

## WYMIANA CIEPŁA PODCZAS WRZENIA FC-72 W PRZEPEŁYWIE PRZEZ WYMIENNIK CIEPŁA Z MINIKANALEM MODELOWANA FUNKCJAMI TREFFTZA I Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU ADINA

### Streszczenie

Praca dotyczy wymiany ciepła podczas wrzenia czynnika chłodniczego FC-72 przepływającego przez wymiennik ciepła z minikanalem prostokątnym o powierzchni rozwiniętej. Akwizycję temperatury na zewnętrznej powierzchni grzejnej umożliwiło zastosowanie kamery termowizyjnej. W pracy zaproponowano dwuwymiarowy matematyczny model opisujący zagadnienie odwrotne wymiany ciepła w module pomiarowym. W oparciu o wyniki eksperymentu wyznaczono rozkłady temperatury powierzchni grzejnej oraz czynnika chłodniczego, co w dalszej kolejności umożliwiło wyznaczenie lokalnych współczynników przejmowania ciepła na styku płyty grzejnej i płynu FC-72. Lokalne współczynniki przejmowania ciepła wyznaczono również z metody jednowymiarowej. Obliczenia numeryczne wykonane metodą Trefftza zweryfikowano z wynikami otrzymanymi w programie ADINA oraz z wynikami z metody jednowymiarowej.

### WSTĘP

Nowe rozwiązania techniczne i technologie wprowadzane w szybkim tempie do życia codziennego powodują konieczność dostarczenia energii do coraz to większej liczby maszyn i urządzeń. W przemyśle transportowym konstrukcje pojazdów z silnikami spalinyowymi, a także elektrycznymi, również są stale rozwijane i unowocześniane. Szybki wzrost wydajności urządzeń skutkuje nieustannym poszukiwaniem sprawniejszych i bardziej energooszczędnych rozwiązań. Z tego powodu laboratoria badawcze na całym świecie wciąż rozwijają i opracowują nowe technologie. Jednym z priorytetowych celów badań jest znalezienie odpowiednio wydajnych i energooszczędnych wymienników ciepła, zdolnych zapewnić korzystne parametry zasilaczy, generatorów ciepła, odbiorników elektrycznych i innych.

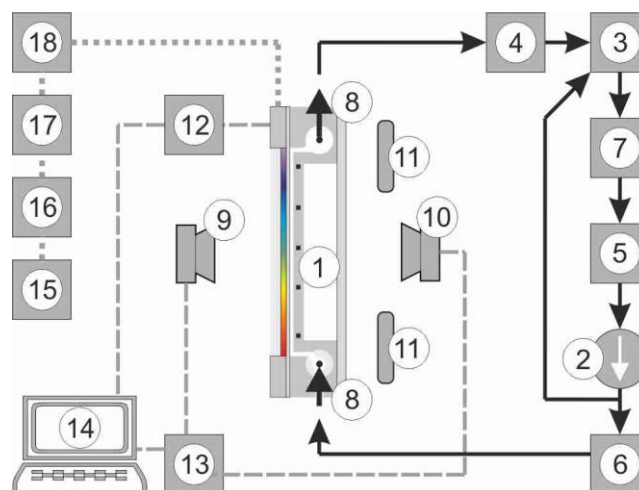
Niniejsza praca dobrze wpisuje się w ten także potrzebny kierunek badań. Skutecznym sposobem chłodzenia jest wykorzystanie procesów wymiany ciepła przebiegających ze zmianą stanu skupienia, ze względu na znacznie większą efektywność procesu. Wymiana ciepła, realizowana z wykorzystaniem układów z kanałami o niewielkich wymiarach, jest szeroko badana i stosowana ze względu na duży potencjał do przenoszenia dużych gęstości strumieni ciepła. Pozwala ona na jednoczesne spełnienie przeciwstawnych wymagań, tj. uzyskanie możliwie dużego strumienia ciepła przy małej różnicy temperatury między powierzchnią grzejną i cieczą nasyconą, przy niewielkich wymiarach układu wymiany ciepła. Poprzez zastosowanie rozwiniętych powierzchni grzejnych w wymiennikach ciepła można uzyskać dodatkową intensyfikację procesu wymiany ciepła.

Przedstawione w pracy wyniki badań lokalnego współczynnika przejmowania ciepła dotyczą badań przepływu czynnika chłodniczego w warunkach wrzenia w minikanale i są kontynuacją zagadnień omawianych w [1,2]. W pracy [3] przedstawiono dwuwymiarowy model wymiany ciepła w minikanale, którego rozwiązanie, wykorzystujące funkcje Trefftza, prowadziło do rozwiązania zagadnienia prostego i odwrotnego przewodzenia ciepła. W [4] zaproponowano modyfikację modelu z [5], która uwzględniała dane pomiarowe z eksperymentu. Rozwiązanie w [4] wyznaczono metodą elementów skończonych, gdzie funkcjami kształtu były funkcje Trefftza. W [6] model ten rozwijano w oparciu o metodę funkcji radialnych. W niniejszej

pracy dwuwymiarowy rozkład temperatury powierzchni grzejnej wyznaczono wykorzystując funkcje Trefftza dla równania Laplace'a. Znajomość ciągłej funkcji opisującej rozkład temperatury powierzchni grzejnej pozwala wyznaczyć lokalne współczynniki przejmowania ciepła na styku powierzchnia grzejna - czynnik chłodniczy z warunku brzegowego Robina. Obliczenia numeryczne wykonane metodą Trefftza zweryfikowano z wynikami otrzymanymi w programie ADINA oraz z wynikami z podejścia jednowymiarowego.

### 1. STANOWISKO I BADANIA EKSPERYMENTALNE

#### 1.1. Obiegi i systemy stanowiska badawczego



**Rys. 1.** Stanowisko badawcze, 1-moduł pomiarowy z minikanalem, 2-pompa zębata, 3-zbiornik wyrównawczy/regulator ciśnienia, 4-wymiennik ciepła, 5-filtr, 6-przepływomierz, 7-separator powietrza, 8-przetwornik ciśnienia, 9-kamera termowizyjna, 10-kamera do zdjęć szybkich, 11-oświetlenie LED, 12-stacja akwizycji danych DaqLab 2005, 13-stacja akwizycji danych MCC 3216G, 14- komputer, 15-źródło zasilania, 16-bocznicznik, 17-amperomierz, 18-woltomierz.

Eksperyment przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rys. 1.

Na obieg główny stanowiska składają się: moduł testowy z minikanalem (1), wymiennik ciepła typu rura w rurze, służący do

schładzania gorącego czynnika (4), pompa zębata f. Tuthill (2) z zestawem filtrów (5), separator powietrza (6), przepływomierz masowy Coriolisa f. Endress-Hauser (6), dwa przetworniki ciśnienia f. Endress-Hauser na wlocie i na wylocie z minikanalu (8).

Do rejestracji temperatury powierzchni grzejnej wykorzystano kamerę termowizyjną Flir E60 (9). Kamera posiadała nominalną dokładność pomiaru równą 2% w zakresie temperatur  $0 \div 120$  °C lub  $\pm 2$  °C, jednak uzyskano znacznie lepszą dokładność pomiarową wynoszącą  $\pm 1$  °C lub  $\pm 1\%$  pomiaru w zakresie temperatur  $0 \div 120$  °C poprzez dokładną rekaliibrację potwierdzoną certyfikatem, wykonaną w laboratorium serwisowym Flir. Do obserwacji struktur przepływu wykorzystano szybką kamerę JAI SP-5000M (10). W celu umożliwienia właściwej pracy i rejestracji obrazów o wysokiej rozdzielczości i właściwie doświetlonych zastosowano 2 źródła światła o mocy 200W każdy (11), na które składa się 4 matryc LED emitujących światło zimne białe. Do rejestracji danych pomiarowych użyto dwóch stacji pomiarowych: DaqLab 2005 (12) rejestrowała dane temperaturowe z termopar typu K, MCC 3216G (13) zapisywała dane z przetworników ciśnienia, przepływomierza oraz ze źródła prądu stałego. Wszystkie dane pomiarowe, łącznie z zarejestrowanymi obrazami z obydwu kamer są skierowane do komputera PC (14), wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie. Na system zasilający składają się: źródło zasilania prądem stałym – spawarka 400A (15), bocznik (16), amperomierz (17) oraz woltomierz (18). Szczegółowy opis stanowiska badawczego przedstawiono w [2].

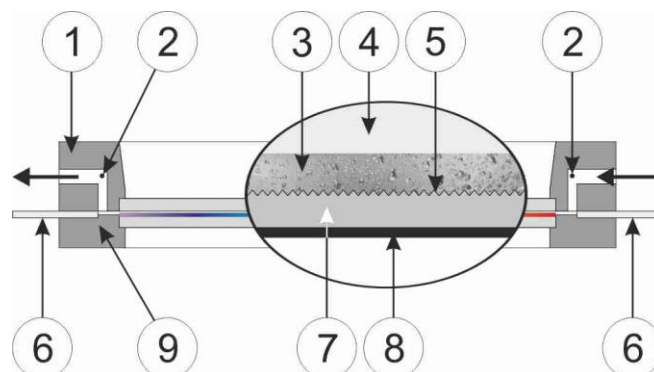
### 1.2. Moduł testowy z minikanalem

Moduł testowy pokazano na rys. 2. Składają się na niego następujące elementy: płyta grzejna ze stopu Haynes-230 (7) pokryta od zewnątrz czarną farbą o znanej emisyjności (8), pokrywa górna (9), korpus (1) z płytą szklaną (4) stanowiącą wizjer umożliwiającą obserwację struktur przepływu, minikanal (3) z przekładką PTFE stanowiącą głębokość minikanalu, termopary (2), elektrody (6) doprowadzające prąd do folii grzejnej. Płyta grzejna o grubości 0,45 mm posiada jedną stronę rozwiniętą skierowaną do wnętrza minikanalu, druga strona pozostała gładka pokryta czarną farbą na bazie grafitu o emisyjności równej 0,83. Pokrycie to wykonano nanosząc farbę cienką warstwą w celu uzyskania właściwych warunków do dokonywania pomiarów temperatury za pomocą kamery termowizyjnej. Powierzchnia rozwinięta wykonana została przy wykorzystaniu procesu elektroerozji. Proces ten polega na uzyskaniu mikro- i minikraterów, powstałych w wyniku działania łuku elektrycznego między płytą grzejną a mikroelektrodą. Urządzenie, zwane arkografem, oraz sposoby wykonywania powierzchni rozwiniętych a także otrzymane rozwinięcia szczegółowo omówiono w [7]. Minikanal posiadał następujące wymiary: głębokość - 1,7 mm, szerokość - 17 mm i długość - 180 mm, przy czym moduł testowy ustawiono pionowo. Z drugiej strony modułu - od strony rozwiniętej powierzchni grzejnej obserwowano struktury przepływu dwufazowego poprzez płytę szklaną.

### 1.3. Metodologia przeprowadzania badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono w możliwie stałych warunkach zewnętrznych, dokonując niezbędnych korekt obliczeniowych ciśnienia atmosferycznego oraz temperatury otoczenia. Układ pomiarowy zalano płynem chłodniczym FC-72 a następnie dokładnie odpowietrzono wszystkie elementy układu. Uzupełniono brakującą objętość płynu i powtórzono proces odpowietrzania. Po kilkukrotnym powtórzeniu obu czynności uzyskano w pełni stabilne warunki przeprowadzania eksperymentu. Właściwe odpowietrzenie układu badawczego jest kluczowe dla poprawności otrzymanych wyników, gdyż faza gazowa obecna w płynie chłodniczym zakłóca odczyty, co może prowadzić do nieprecyzyjnego pomiaru prędkości przepływu, a także mieszanina fazy ciekłej FC-72 / powietrze ma inne własności

niż właściwie odpowietrzony płyn FC-72. Przed rozpoczęciem właściwej fazy eksperymentu ustawiono wartość masowego przepływu płynu oraz ustabilizowano ciśnienie. Przed zarejestrowaniem parametrów cieplno-przepływowych każdej nastawy strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej (natężenia prądu dostarczanej ze źródła zasilania), w celu otrzymania wiarygodnych wyników, ustabilizowano parametry cieplno-prądowe przez kilka minut. Następnie dokonywano akwizycji danych pomiarowych, zwiększając strumień ciepła o zadaną wartość i następowała kolejna faza stabilizacji parametrów. Do obliczeń omówionych w dalszej części pracy przyjęto wybraną nastawę strumienia ciepła w zakresie wrzenia przechłodzonego, gdy ciecz przegrzana jest jedynie w pobliżu ogrzewanej powierzchni, a w rdzeniu przepływu nie osiąga temperatury nasycenia.



Rys. 2. Moduł pomiarowy: 1-korpus, 2-termopara, 3-minikanal, 4-płyta szklana, 5-powierzchnia rozwinięta, 6-elektroda, 7-powierzchnia grzejna, 8- czarna farba, 9-pokrywa górna.

## 2. MODEL OBLICZENIOWY

W modelu matematycznym założono, że przepływ płynu jest laminarny i nieściśliwy, a stałe materiałowe płyty grzejnej są niezależne od temperatury ze względu na stosunkowo niewielkie zmiany temperatury płyty grzejnej w stosunku do maksymalnych dozwolonych warunków cieplnych stopu Haynes-230. Dodatkowo przyjęto, że zjawiska fizyczne zachodzące na krawędziach bocznych modułu pomiarowego nie mają wpływu na parametry termodynamiczne w jego środkowej części. Stąd dalsze rozważania dotyczą tylko środkowej części modułu, dla której uwzględniono wymiar  $x$  równoległy do kierunku przepływu czynnika FC-72 oraz prostopadły do niego, wymiar  $y$  odnoszący się do grubości powierzchni grzejnej ( $\delta$ ) i głębokości minikanalu. Stacjonarny proces wymiany ciepła w powierzchni grzejnej opisany został przez dwuwymiarowe równanie Poissona

$$\Delta T = -\frac{q_v}{\lambda}, (x, y) \in \Omega \quad (1)$$

gdzie  $\Omega = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : 0 < x < L, 0 < y < \delta\}$ ,  $q_v$  - objętościowy strumień ciepła generowany przez powierzchnię grzejną,  $\lambda$  - przewodność cieplna powierzchni grzejnej,  $L$  - długość minikanalu.

Dla równania (1) przyjęto odpowiednie warunki brzegowe

$$T(x_k, 0) = T_k \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T(x, 0)}{\partial y} = q_{loss} \quad (3)$$

$$a) \quad \frac{\partial T(0, y)}{\partial x} = 0 \quad b) \quad \frac{\partial T(L, y)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

gdzie  $T_k$  są dyskretnymi pomiarami temperatury powierzchni grzejnej w punktach  $x_k$  dla  $k=1, 2, \dots, K$ ,  $q_{loss}$  - straty ciepła do otoczenia wyznaczone tak jak w [2].

Problem opisany równaniem (1) z warunkami (2)-(4) jest problemem odwrotnym wymiany ciepła. Dla czynnika chłodniczego FC-72 założono, że jego przepływ w minikanale jest laminarny i stacjonarny o stałej gęstości strumienia masy, a jego temperatura ( $T_L$ ) na styku z powierzchnią grzejną zależy od temperatury płyty grzejnej ( $T$ ), temperatury płynu ( $T_{L,in}$ ) na wlocie i wylocie ( $T_{L,out}$ ) z minikanalu w obszarze wrzenia przechłodzonego, w sposób podany w [6]. Znajomość rozkładu temperatury powierzchni grzejnej pozwala wyznaczyć wartości lokalnych współczynników przyjmowania ciepła na styku: powierzchnia grzejna - czynnik FC-72 z warunku Robinia

$$\alpha_k = \frac{-\lambda \frac{\partial T}{\partial y}(x_k, \delta)}{T(x_k, \delta) - T_L(x_k)} \quad (5)$$

**2.1. Rozwiązanie zagadnienia funkcjami Trefftza**

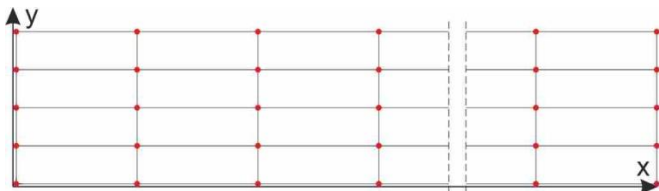
Dwuwymiarowy rozkład temperatury powierzchni grzejnej wyznaczono wykorzystując metodę Trefftza w sposób opisany w [3, 5]. Nieznane rozwiązanie problemu (1) – (4) przybliżone zostało kombinacją liniową funkcji harmonicznyc  $h(x,y)$  [3]

$$T(x, y) \approx \tilde{h}(x, y) + \sum_{i=0}^N a_i h_i(x, y) \quad (6)$$

gdzie  $\tilde{h}$  jest rozwiązaniem szczególnym równania (1), [3]. Współczynniki kombinacji liniowej  $a_i$  w (6) wyznaczone są w oparciu o znane warunki brzegowe w sposób opisany w [3-5].

**2.2. Rozwiązanie zagadnienia w programie ADINA**

Symulacja MES rozważanego zagadnienia została przeprowadzona za pomocą programu ADINA w wersji 9.0. Modelowano przepływ ciepła tylko w płycie grzejnej. Przyjęto takie same warunki brzegowe jak w obliczeniach za pomocą funkcji Trefftza - równania (2)-(4). Przy tych założeniach model MES pokrywa się z przyjętym modelem obliczeniowym (por. [8, rozdz. 2.6]).



Rys. 3. Schemat siatki elementów skończonych.

Fragment siatki elementów skończonych pokazano na rysunku (rys. 3). Zastosowano 4-węzłowe płaskie elementy kondukcyjne [8]. Siatka elementów skończonych liczyła 2000 elementów i 2505 węzłów.

**2.3. Metoda jednowymiarowa**

Wyniki otrzymane przy wykorzystaniu metod opisanych w punktach 2.1 i 2.2 porównano z wynikiem otrzymanym przy zastosowaniu podejścia jednowymiarowego. Zakładając dodatkowo, że przewodzenie ciepła wzdłuż kierunku przepływa jest znikome, w uproszczonym podejściu w przewodzeniu ciepła przez folię grzejną uwzględniono jedynie kierunek normalny do powierzchni folii oraz liniowy rozkład temperatury płynu w rdzeniu przepływu wzdłuż kierunku przepływu płynu w kanale. Metodę jednowymiarową omówiono w [1,2]. W obliczeniach, gęstość strumienia ciepła została pomniejszona o straty ciepła do otoczenia tak jak w [2]. Współczynnik przyjmowania ciepła w obszarze wrzenia przechłodzonego wyznaczono z następującej postaci wzoru:

$$\alpha_k = \frac{q_V \delta - q_{loss}}{T(x_k) - T_L(x_k) - (q_V \delta - q_{loss}) \cdot \frac{\delta}{\lambda}} \quad (7)$$

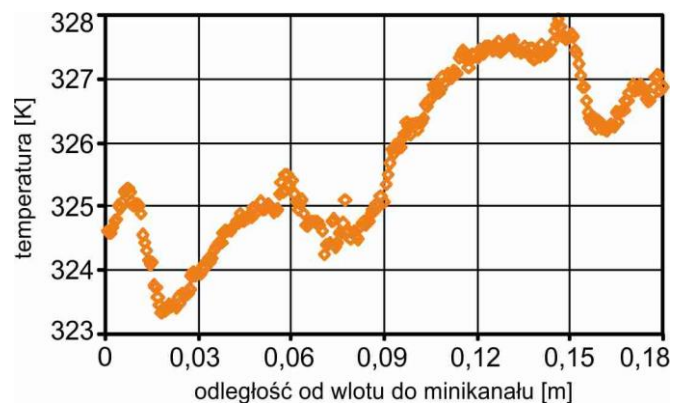
**3. WYNIKI**

Podstawowe parametry cieplno-przepływowe eksperymentu, własności fizyczne materiału płyty grzejnej wykonanej ze stopu Haynes-230 oraz własności fizyczne płynu roboczego FC-72 zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Podstawowe parametry cieplno-przepływowe eksperymentu, własności fizyczne płyty grzejnej i płynu roboczego.

Podstawowe parametry cieplno-przepływowe	
Objętościowy strumień ciepła	7,05·10 <sup>4</sup> kW m <sup>-3</sup>
Prędkość przepływu	0,24 m s <sup>-1</sup>
Strumień masy przepływu	423 kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Temperatura płynu na wlocie	17,4 C
Temperatura płynu na wylocie	26,7 C
Ciśnienie całkowite na wlocie	99 727 Pa
Ciśnienie całkowite na wylocie	80 450 Pa
Niedogrzanie cieczy do temperatury nasycenia na wlocie do kanału	38,9 C
Własności fizyczne płyty grzejnej (Haynes-230)	
Gęstość	8 970 kg m <sup>-3</sup>
Współczynnik przewodzenia ciepła	9,7 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Ciepło właściwe	397 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Własności fizyczne czynnika roboczego (FC-72)- dla fazy ciekłej	
Gęstość	1685 kg m <sup>-3</sup>
Dynamiczny współczynnik lepkości	0,00069578 Pa s
Ciepło właściwe	1044 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Współczynnik przewodzenia ciepła	0,0561 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

Rysunek 4 przedstawia wartości temperatury powierzchni grzejnej od strony pomieszczenia laboratoryjnego w funkcji odległości od wlotu do minikanalu, otrzymanej dla osi kanału na podstawie pomiaru dokonanej kamerą termowizyjną.

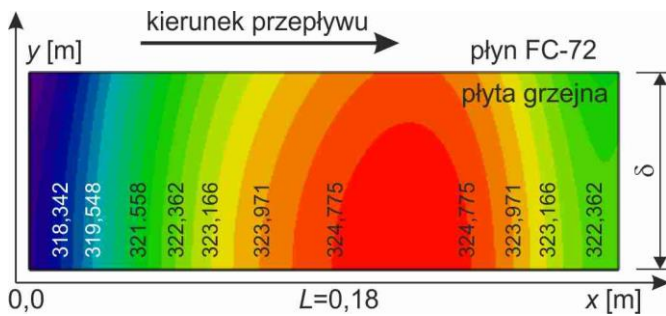


Rys. 4. Wartość zarejestrowanej temperatury zewnętrznej powierzchni grzejnej w funkcji odległości od wlotu do minikanalu (oś kanału).

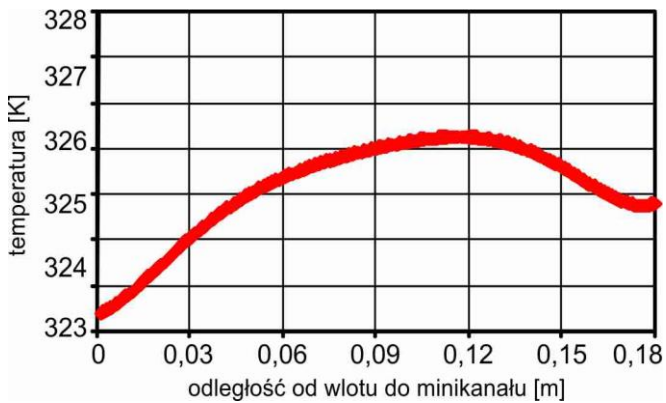
**3.1. Wyniki obliczeń otrzymane metodą Trefftza**

Na rys. 5 przedstawiono dwuwymiarowy rozkład temperatury powierzchni grzejnej, obliczony ze wzoru (6), gdzie użyto dziewięciu funkcji Trefftza. Rysunek 6 prezentuje zależność temperatury powierzchni grzejnej na styku powierzchnia grzejna – płyn od odległości od wlotu do minikanalu.





Rys. 5. Dwuwymiarowy rozkład temperatury powierzchni grzejnej otrzymany metodą Trefftza.



Rys. 6. Zależność temperatury powierzchni grzejnej od odległości od wlotu do minikanalu, otrzymana na styku powierzchnia grzejna – płyn.

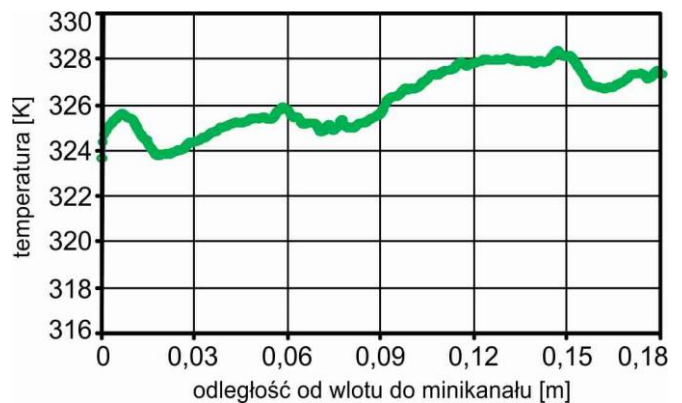
Rysunek 7 pokazuje lokalne wartości współczynników przejmowania ciepła wyznaczone ze wzoru (5).



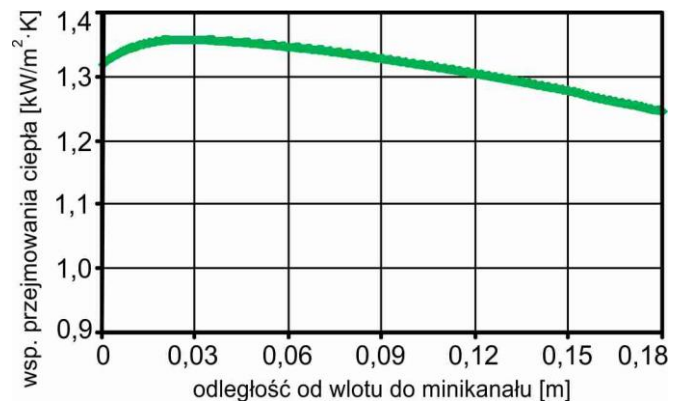
Rys. 7. Zależność współczynnika przejmowania ciepła od odległości od wlotu do minikanalu wyznaczone z wykorzystaniem metody Trefftza.

### 3.2. Wyniki z programu ADINA

Rysunki 8 i 9 przedstawiają rezultaty obliczeń otrzymanych w programie ADINA.; przy czym na rys. 8 pokazano zależność temperatury powierzchni grzejnej w funkcji odległości od wlotu do minikanalu, otrzymany na styku powierzchnia grzejna - płyn, a na rys. 9 - zależność współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do minikanalu.



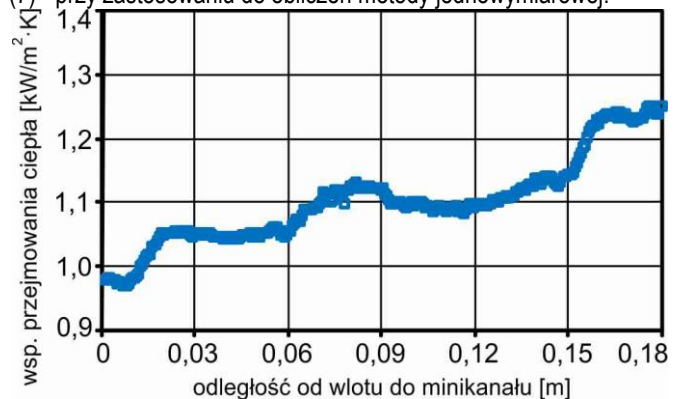
Rys. 8. Zależność temperatury powierzchni grzejnej na styku powierzchnia grzejna – płyn od odległości od wlotu do minikanalu, otrzymana z wykorzystaniem programu ADINA



Rys. 9. Zależność współczynnika przejmowania ciepła od odległości od wlotu do minikanalu wyznaczone z programu ADINA.

### 3.3. Wyniki z metody jednowymiarowej

Na rys. 10 przedstawiono zależność współczynnika przejmowania ciepła od odległości od wlotu do minikanalu, otrzymaną ze wzoru (7) - przy zastosowaniu do obliczeń metody jednowymiarowej.



Rys. 10. Zależność współczynnika przejmowania ciepła od odległości od wlotu do minikanalu obliczona metodą jednowymiarową.

### 3.4. Wnioski i spostrzeżenia

Analiza wykresów współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do minikanalu, otrzymanych przy zastosowaniu trzech różnych metod obliczeniowych - dwóch numerycznych (w tym jednej przy zastosowaniu programu komercyjnego) i uproszczonej metody jednowymiarowej, pozwala uzyskać podobne wartości współczynnika przejmowania ciepła. Zależność funkcyjna współczynnika przejmowania ciepła od odległości od wlotu do minikanalu nie wykazuje jednakowego przebiegu dla wszystkich zastosowanych metod. Porównując wyniki można zauważyć, że zbliżone przebiegi zależno-

ści otrzymano dla metody Trefftza oraz dla podejścia jednowymiarowego. Wykorzystanie obu wymienionych metod do obliczeń dało podobny przebieg zmienności współczynnika przejmowania ciepła, którego lokalne wartości rosną wraz ze zwiększającą się odległością od wlotu do minikanalu. Metoda numeryczna z użyciem funkcji Trefftza pozwala uzyskać wygładzone zależności wielomianowe, natomiast metoda jednowymiarowa jest wrażliwa na wprowadzone do obliczeń dane temperaturowe powierzchni grzejnej otrzymane z kamery termowizyjnej, stąd przebieg zależności nie jest wygładzony. Wyniki otrzymane z numerycznej metody obliczeń wykonanych w programie ADINA dały wyższe wartości współczynnika w obszarze bliskim wlotu do kanału, w porównaniu do wyników z obliczeń wykonanych metodą numeryczną z użyciem funkcji Trefftza oraz z metody jednowymiarowej. Przebieg zależności współczynnika przejmowania ciepła od odległości od wlotu do minikanalu wyznaczony z programu ADINA jest również wygładzony i ma charakter malejący. W dalszych badaniach autorzy planują rozszerzyć wyniki na obszar wrzenia nasyconego.

## PODSUMOWANIE

Praca dotyczy wymiany ciepła podczas wrzenia czynnika chłodniczego FC-72 przepływającego przez wymiennik ciepła z minikanalem prostokątnym o powierzchni rozwiniętej. Celem było wyznaczenie lokalnych współczynników przejmowania ciepła na styku płyty grzejnej i płynu w minikanale, w oparciu o wyniki eksperymentu, podczas którego rejestrowano temperaturę na zewnętrznej powierzchni grzejnej kamerą termowizyjną. Przedstawiono i przeanalizowano wyniki otrzymane z trzech zaproponowanych metod obliczeniowych, w tym dwóch metod numerycznych (obliczenia wg własnego algorytmu wykorzystującego metodę Trefftza oraz programu komercyjnego ADINA), których wyniki skonfrontowano z wynikami obliczeń otrzymanymi z zastosowania uproszczonej metody jednowymiarowej. Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej stwierdzono, że lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła otrzymane z wymienionych metod obliczeniowych są zbliżone, jednak zależność funkcyjna współczynnika przejmowania ciepła wzdłuż długości minikanalu jest różna, zależnie od zastosowanej do obliczeń metody.

## 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. 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.
2. 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.
3. Hożejowska 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, 2008.

4. 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.
5. Hożejowska S., Kaniowski R., Poniewski M.E., *Experimental investigations and numerical modeling of 2D temperature fields in flow boiling in minichannels*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 78, pp. 18–29, 2016.
6. Hożejowska S., Hożejowski L., Piasecka M., *Radial basis functions in mathematical modelling of flow boiling in minichannels*, Proc. Int. Conf. Experimental Fluid Mechanics, 15.- 18.11.2016 Mariánské Lázně, Czech Republic (w druku), 2016.
7. Piasecka M., *Laser texturing, spark erosion and sanding of the surfaces and their practical applications in heat exchange devices*, Advanced Material Research, vol. 874, pp. 95–100, 2014.
8. ADINA CFD & FSI, Raport ARD 13-10, December 2013, ADINA R & D, Inc.

## FLOW BOILING HEAT TRANSFER OF FC-72 IN A HEAT EXCHANGER CONTAINING A MINICHANNEL, MODELLED WITH TREFFTZ FUNCTIONS AND WITH THE AID OF THE ADINA PROGRAM

### Abstract

*The present paper focuses on flow boiling heat transfer with FC-72 in a heat exchanger containing a rectangular minichannel with structured surfaces. An infrared camera recorded temperatures at the external heated surface. The results of the experiments were used to model heat transfer in the minichannel by Trefftz functions and with the aid of the ADINA program. The heat transfer mathematical model was proposed. The model described the inverse heat transfer problems in the measurement module and allowed determining local heat transfer coefficients at the interface between the heated plate and FC-72 in the minichannel. Numerical calculations performed with the Trefftz functions were verified with the results obtained both from the ADINA program and from one dimensional method.*

Autorzy:

mgr inż. **Artur Piasecki** - wykonawca projektu NCN, nr umowy UMO-2013/09/B/ST8/02825

dr inż. **Paweł Łabędzki** - Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

dr hab. **Sylwia Hożejowska** - Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

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