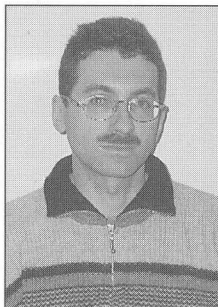
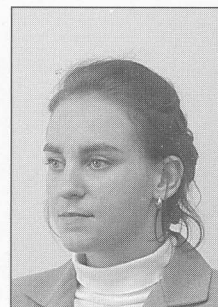


Robert PASTUSZKO, Magdalena PIASECKA

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

Pomiary rozkładu temperatury w żebrach z dodatkowymi pokryciami strukturalnymi**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**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 prze-pływie 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**Streszczenie**

Omówiono wykorzystanie dwóch metod określania rozkładu temperatury dla powierzchni ożebrowanych, oddających ciepło do wrzącej cieczy. Metoda *ruchowej termopary*, umieszczonej wewnątrz żebra, pozwala na określenie zmian temperatury przy dowolnym, zadanym przesunięciu, zależnym od dokładności czujnika położenia. Bezstykowa metoda, wykorzystująca kamerę termowizyjną, umożliwia określenie pola temperatur na odizolowanej od kontaktu z wrzącą cieczą powierzchni żebra. Opisano stanowiska pomiarowe i dokonano porównań przykładowych danych eksperymentalnych z obliczeniami teoretycznymi oraz oszacowano błędy pomiarowe.

Abstract

The paper discusses the application of two methods of stating temperature distribution on finned surfaces with tunnel structures (TS) and capillary porous covering (CPS), which release heat into the boiling liquid. The method of *movable thermocouple* located inside a fin makes it possible to specify temperature changes at arbitrary, preset shift dependent on the location sensor accuracy. With the contactless method relying on IR camera, it is possible to state temperature fields on the fin surface isolated from boiling liquid, which makes reference to temperature distribution in the fin intersection. The measurement stands are described, exemplary experimental data are compared with theoretical computation and measurement errors are estimated. Exemplary results obtained with both measurement techniques are included. They require correcting calculations for measured temperatures. That would account for both qualitative and quantitative evaluation of temperature distribution on developed surfaces with additional structural coverings.

Słowa kluczowe: powierzchnie rozwinięte, wrzenie, rozkład temperatur**Key words:** extended surfaces, nucleate boiling, temperature distribution**1. Wstęp**

Maszyny, ich komponenty i podzespoły wytwarzają podczas pracy ciepło, które powoduje przyrost temperatury tych urządzeń. W celu zapewnienia właściwej, długotrwałej pracy urządzeń i bezpieczeństwa użytkowników, wysoka temperatura musi być obniżana na drodze odprowadzania ciepła. Szczególnie chłodzenie elementów elektronicznych, pracujących z coraz większymi częstotliwościami, przysparza sporo kłopotów konstruktorom i użytkownikom komputerów. Bardzo skutecznym sposobem chłodzenia jest wykorzystanie procesów wrzenia na specjalnie dobranej powierzchni strukturalnej lub zastosowanie przepływu czynnika dwufazowego w minikanalach. Odpowiednio dobrana geometria i struktura tych powierzchni pozwala na uzyskanie znacznych współczynników przejmowania ciepła, co skutkuje zwiększeniem odprowadzanych strumieni ciepła. Intensyfikacja wymiany ciepła przy wrzeniu (*boiling heat transfer enhancement*) odgrywa dużą rolę w urządzeniach klimatyzacyjnych, kompaktowych wymiennikach ciepła, mikroelektronice, w rurach ciepłych, termosyfonach i in.

W celu określenia lokalnych wartości gęstości strumienia ciepła i współczynników przejmowania niezbędny jest pomiar rozkładu temperatur na omawianych powierzchniach. Klasyczny sposób wyznaczania pól temperatur wymaga zastosowania dużej ilości termo-

elementów, co z kolei powoduje ingerencje w strukturę materiału badanej powierzchni i przyczynia się do powstania znacznych błędów pomiarowych. Ich ograniczenie wymaga użycia skomplikowanych metod aproksymacji, filtracji cyfrowej bądź funkcji sklejańnych [1].

Zapewnienie ciągłego kontaktu badanej powierzchni z cieczą wrzącą wymusza stosowanie bardziej zaawansowanych technik pomiarowych.

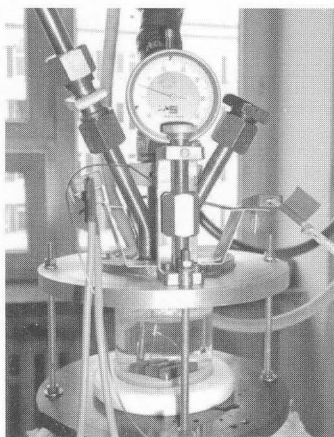
2. Pomiar temperatury przy pomocy ruchomej termopary - rozkład jednowymiarowy**2.1 Sformułowanie zagadnienia**

Metoda pomiarów rozkładu temperatury z wykorzystaniem ruchomego czujnika temperatury została opisana m.in. przez Pietuchova i in. w latach 70.[2,3]. Istotą pomiarów było umieszczenie między nagrzanym żebrze poziomym a dnem naczynia z cieczą warstwy ciekłego galu, o grubości 1 - 2 mm, utrzymującego się dzięki siłom napięcia powierzchniowego. W warstwie tej umieszczono sondę z termoparą, posiadającą możliwość przemieszczania w dowolnym kierunku z dokładnością do 2 μm . Zaletą wprowadzenia pośredniej warstwy była możliwość określania rozkładu temperatur w żebrze z bardzo dużą dokładnością, przy użyciu tylko jednej termopary, wadą - konieczność ekstrapolacji wyników pomiarów oraz ograniczenie zastosowania do przypadku odbierania ciepła przez wrzącą ciecz tylko z jednej strony żebra.

W niniejszym rozdziale opisano pomiar rozkładu temperatury w żebrze ze strukturą tunelową (TS), wykonany przy pomocy termopary umieszczonej wewnątrz żebra. Metoda ta pozwala na określenie zmian temperatury przy dowolnym, zadanym przesunięciu, zależnym od dokładności miernika położenia. Wymaga ona przeprowadzenia korekty temperatury, ze względu na pomiar prowadzony prostopadle do izoterm. Pojawia się wtedy zaburzenie pola temperatury w cieple, wynikające z wprowadzenia do otworu czujnika o innych własnościach termofizycznych niż materiał ciała (żebra) oraz odprowadzenia ciepła przez płaszczyznę termopary, znajdującej się w otoczeniu o innej temperaturze niż rozpatrywane żebro [4]. Określono zmianę temperatury dla obszaru składającego się z dwóch warstw o różnej przewodności cieplnej: miedzianego rdzenia i warstwy tunelu podpowierzchniowego, nasączonej wrzącą cieczą.

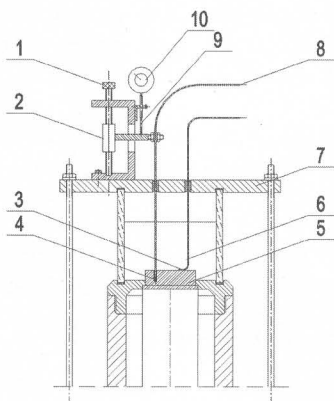
2.2 Stanowisko do pomiaru rozkładu temperatury w żebrze przy pomocy ruchomej termopary

Pomiary rozkładu temperatury w żebrze ze strukturą tunelową (TS) wykonano wykorzystując zmodyfikowaną górną pokrywę modułu głównego. Zastosowano ruchome mocowanie termopary, przeprowadzonej przez wydrążony i uszczelniony otwór w pokrywie (rys. 1, 2).



Rys. 1. Moduł główny przystosowany do pomiaru rozkładu temperatur w żebrze.

Fig. 1. The main module for fin temperature distribution measurement.



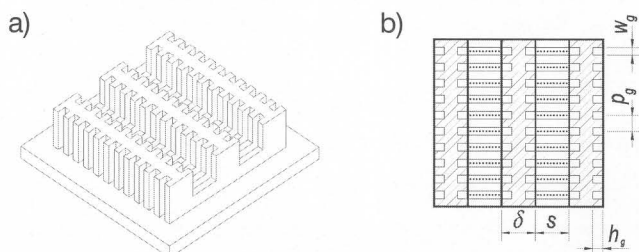
Rys. 2. Elementy stanowiska do pomiaru rozkładu temperatury w żebrze: 1 - śruba ustawienia położenia, 2 - nakrętka, 3 - lut cynowy, 4 - otwór wypełniony pastą termoprzewodzącą, 5 - badane żebro, 6 - termopara do pomiaru temperatury na wierzchołku żebra, 7 - pokrywa górna, 8 - ruchoma termopara, 9 - czujnik przesunięcia, 10 - wskaźnik zegarowy.

Fig. 2. Components of the setup for the measurements of temperature distribution in a fin: 1 - position setting screw, 2 - nut, 3 - tin solder, 4 - hole filled with thermo-conductive paste, 5 - fin, 6 - thermocouple for temperature measurement at the fin tip, 7 - upper cover, 8 - movable thermocouple, 9 - shift sensor, 10 - indicator.

Przesuw termopary (maksimum 10 mm) realizowany jest przez nakrętkę (2), poruszaną przez obrót śruby (1). Zastosowano termoparę o średnicy 1 mm (8), której końcówka przemieszcza się w nawierconym w żebrze otworze. W celu polepszenia przepływu ciepła między wnętrzem żebra a termoparą, przed włożeniem czujnika otwór wypełniono pastą termoprzewodzącą (4) *Thermopox 80S*. Dno otworu odpowiadało poziomowi powierzchni podstaw żeber. Zastosowany układ umożliwiał pomiary przesunięcia z dokładnością 0,01 mm (czujnik zegarowy - 9), z tym, że wymagane było wcześniejsze skasowanie luzów przyrządu i wykonywanie odczytów wyłącznie przy „wyciąganiu” termopary.

2.3 Przedmiot badań

Przedmiotem badań było środkowe żebro prostokątne o wysokości 10 mm i grubości 5 mm, miedziane, ze strukturą tunelową (TS),



Rys. 3. a) Widok powierzchni ożebrowanej ze strukturą TS przed nałożeniem folii perforowanej, b) przekrój poziomy układu żeber.

Fig. 3. a) Finned sample view (before TS covering), b) fin array horizontal section.

znajdujące się w odległości 5 mm (s) od bocznych żeber (rys. 3). Strukturę TS uzyskano przez wycięcie miniżeber o wysokości 1,6 mm na bocznych powierzchniach żeber głównych i poziomych przestrzeniach międzyżeberowych oraz spiekanie miedzianej folii perforowanej, posiadającej otwórki o średnicy 0,05 mm. Wytworzone tunele miały szerokość 1,3 mm.

2.4 Obliczenie skorygowanej temperatury na podstawie wskazań termopary

Założono, że pasta termoprzewodząca równomiernie wypełnia szczelinę między czujnikiem a ścianką otworu. Zastosowana pasta *Thermopox 80S* posiadała przewodność cieplną $\lambda_{pas} \approx 4$ W/mK. Przyjęto, że gęstość strumienia ciepła dopływającego w kierunku poziomym do termopary zmniejszała się w kierunku wierzchołka żebra (rys. 4), analogicznie do zmiany przegrzania $\Theta = T_z - T_{sat}$:

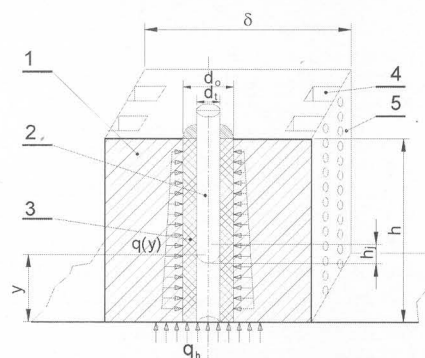
$$q(y) = C \Theta^n \quad (1)$$

Stała C i wykładnik n przyjmują wartości wynikające z krzywej wrzenia, czyli zależności gęstości strumienia ciepła, odniesionej do podstawy żebra, od przegrzania:

$$q_b = C (\Delta T)^n \quad (2)$$

Dla badanej próbki, na podstawie analizy regresji krzywej wrzenia, przyjęto $C = 25\,000$, $n = 1,27$.

Strumień ciepła jest przekazywany do spoiny termopary na odcinku $h_j \approx 1$ mm. Dla tak małego odcinka można zaniedbać zmiany q i przyjmując stałą wartość gęstości dla odległości y od podstawy żebra.



Rys. 4. Pionowy przekrój przez żebro z ruchomą termoparą i rozkład gęstości strumienia ciepła: 1 - miedziane żebro, 2 - ruchoma termopara, 3 - pasta termoprzewodząca, 4 - pionowy tunel, 5 - folia perforowana.

Fig. 4. Vertical section of the fin and distribution of the heat flux: 1 - fin, 2 - thermocouple, 3 - thermo-conductive paste, 4 - vertical tunnel, 5 - perforated foil.

Wprowadzając opór cieplny cylindrycznej warstwy pasty o wysokości h_j obliczono skorygowaną wartość temperatury wewnątrz żebra:

$$T_z = T_t + C \Theta^n \frac{d_o \ln \frac{d_o}{d_t}}{2\lambda_{pas}} \quad (3)$$

gdzie: T_t - temperatura odczytana ze wskazań termopary, $q(y)$ - zmienna na wysokości żebra gęstość strumienia ciepła, d_o - średnica nawierconego otworu (1,05 mm), d_t - średnica ruchomej termopary (1 mm), λ_{pas} - przewodność cieplna pasty termoprzewodzącej.

Nadwyżka temperatury (przegrzanie) została wyliczona na podstawie znanych analitycznych rozwiązań równań rozkładu temperatury dla żebra z uwzględnieniem wymiany ciepła przez jego wierzchołek. Dodatkowo założono zmienność współczynnika przyjmowania ciepła wzdłuż wysokości żebra i wykorzystano pomocnicze obliczenia numeryczne metodą ekstrapolacyjną.

2.5 Oszacowanie strumienia ciepła odbieranego przez płaszczyznę termopary

Oszacowanie przeprowadzono dla dostarczonej mocy elektrycznej 900 W, co odpowiada gęstości strumienia ciepła 587 kW/m². Przy-

jęto współczynnik przyjmowania ciepła, taki jak dla żebra z pokryciem TS, tj. $\alpha \approx 37 \text{ kW/m}^2\text{K}$. Przegrzanie przy punkcie styku termopary, traktowanej jako żebro nieskończenie długie, $\Theta_{tp} = 0,4 \text{ K}$. Przewodność cieplna materiału płaszczu termopary (inconel) wynosiła $\lambda = 12 \text{ W/mK}$. Długość odcinka płaszczu termopary będącego w kontakcie z cieczą wrzącą wynosiła 50 mm, przy średnicy czujnika 1 mm.

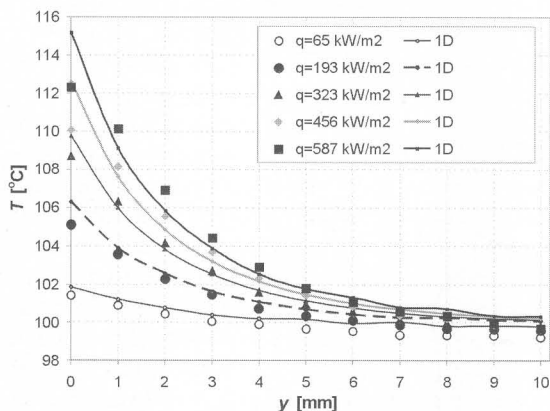
Dla powyższych danych można wyliczyć przybliżoną wartość strumienia ciepła, odprowadzanego do wrzącej cieczy:

$$Q_t = \frac{\Pi d_t^2}{4} \lambda_t \Theta_{tp} m \operatorname{tgh}(mL) \approx 0,013 \text{ W} \quad (4)$$

Przy gęstości strumienia ciepła 587 kW/m^2 , pojedyncze żebro o przekroju $27 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ odprowadza około 80 W ciepła. Strumień ciepła odprowadzany przez płaszcz termopary może więc być z powodzeniem pominięty.

2.6 Porównanie wyników obliczeń i danych eksperymentalnych

Na rys. 5 przedstawiono wyniki obliczeń rozkładu temperatur w analizowanym żebrze według rozkładu jednowymiarowego, z wymianą ciepła przez wierzchołek żebra, dla pięciu gęstości strumienia ciepła. Wyniki te porównano z danymi eksperymentalnymi, uzyskanymi dla odczytu z „ruchomej termopary“, po uwzględnieniu spadku temperatury w warstwie pasty termoprzewodzącej (wzór 3). Można stwierdzić dobrą zgodność pomiarów z eksperymentem dla średnich gęstości strumienia ciepła ($q=323 \text{ kW/m}^2$ oraz $q=456 \text{ kW/m}^2$). Dla małych wartości q na rozbieżności (do 1 K) wpływa duży błąd wyliczenia gęstości strumienia ciepła.



Rys.5. Przykładowe rozkłady temperatur w żebrze z pokryciem TS (dla 5 gęstości strumienia ciepła), przy wrzeniu wody, w porównaniu z obliczonym rozkładem temperatur (1D - rozkład jednowymiarowy).
Fig.5. Exemplary temperature distributions in a fin with TS covering (for 5 heat fluxes), water boiling, compared with 1D calculations.

W tej metodzie bardzo istotne było dokładne określenie średnicy wywierconego w żebrze otworu oraz poprawne przyjęcie przewodności cieplnej pasty termoprzewodzącej.

Dane eksperymentalne dla $y = 10 \text{ mm}$ określono przy pomocy przylutowanej do wierzchołka żebra termopary. Stwierdzono minimalną różnicę między wskazaniem tej termopary a temperaturą saturacji wody. Można przypuszczać, że przyjęcie do obliczeń teoretycznych zależności na rozkład temperatury dla tzw. żebra nieskończenie długiego nie spowodowałoby znacznego zmniejszenia dokładności obliczeń.

3. Pomiar rozkładu temperatury w żebrze z pokryciem cps przy pomocy kamery termowizyjnej

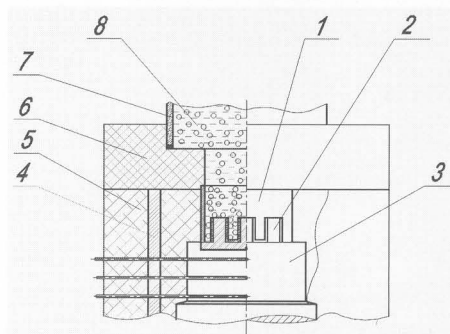
3.1 Charakterystyka nieinwazyjnych metod pomiarowych

Termowizja, jako jedna z bezstykowych metod pomiarowych, jest z powodzeniem wykorzystywana do badania zjawisk cieplnych

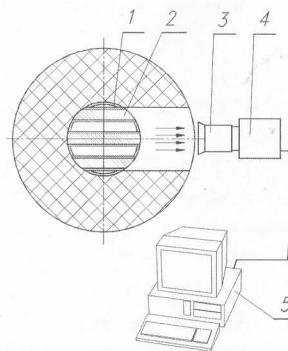
na powierzchniach ożebrowanych, oddających ciepło na drodze konwekcji. Badane są rozkłady temperatur zarówno w stanie ustalonym jak i niestalonym. Największą zaletą tej metody pomiarowej jest możliwość obserwacji pola temperatury, co pozwala na wnioskowanie o przepływie ciepła, optymalizacji wymiarów powierzchni odprowadzającej ciepło oraz skuteczności chłodzenia dla różnych układów żeber.

Również termografia ciekłokrystaliczna jest doskonałą i uznaną metodą pomiarową stosowaną w różnych dziedzinach techniki, w których ich unikalne własności, sygnalizowane poprzez zmianę barwy i/lub jej intensywności, można wykorzystać do obserwacji bardzo małych zmian temperatury. Warstwa ciekłych kryształów substancji, pokrywająca powierzchnię ciała stałego, dokładnie odwzorowuje rozkład temperatury tej powierzchni, w postaci barwnej mapy [5]. Autorzy planują w najbliższej przyszłości zastosować tę metodę w odniesieniu do powierzchni rozwiniętych, oddających ciepło do wrzącej cieczy.

3.2 Stanowisko do pomiaru rozkładu temperatur przy użyciu kamery termowizyjnej



Rys.6. Elementy modułu podstawowego stanowiska do współpracy z kamerą termowizyjną. 1 - tuleja tekstolitowa, 2 - żebro z pokryciem kapilarno-porowatym, 3 - walec grzejny, 4 - tuleja ceramiczna, 5 - izolacja, 6 - przekładka teflonowa, 7 - naczynie szklane, 8 - ciecz wrząca.
Fig.6. Elements of the module for thermovision investigation: 1 - textile laminate sleeve, 2 - fin with capillary-porous covering, 3 - heating cylinder, 4 - ceramic sleeve, 5 - insulation, 6 - teflon separator, 7 - glass vessel, 8 - boiling liquid.



Rys.7. Układ pomiarowy do wyznaczania rozkładu temperatury w żebrze: 1 - tuleja nałożona na próbkę ożebrowaną, 2 - badane żebro, 3 - obiektyw z nakładką powiększającą, 4 - kamera termowizyjna AGEMA 900 LW, 5 - komputer z oprogramowaniem.
Fig.7. Setup for measurement of fin temperature distribution: 1 - textile laminate sleeve with finned sample, 2 - investigated fin, 3 - close-up lens, 4 - IR camera, 5 - PC + software

W celu przeprowadzenia pomiarów rozkładu temperatur w żebrze przy pomocy kamery termowizyjnej niezbędne było wytworzenie specjalnego modułu podstawowego (rys.6,7). Zastosowano tuleję z tekstolitu (poz. 1, rys. 6) pomiędzy próbką ożebrowaną (2) a przekładką teflonową (6). Tuleja ta posiada wycięcia obejmujące zewnętrzny obrys żeber, dzięki czemu prawie cała powierzchnia żeber znajduje się w kontakcie z wrzącą cieczą, natomiast boczne krawędzie żeber (przekrój $h \times \delta$ - wysokość \times szerokość żebra) są na powierzchni cylindrycznej, tworzonej przez tuleję. Powierzchni

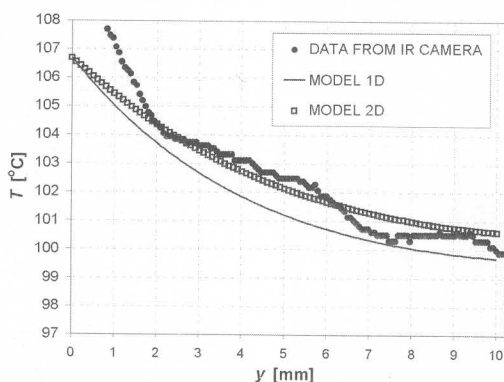
nia styku żeber z tuleją jest uszczelniona warstwą kleju chemoutwardzalnego. Przedstawione rozwiązanie zapewnia możliwość pomiarów gęstości strumienia emisji promieniowania na zewnętrznych krawędziach żeber, co jest odniesieniem do rozkładu temperatur w przekroju żebra [6,7].

Kamera termowizyjna firmy AGEMA (Szwecja) serii 900 LW wyposażona była w detektor MCT chłodzony azotem, pracujący w zakresie spektralnym 8 - 12 μm . System kamery był przystosowany do zdalnego pomiaru temperatury w czasie rzeczywistym (30 termogramów na sekundę), z czułością 0,08 K w temperaturze 30°C. Dokładność pomiarów temperatury wynosi $\pm 1\text{K}$.

3.3 Przedmiot badań

Próbka do badań termowizyjnych posiadała żebra o wysokości $h = 10\text{ mm}$, grubości $\delta = 3\text{ mm}$, których boczne powierzchnie były pokryte warstwą kapilarno-porowatą o grubości 0,6 mm i porowatości 60%. Stosowano wodę jako czynnik wrzący oraz różne gęstości strumienia ciepła. Badana powierzchnia bocznych krawędzi żeber była dodatkowo pokryta cienką warstwą kleju w celu ograniczenia strat ciepła i uniemożliwienia wydostawania się cieczy z warstwy porowatej.

3.4 Porównanie obliczeń z eksperymentem

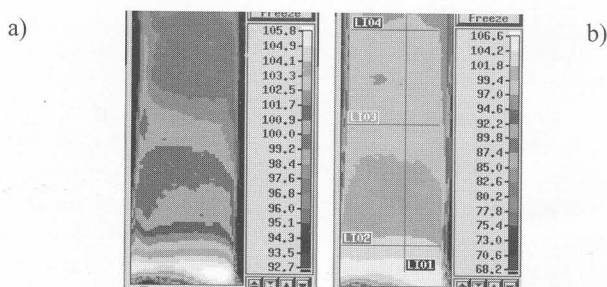


Rys. 8. Porównanie wyników obliczeń rozkładu temperatury (model jedno- i dwuwymiarowy) z danymi doświadczalnymi uzyskanymi z kamery termowizyjnej przy wrzeniu wody.

Fig. 8. Comparison of calculation results of temperature distribution (model 1D and 2D) with experimental data for water boiling.

Rysunek 8 pokazuje zależność temperatury od odległości od podstawy żebra (y), dla teoretycznego rozkładu jedno- i dwuwymiarowego i porównanie z wynikami eksperymentalnymi (wg pionowej linii na rys. 9b). Przyjęto wykładnik $n = 1,3$ i stałą $C = 14\ 500$ w równaniu (1). Rysunek 9 przedstawia dwa termografy dla żebra centralnego.

Do obliczeń zadano odległości węzłów $\Delta x = \Delta y = 0,1\text{ mm}$, ilość iteracji 50000. Określono poprawkę rozkładu temperatury, biorąc pod uwagę spadek temperatury w cenniejszej warstwie kleju, pokrywającej odsłonięty profil żebra. Kamerę termowizyjną skalibrowano w odniesieniu do temperatury w odległości 2 mm od podstawy żebra [6].



Rys. 9. Przykłady termografów, wykonanych przy wrzeniu wody na powierzchni żebra z pokryciem CPS, gęstość strumienia ciepła $q_b = 220\text{ kW/m}^2$; a) środkowe żebro - podziałka izoterm 0,8°C, b) środkowe żebro - podziałka izoterm 2,4°C.

Fig. 9. Examples of thermographs for boiling of water on the fin surface with a porous covering, base heat flux $q_b = 220\text{ kW/m}^2$; a) centre fin - isotherms differences 0.8°C, b) centre fin - isotherms differences 2.4°C.

Do programu obliczeniowego wprowadzono dane dotyczące przewodności cieplnej materiału rdzenia żebra (miedź) i pokrycia (CPS), cieczy wrzącej (woda) oraz temperatury przy podstawie żebra.

3.5 Oszacowanie błędów pomiarowych

Istotą wykonanych pomiarów rozkładu temperatury w żebrze, oddającym ciepło do wrzącej cieczy, jest założenie, że pole temperatury, na bocznej, odsłoniętej powierzchni żebra, odpowiada polu temperatury wewnątrz żebra, o przekroju $h \times \delta$. Hipotezę tę można uznać za poprawną przy następujących założeniach:

- dla żebra można przyjąć jedno- lub dwuwymiarowy rozkład temperatury, a więc jednakowe pola temperatur w kolejnych przekrojach $h \times \delta$ na szerokości żebra,
- pomijalnie małe są straty ciepła na skutek konwekcji i promieniowania z odsłoniętej powierzchni żebra,
- możliwe jest zaniedbanie wpływu tulei (poz. 1, rys.6), zmniejszającej powierzchnię kontaktu cieczy wrzącej z boczną powierzchnią żebra.

Dokładność pomiarów temperatury przy pomocy kamery termowizyjnej przy dodatkowym skalibrowaniu przy pomocy termopary zmniejsza się do 0,25 K, lecz biorąc pod uwagę, że wyszczególnione założenia mogą być niespełnione, błąd określenia temperatury oszacowano na 1K.

Dokładność obliczeń metodą numeryczną zależy głównie od właściwego doboru stałej C i wykładnika n w równaniu (1). Błąd obliczenia temperatury przedstawioną metodą można oszacować na 0,2 K.

4. Wnioski

Pomiar rozkładu temperatury przy pomocy „ruchomej termopary“ jest metodą o dość dużej dokładności, ale wymagającą precyzyjnego określenia spadku temperatury w warstwie pasty termoprzewodzącej. Konieczna jest znajomość współczynnika przewodności cieplnej tej warstwy oraz luzu promieniowego między płaszczyzną termopary a otworem. Zaletą jest stosowanie jednej termopary i możliwość odczytów nawet z krokiem poniżej 0,1 mm.

Przedstawione termografy służą do jakościowej oceny rozkładu temperatur w żebrze z pokryciem kapilarno-porowatym i porównania z rozwiązaniami numeryczno-analitycznymi. Zaletą wykorzystania termowizji jest możliwość obserwacji pól temperatur w żebrze i ich zmian w zależności od gęstości strumienia ciepła. Uzyskanie takich wyników jest niemożliwe ze względów technologicznych przy użyciu tradycyjnych metod pomiarowych (termopar).

5. Literatura

- [1] Taler J., Teoria i praktyka identyfikacji procesów przepływu ciepła, Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Wydawnictwo, Wrocław - Warszawa - Kraków, 1995.
- [2] Pietuchow B. S., Kowalew S. A., Żukow V. M., Geszele V. D., Szildkret W. M. Issledovanie Miestnoj Tieplootdaczii pri Kipenii Żidkosti na Nieizotermiczieskoj Powierchnosti, Tieplo - i Massopierenos, 1972, T. 2, Minsk. «Nauka i Technika», s. 102-111.
- [3] Pietuchow B.S., Kowalew S.A., Geszele W.D., Tieploobmien pri kipienii na oriebrienoj powierchnosti, Tieploobmien i Gidrodinamika, Trudy V Wsesiojuznoj Konf. po Tieploobmienu i Gidrawliczeskomu Soprotiwlieniu pri Dwiżenii Dwuchfaznogo Potoka w Elementach Energeticzieskich Maszin i Apparatów, 1977, s. 5-14.
- [4] Wiśniewski S., Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych, WNT, Warszawa 1983.
- [5] M. Piasecka, M. E. Poniewski: Liquid crystal thermography applied to investigations into heat transfer in minichannels. Metrology and Measurement Systems, Quartarely of Polish Academy of Sciences 2004, vol. 11, No. 3.
- [6] Pastuszko R.: Temperature field in two-layer fins immersed in boiling water „Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery“ No.112, 2003, pp.103-118.
- [7] Pastuszko R.: Analiza wymiany ciepła przy wrzeniu na powierzchniach ożebrowanych z pokryciem kapilarno-porowatym, praca doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1999.

Title: Temperature distribution measurements on fins with additional structural coverings

Artykuł recenzowany