerę firmy Agema (Szwecja) serii 900 LW, wyposażoną w detektor MCT chłodzony azotem, który pracuje w zakresie spektralnym  $8\div 12\ \mu\text{m}$ . Zapisywanie obrazu realizowane jest w systemie cyfrowym, z maksymalną



Rys. 4. a) Zależność temperatury folii grzejnej od odległości od wlotu do minikanalu; b) zależność współczynnika przejmowania ciepła od odległości od wlotu do minikanalu

Fig. 4. a) Foil temperature dependence on the distance from the minichannel length; b) heat transfer coefficient dependence on the distance from the minichannel length

częstotliwością 15 Hz oraz 30 Hz, przy pięcioprocentowej modulacji. System kamery jest przystosowany do zdalnego pomiaru temperatury w czasie rzeczywistym (30 termogramów na sekundę), z czułością  $0,08^\circ\text{C}$  w temperaturze do  $30^\circ\text{C}$ . Dokładność pomiarów temperatury wynosi  $1^\circ\text{C}$ . Oprogramowanie współpracujące z kame-



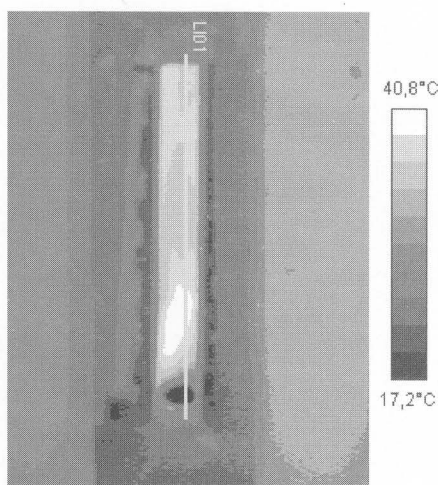
Rys. 5. Schemat układu do rejestracji rozkładu temperatury na powierzchni zewnętrznej szkła: 1-moduł pomiarowy, 2-kamera CCD, 3-kamera termowizyjna, 4, 5-komputer PC z monitorem  
Fig. 5. Diagram of the system for recording temperature distribution on the glass external surface: 1-test section, 2- CCD camera, 3-thermovision camera, 4, 5- PC with a display

rą umożliwia m. in. wyznaczenie temperatury w punkcie i wzdłuż linii czy wewnątrz zadanego obszaru [7].

Podczas pomiarów przy wykorzystaniu kamery na podczerwień, część rejestrowanej przez kamerę powierzchni szkła zamalowano czarną farbą podkładową, w celu wyeliminowania wpływu obrazu kolorowego na folii grzejnej i tylko tę część przyjęto do analizy.

### 3.2.3. Przykładowe wyniki

Przykładowy wynik pomiaru rozkładu temperatury na szkłe (termograf), uzyskany przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej, dla wybranej nastawy #7 (patrz rys. 3) przedstawiono na rys. 6. Na termografie zaznaczono linię, wzdłuż której wyznaczono temperaturę na szkłe.



Rys. 6. Przykładowy termograf odpowiadający nastawie #7 (rys. 3)  
Fig. 6. Exemplary thermograph setting #7 (Fig. 3)

W wyniku obliczeń lokalnych współczynników przejmowania ciepła z uwzględnieniem strat do otoczenia stwierdzono, że wpływ strat ciepła do otoczenia można zaniedbać, gdyż ich uwzględnienie spowodowało zmniejszenie wartości współczynnika przejmowania ciepła co najwyżej o 2% [2].

## 4. Wnioski

Zastosowanie do identyfikacji dwuwymiarowych pól temperatury dwóch bezstykowych metod: termografii ciekłokrystalicznej oraz termowizyjnej pozwoliło na zgromadzenie pełnych danych niezbędnych do wyznaczenia lokalnych współczynników przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie czynnika chłodniczego przez pionowy minikanal. Termografia, wykorzystana do pomiaru rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej, pozwoliła na określenie inicjacji wrzenia pęcherzykowego w minikanale na podstawie mierzonego rozkładu barwy. Termowizja, wykorzystana do rejestracji temperatury powierzchni izolacji, pozwoliła na oszacowanie strat ciepła do otoczenia, które okazały się być pomijalnie małe.

## 5. Literatura

- [1] M. Piasecka, S. Hożejowska, M. E. Poniewski: Experimental evaluation of flow boiling incipience of subcooled fluid in a narrow channel. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2004, vol. 25.
- [2] M. Piasecka: Teoretyczne i eksperymentalne badania wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie przez wąski kanał. Praca doktorska, 2002, Politechnika Świętokrzyska, Kielce.
- [3] P. J. Collings: *Liquid Crystals. Nature's Delicate Phase of Matter*. Princeton University Press, Princeton 1990.
- [4] N. Kasagi, R. J. Moffat, M. Hirata: *Liquid Crystals. Handbook of Flow Visualization*. Hemisphere Public Corp. 1989.
- [5] M. Piasecka, M. E. Poniewski: Liquid crystal thermography applied to investigations into heat transfer in minichannels. *Metrology and Measurement Systems, Quarterly of Polish Academy of Sciences* 2004, vol. 11, No. 3.
- [6] M. Piasecka, M. E. Poniewski: Hysteresis phenomena at the onset of subcooled nucleate flow boiling in microchannels. *Heat Transfer Engineering Journal* 2004, vol. 25, No. 3.
- [7] R. Pastuszko: Analiza wymiany ciepła przy wrzeniu na powierzchniach ożebrowanych z pokryciem kapilarno-porowatym. Praca doktorska, 1999, Politechnika Świętokrzyska, Kielce.

**Title:** Temperature field determination with liquid crystal thermography and IR camera in investigations of heat transfer in minichannels

*Artykuł recenzowany*

## Zapraszamy do publikacji reklam w PAK-u w roku 2005 CENNIK PUBLIKACJI PŁATNYCH na II półrocze 2005 roku

Reklama	Czarno-biała	Kolorowa
I okładka	---	3000 zł
II okładka	---	2700 zł
III okładka	---	2600 zł
IV okładka	---	2800 zł
1 strona (175x225 mm)	1000 zł	1500 zł
1/2 strony (175x125 mm) - pozioma	600 zł	900 zł
1/2 strony (85x225 mm) - pionowa	600 zł	900 zł
1/4 strony (85x125 mm)	300 zł	450 zł
*1/8 strony (85x60 mm)	200 zł	300 zł
*) tylko według indywidualnych uzgodnień		

**Artykuły techniczno-informacyjne oraz  
wkładki firmowe wydrukowane przez zleceniodawcę  
ceny według indywidualnych uzgodnień**

*Do wszystkich cen doliczamy podatek VAT 22%*