DOI: 10.24427/978-83-67185-30-1_10

Badania wymiany ciepła przy wrzeniu podczas przepływu ekologicznych czynników chłodniczych przez zespół minikanałów

Magdalena PIASECKA[(a)], Kinga STRĄK[(b)]

[(a,b)] Politechnika Świętokrzyska, al. 1000-lecia P.P. 7, 25-314 Kielce, Poland
[(a)] tmpmj@tu.kielce.pl, [(b)] kzietala@tu.kielce.pl

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań wymiany ciepła przy wrzeniu podczas przepływu ekologicznych czynników chłodniczych przez moduł testowy z zespołem minikanałów. Testowano cztery płyny firmy 3M: Novec 649, Novec 7100, Novec 7200 oraz FC-770. Grupa pięciu równoległych minikanałów o przekroju prostokątnym posiadała wspólną ścianę ogrzewaną, grubości 0,1 mm, ze stopu Haynes-230. Podczas serii eksperymentalnych moduł testowy ustawiono poziomo, a przepływ płynu następował nad ścianą ogrzewaną. Pojedynczy minikanał posiadał przekrój1 mm x 6 mm.
Badania wykonano przy zachowaniu stałej wartości masowego natężenia przepływu w warunkach przepływu laminarnego, przy niewielkiej wartości nadciśnienia. W pracy zaprezentowano stanowisko badawcze. Z jednej strony modułu testowego, za pomocą kamery termowizyjnej mierzono temperaturę powierzchni grzejnej od jej strony zewnętrznej z naniesioną czarną farbą o znanym współczynniku emisyjności. Z drugiej strony modułu, poprzez płytę szklaną stanowiącą przezroczystą ścianę kanałów, rejestrowano struktury przepływu dwufazowego przy wykorzystaniu kamery do zdjęć szybkich. Badania eksperymentalne przeprowadzono w warunkach stacjonarnych. Na wlocie i wylocie z kanału mierzono ciśnienie za pomocą przetworników ciśnienia oraz temperaturę płynu z wykorzystaniem termopar typu K. Kontrolowano natężenie prądu dostarczane do ogrzewanej oporowo ścianki minikanałów oraz spadek napięcia, w celu określenia dostarczanego strumienia ciepła. Efektywność procesu wymiany ciepła przy wrzeniu podczas przepływu w minikanałach oceniono na podstawie wartości lokalnych współczynników przejmowania ciepła pomiędzy ścianą ogrzewaną a płynem. Do ich wyznaczenia zastosowano metodę obliczeniową 1D, uwzględniającą jako główny kierunek przepływu ciepła, kierunek prostopadły do przepływu płynu i szerokości kanału. Wyniki badań przedstawiono w postaci zależności temperatury powierzchni grzejnej i współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do minikanału, dla obszaru wrzenia przechłodzonego. Przedstawiono również przebieg krzywych wrzenia, a uwzględnieniem obszaru wrzenia nasyconego. Zaprezentowano charakterystyczne dla przepływu testowanych czynników chłodniczych struktury przepływu dwufazowego. Omówiono otrzymane wyniki. Przeprowadzona analiza miała w szczególności na celu ocenić intensywność wymiany ciepła przy wrzeniu podczas przepływu czynników chłodniczych przez minikanały.

Słowa kluczowe: wrzenie w przepływie, czynnik chłodniczy, minikanał, współczynnik przejmowania ciepła, struktury przepływu dwufazowego.

1. WSTĘP

Wymiana ciepła przebiegająca ze zmianą fazy podczas przepływu przez przestrzenie o niewielkich przekrojach jest obiektem badań naukowców od blisko 30 lat. Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat ukazało się wiele prac związanych z tym zagadnieniem, zarówno o zasięgu międzynarodowym, jak i krajowym. Zagadnienie jest dość skomplikowane, ponieważ w kanałach o małych wymiarach zachodzą procesy bardziej złożone i trudne do identyfikacji, w porównaniu do przepływów w kanałów konwencjonalnych. Należy podkreślić, iż w dobie miniaturyzacji urządzeń, rewolucji informatycznej i ciągłego postępu technologicznego dąży się do konstrukcji kompaktowych wymienników ciepła z przestrzeniami o niewielkich wymiarach. Mniejsze wymiary wymienników wpływają na redukcję kosztów urządzeń oraz pozwalają uzyskać efektywniejsze procesy wymiany

ciepła, w szczególności przebiegające ze zmianą stanu skupienia, w porównaniu do urządzeń o wymiarach konwencjonalnych. Wykorzystanie procesów wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie przez kanały o niewielkiej średnicy hydraulicznej wpływa na otrzymanie dużego strumienia ciepła przy małej różnicy temperatury pomiędzy ścianką grzejną a cieczą nasyconą. W literaturze pojęcie kompaktowego wymiennika ciepła zdefiniował Shah (Shah, 1981), wskazując taki wymiennik, którego stosunek powierzchni wymiany ciepła do jego objętości wynosi ponad 700 m^2/m^3, a średnica hydrauliczna kanału d_h jest mniejsza niż 6 mm (kanały konwencjonalne wg tej klasyfikacji posiadają średnicę hydrauliczną większą niż 6 mm). Inną powszechnie uznawaną klasyfikację kanałów zaproponowali Kandlikar i Grande (Kandlikar i Grande, 2003), zgodnie z którą kanały podzielone zostały zależnie od ich średnicy hydraulicznej na: konwencjonalne (d_h > 3mm), minikanały (3 mm ≥ d_h > 200 μm), mikrokanały (200 μm ≥ d_h > 10 μm), przejściowe mikrokanały (10 μm ≥ d_h > 1 μm), przejściowe nanokanały (1 μm ≥ d_h > 0,1 μm) oraz nanokanały (d_h ≤ 0,1 μm). Aktualnie w kilku polskich ośrodkach badawczych prowadzone są prace o charakterze eksperymentalnym, dotyczące wymiany ciepła podczas przepływu płynu w miniprzestrzeniach, przebiegające ze zmianą fazy. Do zagadnień pokrewnych należą badania wymiany ciepła podczas wrzenia w objętości, z testowaniem mini- i mikrostruktualnych powierzchni grzejnych w celu intensyfikacji procesów. Poniżej zostaną omówione wybrane prace o charakterze badawczym.

W Politechnice Gdańskiej od wielu lat prowadzone są badania wymiany ciepła podczas przepływu płynów przez kanały o niewielkich wymiarach. W zespole J. Cieślińskiego (Boertz i in., 2018) wyznaczano numerycznie liczbę Nusselta i współczynnik tarcia dla turbulentnego przepływu w rurze przy stałym warunku brzegowym strumienia ciepła, z zastosowaniem kilku nanocieczy (zawierających glikol etylenowy, wodę i nanocząstki SiO2). Na podstawie wyników analiz autorzy wskazali, że nanociecze zawierające nanocząstki metaliczne wpływają na poprawę przewodnictwa cieplnego medium. Zespół badawczy D. Mikielewicza, w pracy (Jakubowska, Mikielewicz i Klugmann, 2019) przedstawił wyniki badań wymiany ciepła przy wrzeniu podczas przepływu płynu HFE7000 w pionowym minikanale kołowym o średnicy wewnętrznej 2,3 mm. Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano wzrost współczynnika przejmowania ciepła wraz ze wzrostem strumienia ciepła i temperatury nasycenia, przy czym strumień masy nie wykazywał znaczącego wpływu na wartość współczynnika. Analiza wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie różnych czynników chłodniczych (R134a, R1234yf, R600a, R290, NH3, CO2R236fa, R245fa, R152a i HFE7000) przy wykorzystaniu modelu półempirycznego została omówiona w artykule (Jakubowska i Mikielewicz, 2019). Wyniki badań wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie etanolu przez miniprzestrzenie w płytowym wymienniku ciepła, składającym się z pojedynczej płyty o powierzchni wymiany ciepła 0,1 m × 0,2 m, zostały przytoczone w pracy (Klugmann, Dąbrowski i Mikielewicz, 2020). Pomiędzy płytą a pokrywą wymiennika zlokalizowano miniszczeliny o grubości 0,5 mm i 1,0 mm. Stwierdzono, iż współczynnik przejmowania ciepła wzrasta wraz ze zmniejszaniem się grubości miniszczeliny i osiąga wyższe wartości dla minikanału wielokanałowego w porównaniu do miniszczeliny o tym samym polu przekroju. Wyniki badań wymiennika ciepła z miniszczeliną, przedstawiono ponadto w pracy (Klugmann, Dąbrowski i Mikielewicz, 2019). Naukowcy z Politechniki Gdańskiej prowadzą również prace nad płytowym minikanałowym wymiennikiem ciepła dedykowanym do wysokosprawnych silników mikroturbinowych gazowych z zewnętrzną komorą spalania, zasilanych powietrzem o temperaturze ok. 1000°C (Wajs i in., 2022). W tym celu zastosowano analizę numeryczną płytowego minikanałowego wymiennika ciepła przeprowadzoną na podstawie warunków brzegowych opartych o dane pochodzące z analizy eksperymentalnej.

Grupa naukowców na Politechnice Wrocławskiej zajmuje się procesami wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie czynnika chłodniczego R245fa w 10 równoległych prostokątnych mikrokanałach o średnicy hydraulicznej 1 mm bez ograniczeń wlotowych oraz z ograniczeniami, o szerokości 0,5 mm i długości 2,5 mm (Halon i in., 2022) w warunkach wrzenia przechłodzonego i nasyconego. Prowadzone są również badania wymiany ciepła podczas wrzenia w objętości czynnika R245fa (Halon i in., 2021). We wskazanej pracy wykazano, że współczynnik przejmowania ciepła wzrasta ze wzrostem strumienia ciepła i temperaturą.

W Politechnice Koszalińskiej na przestrzeni wielu lat prowadzone są badania dotyczące wymiany ciepła zachodzące przy zmianie fazy czynnika chłodniczego (wrzenie, skraplanie) podczas przepływu w kanałach. Aktualnie, badania w szczególności dotyczą wymiany ciepła przy skraplaniu, podczas przepływu płynów chłodniczych w minikanałach i kompaktowych wymiennikach ciepła chłodzonych wodą lub powietrzem. W pracy (Kruzel, Bohdal i Sikora, 2020) omówiono wyniki badań podczas kondensacji, przeprowadzane dla następujących czynników

chłodniczych: R134a, R404A, R407Ci R410A. Eksperymenty dotyczyły minikanałów kołowych o średnicach wewnętrznych z zakresu od 0,5 do 2,5 mm oraz miniskraplaczy. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy wskazali, że współczynnik przejmowania ciepła jest zależny od gęstości strumienia ciepła na powierzchni chłodzonej. Badania dla płynu HFE7000 w rurze z minikanałami o średnicy wewnętrznej w zakresie od 1,2 do 2,5 mm omówiono w pracy (Sikora, Bohdal i Formela, 2021). Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych dotyczących wymiany ciepła i dwufazowego spadku ciśnienia porównano z otrzymanymi przy wykorzystaniu zależności zaproponowanych przez innych autorów w literaturze przedmiotu. Badania obejmujące wizualizację przepływu czynników chłodniczych Novec, podczas kondensacji w minikanałach o średnicy wewnętrznej 2,5, 2,0, 1,2 i 0,5 mm, omówiono w artykule (Sikora, 2021). Zespół M. Poniewskiego z Politechniki Warszawskiej (Filia w Płocku) prezentuje badania wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie przez minikanały o przekroju prostokątnym. W badaniach używana jest technika fotograficzna, a do analizy obrazu wykorzystywane jest środowisko MathWorks Matlab 2019b (Płaczkowski, Grabowski i Poniewski, 2021). Do wyznaczenia lokalnych współczynników przejmowania ciepła stosowane są metody matematyczne wykorzystujące funkcje Trefftza (Grabowski i in., 2020).

W Politechnice Świętokrzyskiej na przestrzeni kilkudziesięciu lat analizowano w różnych grupach badawczych procesy wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie w kanałach o małej średnicy hydraulicznej, jak podczas wrzenia w objętości. Przykładowo, tematyka pracy (Kaniowski i Poniewski, 2013) dotyczy wymiany ciepła podczas wrzenia czynnika chłodniczego FC-72 w prostokątnym pionowym minikanale, z obserwacją struktur przepływu dwufazowego i wyznaczaniem stopnia zapełnienia. Aktualnie, R. Pastuszko i R. Kaniowski zajmują się wymianą ciepła podczas wrzenia w objętości różnych płynów roboczych na powierzchniach rozwiniętych, zawierających mikrokanały o porach otwartych (Kaniowski i Pastuszko, 2018)(Kaniowski i Pastuszko, 2021) lub gładkich mikro-żeber (Kaniowski i Pastuszko, 2018). Testowany jest system równoległych minikanałów o wymiarach: szerokości 0,3 mm, głębokości od 0,2 do 0,5 mm i skoku 0,6 mm, przy czym gładkie mikro-żebra posiadały wysokość 0,5 mm. Wymiana ciepła podczas wrzenia w objętości, gdy moduł testowy posiadał powierzchnię rozwiniętą, wytworzoną przy zastosowaniu techniki laserowej, jest tematem prac innego zespołu badawczego (Orman i in., 2020), (Orman, Radek i Kapjor, 2018). W poprzednich pracach autorek niniejszej pracy przedstawiono m. in. wyniki badań wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie różnych płynów roboczych przez pojedyncze minikanały o wymiarach: głębokość 1 - 1,7 mm, szerokość 16 mm i długość 180 mm, z zastosowaniem różnych rozwinięć powierzchni grzejnej, zmiennych parametrów cieplno-przepływowych i orientacji przestrzennej minikanałów ogrzewanych asymetrycznie (Piasecka, 2019)(Piasecka, Strąk i Maciejewska, 2021)(Piasecka i Strąk, 2021) (Strąk i Piasecka, 2020). W eksperymentach wykorzystano również moduł testowy z miniprzestrzenią pierścieniową. Aktualnie większość prowadzonych badań dotyczy modułu testowego z zespołem minikanałów.

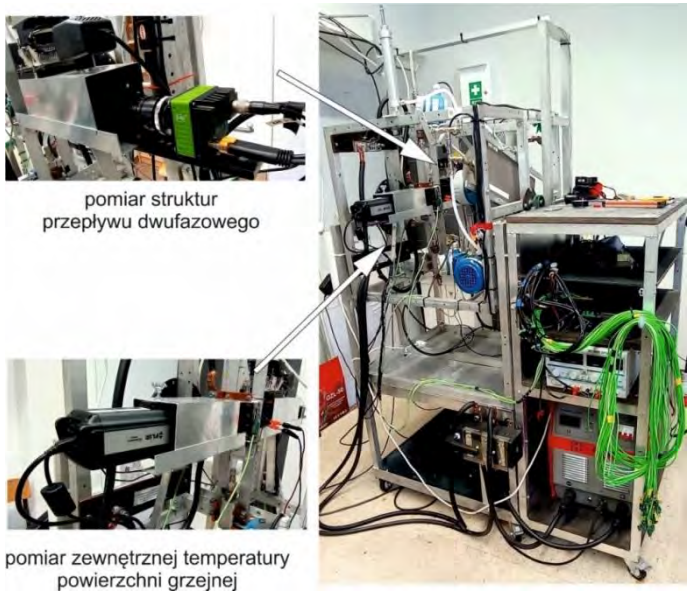
W niniejszym rozdziale omówiono wyniki badań wymiany ciepła przy wrzeniu przechłodzonym podczas przepływu czterech płynów chłodniczych (Novec 649, Novec 7100, Novec 7200 oraz FC-770). W eksperymentach wykorzystano moduł testowy ustawiony poziomo, z zespołem pięciu równoległych minikanałów posiadających wspólną ścianę grzejną. Wyniki badań zaprezentowano w postaci: zależności temperatury powierzchni grzejnej i współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, krzywych wrzenia oraz typowych struktur przepływu dwufazowego.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

2.1. Stanowisko badawcze

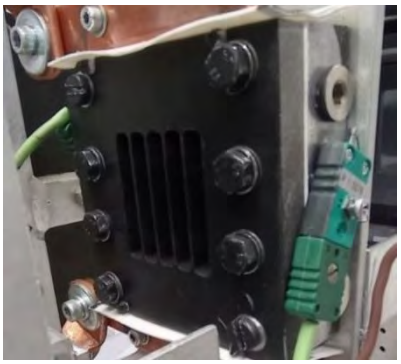
Stanowisko badawcze, zaprezentowane na Rys. 1, składa się z kilku obiegów i systemów pomiarowych. Do najważniejszych należą: przepływowy obieg główny czynnika roboczego, system akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych, system zasilania i kontroli oraz system oświetlenia. Podstawowym elementem obiegu przepływowego jest moduł testowy z grupą pięciu minikanałów o przekroju prostokątnym, posiadających wspólną ścianę grzejną. Z jednej strony modułu przeprowadza się pomiar pola temperatury na zewnętrznej powierzchni płyty grzejnej, na którą napylono warstwę czarnej farby o znanym współczynniku emisyjności (0,97). Do realizacji tego celu wykorzystywana jest kamera termowizyjna. Z naprzeciwległej strony modułu testowego, poprzez płytę szklaną stanowiącą przezroczystą ścianę kanałów, obserwuje się struktury

przepływu dwufazowego. Do rejestracji struktur wykorzystywana jest monochromatyczna kamera do zdjęć szybkich. Na wlocie i wylocie z kanału następuje pomiar ciśnienia względnego oraz temperatury płynu roboczego z wykorzystaniem termopar typu K. Pojedynczy minikanał posiada wymiary: 1 mm (głębokość), 6 mm (szerokość) oraz 43 mm (długość, odpowiadająca pomiarze temperatury). Podczas eksperymentów zastosowano poziome ustawienie modułu testowego z przepływem płynu powyżej ścianki grzejnej. Jako czynniki robocze w eksperymentach stosowano cztery czynniki chłodnicze firmy 3M: Novec 649, Novec 7100, Novec 7200 oraz FC-770. Do pozostałych elementów obiegu przepływowego wlicza się: pompę zębatą, masowy przepływomierz Coriolisa, przetworniki ciśnienia, regulator ciśnienia, wymiennik ciepła, filtr oraz odpowietrznik. Do podstawowych urządzeń systemu akwizycji i przetwarzania danych i obrazów należą: kamera termowizyjna firmy FLIR typu A655SC (realizująca pomiaru temperatury powierzchni płyty grzejnej), kamera do zdjęć szybkich firmy JAI, model SP-50 0 0M-CXP2(umożliwiająca rejestrację struktur przepływu), dwie stacje akwizycji danych pomiarowych: DaqLab 2005 firmy IO-tech i MCC SC-1608G firmy Measurement Computing oraz komputer PC z oprogramowaniem. Lampy LED o mocy 50 W wspomagają oświetlenie struktur przepływu. System zasilania i kontroli zawiera: źródło zasilania, bocznik, amperomierz i woltomierz. Stanowisko eksperymentalne opisano w pracy (Piasecka i Strąk, 2021).



Rysunek 1: Widok stanowiska badawczego

Rys. 2 prezentuje widok modułu testowego z grupą pięciu minikanałów, od strony pomiaru temperatury powierzchni płyty grzejnej za pomocą kamery termowizyjnej. Podstawowymi elementami modułu są: płyta grzejna o grubości 0,10 mm wykonana ze stopu Haynes-230 z napyloną warstwą czarnej farby oraz płyta szklana (znajdująca się z drugiej strony modułu) umożliwiająca badania wizualizacyjne struktur przepływu dwufazowego. Korpus modułu i pokrywa wykonane są duraluminium PA6, a materiałem bocznych ścianek minikanałów jest teflon.



Rysunek 2: Widok modułu testowego od strony pomiaru temperatury płyty grzejnej, za pomocą kamery termowizyjnej

2.2. Procedura eksperymentalna, testowane czynniki chłodnicze

Eksperymenty wykonano w warunkach stacjonarnych, przy zadanej stałej wartości masowego natężenia przepływu czynnika roboczego (przepływ laminarny) i niewielkiej wartości nadciśnienia w instalacji. Podczas wszystkich eksperymentów parametry cieplno-przepływowe osiągały zbliżone wartości, a moduł testowy ustawiono poziomo, z przepływem płynu roboczego nad płytą grzejną. W każdej serii pomiarowej kontrolowano natężenie prądu dostarczane do ogrzewanej oporowo ścianki grzejnej minikanałów oraz spadek napięcia, w celu określenia dostarczanego strumienia ciepła. Do analizy współczynników przejmowania ciepła na podstawie eksperymentów z wykorzystaniem czterech czynników chłodniczych, wybrano dane uzyskane dla jednakowych gęstości strumieni ciepła, dotyczące obszaru wrzenia przechłodzonego. Pełne serie eksperymentalne, których efektem są skonstruowane krzywe wrzenia, objęły również obszar wrzenia nasyconego. Podczas każdej serii eksperymentalnej, do minikanałów doprowadzano ciecz o temperaturze niższej od temperatury nasycenia, a początkowo wymiana ciepła między płytą grzejną a płynem roboczym następowała na drodze jednofazowej konwekcji wymuszonej. Zwiększanie strumienia ciepła powoduje inicjację wrzenia i występowanie wrzenia przechłodzonego, a w dalszym etapie jego rozwoju – wrzenia nasyconego. W każdym z wybranych eksperymentów jako czynnik roboczy zastosowano inny z czterech ekologicznych czynników chłodniczych.
W Tab. 1 zestawiono podstawowe parametry wszystkich testowanych czynników chłodniczych.

Tabela 1. Parametry testowanych czynników chłodniczych

Parametr czynnika chłodniczego	Czynniki chłodnicze			
	Novec 649	Novec 7100	Novec 7200	FC-770
Temperatura punktu wrzenia (K)	322	307	349	368
Ciśnienie pary (Pa)	$40 \cdot 10^3$	$27 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^3$	$6{,}57 \cdot 10^3$
Gęstość (kg/m^3)	1600	1520	1430	1793
Lepkość kinematyczna (m^2/s)	$0{,}40 \cdot 10^3$	$0{,}38 \cdot 10^3$	$0{,}38 \cdot 10^3$	$0{,}79 \cdot 10^3$
Ciepło parowania (J/kg)	$88 \cdot 10^3$	$112 \cdot 10^3$	$112 \cdot 10^3$	$85{,}9 \cdot 10^3$
Ciepło właściwe (J/(kg·K))	1103	1183	1214	1038
Współczynnik przewodzenia ciepła (W/(m·K))	0,059	0,069	0,069	0,063
Napięcie powierzchniowe (N/m)	0,0108	0,0136	0,0136	1,27
Waga molekularna (g/mol)	316	250	264	399
Potencjał niszczenia warstwy ozonowej (ODP)	0	0	0	0

Zakresy parametrów wybranych do analizy badań eksperymentalnych zestawiono w Tab. 2.

Tabela 2. Parametry badań eksperymentalnych, wybranych do analizy

Parametr badań	Zastosowany płyn chłodniczy			
	Novec 649	Novec 7100	Novec 7200	FC-770
	Zakres zmienności			
Temperatura czynnika chłodniczego (K)	292-323	292-324	291-318	291-311
Temperatura powierzchni płyty grzejnej (K)	331-340	334-358	367-355	342-370
Ciśnienie na wlocie do kanału (kPa)	164-181	145-159	113-124	119-129
Gęstość strumienia masy (kg/(m^2·s))	196,0-196,2	192,6-192,8	193,0-194,7	198,9-200,7
Niedogrzanie cieczy do temperatury nasycenia na wlocie do kanału (K)	46,1-48,6	55,7-56,5	59,4-61,2	86,4-87,4

Błędy pomiarowe poszczególnych parametrów eksperymentalnych omówiono w poprzednich pracach autorek, przykładowo w (Piasecka, Strąk i Maciejewska, 2021)(Piasecka i Strąk, 2021).

3. OBLICZENIA WSPÓŁCZYNNIKA PRZEJMOWANIA CIEPŁA

Lokalny współczynnik przejmowania ciepła dotyczący powierzchni kontaktu: czynnik chłodniczy - płyta grzejna, wyznaczono podobnie jak w (Piasecka i Strąk, 2021), wykonując obliczenia zgodne jednowymiarową metodą obliczeniową, której finalna zależność ma postać:

$$a(x) = \frac{q_w}{T_P(x) - T_f(x) - q_w \cdot \frac{\delta_P}{\lambda_P}} \qquad \text{Równ. (1)}$$

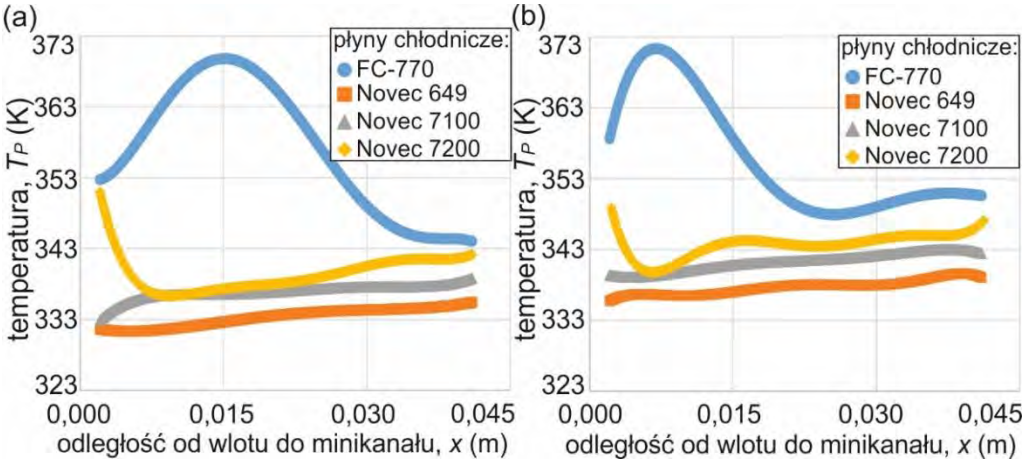
gdzie: q_w – gęstość strumienia ciepła, $a(x)$ – lokalny współczynnik przejmowania ciepła, $T_P(x)$ – lokalna temperatura płyty grzejnej, $T_f(x)$ – lokalna temperatura płynu chłodniczego w rdzeniu przepływu, δ_P – grubość płyty grzejnej, λ_P – współczynnik przewodzenia ciepła płyty grzejnej, x – kierunek prostopadły do kierunku przepływu płynu i szerokości minikanału.
Gęstość strumienia ciepła dostarczanego do płyty grzejnej wyznaczana jest z zależności:

$$q_w = \frac{I \cdot \Delta U}{A_P} - q_{loss} \qquad \text{Równ. 2)}$$

gdzie: A_P – pole powierzchni płyty grzejnej, ΔU – spadek napięcia na długości płyty grzejnej, I – natężenie prądu dostarczanego do płyty grzejnej, q_{loss} – straty ciepła do otoczenia, wyznaczone analogicznie jak w pracy (Piasecka, Strąk i Maciejewska, 2021).
Błędy gęstości strumienia ciepła i współczynnika przejmowania ciepła w obszarze wrzenia przechłodzonego wyznaczano w poprzednich pracach autorek. Błędy gęstości strumienia ciepła wynosiły od 7,2% do 10,5% (Piasecka i Strąk, 2019), a współczynnika przejmowania ciepła zawierały się w zakresie: 3,14 ÷ 5,02% (Piasecka, Strąk i Maciejewska, 2021) oraz 11 ÷ 19,8 % (Piasecka i Strąk, 2019).

4. WYNIKI

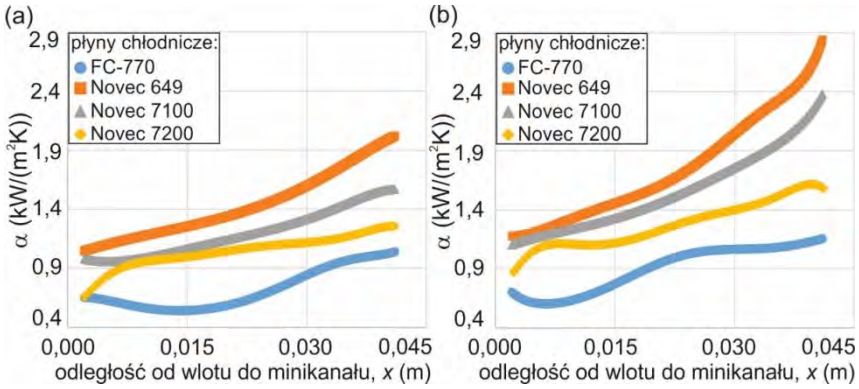
Wyniki otrzymane na bazie danych z eksperymentów, w których jako płyn roboczy zastosowano płyny chłodnicze: Novec 649, Novec 7100, Novec 7200 oraz FC-770, zaprezentowano dla osi symetrii środkowego minikanału, w postaci:
- zależności temperatury powierzchni grzejnej od odległości od wlotu do minikanału, dla dwóch gęstości strumienia ciepła w obszarze wrzenia przechłodzonego - Rys. 3,
- współczynników przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do minikanału, dla dwóch gęstości strumienia ciepła w obszarze wrzenia przechłodzonego - Rys. 4,
- krzywych wrzenia, skonstruowanych dla trzech odległości od wlotu do minikanału - Rys. 5,
- typowych struktur przepływu dwufazowego - Rys. 6.



Rysunek 3: Zależności temperatury powierzchni grzejnej od odległości od wlotu do minikanału dla dwóch gęstości strumienia ciepła: a) q_w = 39 kW/m^2, b) q_w = 47 kW/m^2 (wrzenie przechłodzone)

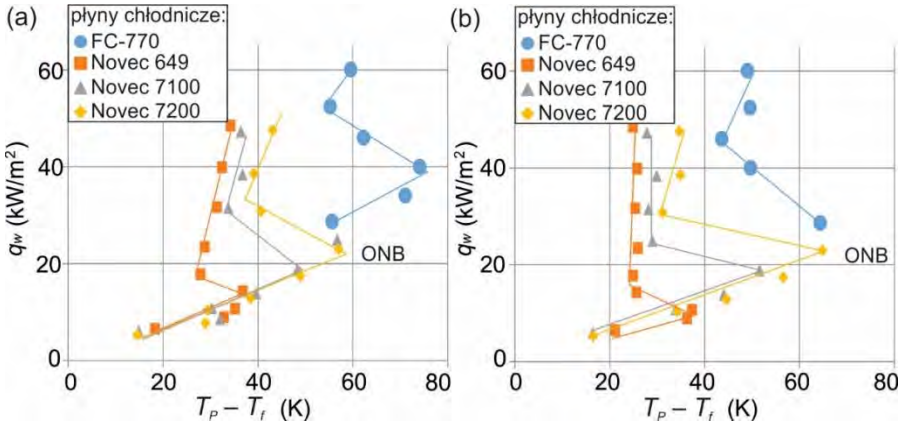
Analizując pokazane na Rys. 3 lokalne temperatury powierzchni grzejnej można zauważyć, iż oprócz wzrostu temperatury powierzchni wraz ze wzrostem dostarczanego strumienia ciepła, dla większości czynników chłodniczych wraz z odległością od wlotu do minikanału występował wzrost temperatury powierzchni grzejnej (pomijając strefę wlotową dla czynnika Novec 7200), dla obu strumieni ciepła.

Najwyższe wartości temperatury powierzchni grzejnej (maksymalna wartość 370 K) uzyskano podczas badań z płynem FC-770, posiadającym najwyższy punkt wrzenia spośród testowanych płynów chłodniczych (Tab.1). Temperatura powierzchni grzejnej zarejestrowana podczas przepływu płynu FC-770 w minikanale wykazywała inną zależność niż pozostałe testowane płyny, z maksimum osiąganym w okolicy wlotowej. Najniższe wartości temperatury powierzchni grzejnej zaobserwowano w rezultatach eksperymentu z zastosowaniem płynu roboczego Novec 649. Na Rys. 4 przedstawiono zależność lokalnego współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do minikanału, dla dwóch gęstości strumienia ciepła.



Rysunek 4: Współczynnik przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do minikanału dla dwóch gęstości strumienia ciepła: a) q_w = 39 kW/m^2, b) q_w = 47 kW/m^2 (wrzenie przechłodzone)

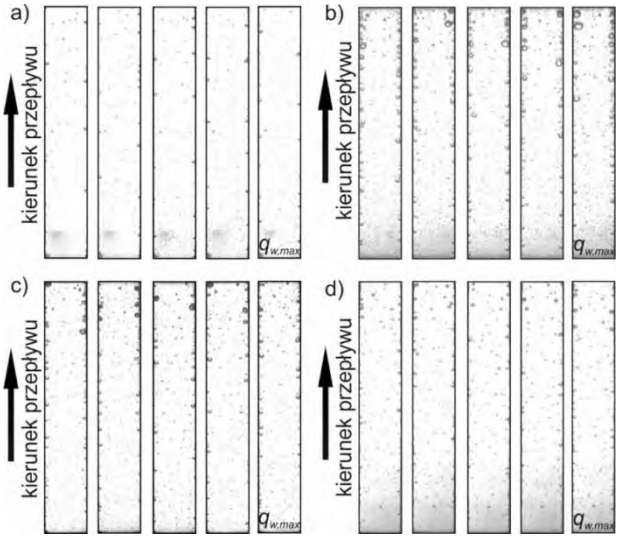
Na podstawie zależności pokazanych na Rys. 4 stwierdzono, że współczynnik przejmowania ciepła osiągał wyższe wartości wraz ze zwiększaniem strumienia ciepła, w przedziale od 0,5 do 2,9 kW/(m^2·K). Ponadto wykazywały tendencję wzrostową wraz ze wzrostem odległości od wlotu do minikanału. Najwyższe wartości współczynnika osiągnięto w badaniach eksperymentalnych z płynem Novec 649 jako roboczym, natomiast najniższe - dla płynu FC-770.
Krzywe wrzenia przedstawiono na Rys. 5 w postaci zależności gęstości strumienia ciepła q_w w funkcji różnicy temperatury powierzchni płyty grzejnej i temperatury płynu w rdzeniu przepływu (T_p - T_f). Skonstruowano je dla dwóch wybranych odległości od wlotu minikanału, tj. 0,014 m (Rys. 5a) oraz 0,029 m (Rys. 5b).



Rysunek 5: Krzywe wrzenia skonstruowane dla wybranych odległości od wlotu do minikanału: a) 0,014 m – 1/3 odległości od wlotu, b) 0,029 m – 2/3 odległości od wlotu, dla zwiększanego strumienia ciepła, obejmujące obszar wrzenia przechłodzonego i nasyconego, oznaczenie ONB – początek wrzenia pęcherzykowego

Krzywe wrzenia zilustrowane na Rys. 5, wykazały typowy przebieg dla płynów chłodniczych, z charakterystycznym uskokiem różnicy temperatury T_p - T_f w obszarze inicjacji wrzenia, towarzyszącemu zjawisku zerowego kryzysu wrzenia i histerezy nukleacji.
Na początku serii pomiarowej, gdy ciecz przechłodzona wpływała do minikanału, wymiana ciepła następowała na drodze konwekcji jednofazowej. Czynnik ogrzewany był wzdłuż przepływu

podczas wzrostu dostarczanego do płyty grzejnej strumienia ciepła. Punkt ONB zaznaczony na krzywej wrzenia odpowiada początkowi wrzenia pęcherzykowego, gdy obserwowany jest nagły spadek temperatury powierzchni grzejnej, powodowany przez tworzące się pęcherze parowe, działające jak upusty ciepła. Zjawisko zerowego kryzysu wrzenia zostało szerzej omówione w pracy (Bohdal, 2001). Powstające pęcherzyki pary intensyfikują wymianę ciepła, zużywają energię niezbędną do zmiany fazy i sprawiają, że przepływ jest turbulentny. Zjawisku zwykle towarzyszy wzrost współczynnika przejmowania ciepła. Największą różnicę temperatur T_p - T_f w obszarze inicjacji wrzenia uzyskano dla płynu Novec 7200, w odległości 2/3 od wlotu, Rys. 5b (ok. 45 K). Ze względu na fakt, iż płyn FC-770 charakteryzował się najwyższą wartością temperatury wrzenia w warunkach ciśnienia atmosferycznego (tzw. punkt wrzenia) w stosunku do pozostałych analizowanych płynów, krzywa wrzenia uzyskana dla FC-770 jest wyraźnie przesunięta w stronę wyższych wartości różnic temperatury T_p - T_f. Dalszemu zwiększaniu strumienia ciepła towarzyszył rozwój wrzenia pęcherzykowego w kanale i występowanie wrzenia nasyconego.
Na Rys. 6 zilustrowano wybrane struktury przepływu dwufazowego, uznane za charakterystyczne dla czterech testowanych czynników chłodniczych, podczas eksperymentów wizualizacyjnych przeprowadzonych podczas wzrostu dostarczanego strumienia ciepła.



Rysunek 6: Charakterystyczne struktury przepływu dwufazowego dla płynów chłodniczych: a) FC-770, b) Novec 649, c) Novec 7100, d) Novec 7200

Porównując obrazy struktur przepływu pokazane na Rys. 6, zauważono, iż w obrazach z eksperymentów z czynnikiem chłodniczym FC-770 występują najbardziej rozdrobnione pęcherzyki pary, w porównaniu do pozostałych płynów uwzględnionych w analizie. Z kolei dla płynu Novec 649, oprócz drobnych pęcherzyków pary, zaobserwowano struktury parowe o największej wielkości w stosunku do pozostałych analizowanych czynników chłodniczych, występujące przy ściankach minikanału w części wylotowej. W wyniku porównania zgromadzonych obrazów struktur przepływu dla płynów Novec 7100 i Novec 7200, nie stwierdzono zasadniczych różnic tworzących się form parowych podczas rozwoju wrzenia pęcherzykowego. Porównanie danych z eksperymentów wizualizacyjnych potwierdziło, iż tworzące się struktury przepływu dwufazowego są zbliżonego kształtu i wielkości. Są to głównie drobne pęcherzyki pary wraz z mniejszymi korkami parowymi (zaobserwowane głównie w części wylotowej kanału).

5. WNIOSKI

W niniejszej pracy omówiono wyniki badań eksperymentalnych wymiany ciepła przy wrzeniu podczas przepływu czterech czynników chłodniczych firmy 3M (Novec 649, Novec 7100, Novec 7200 oraz FC-770) przez moduł testowy z zespołem pięciu równoległych minikanałów o przekroju prostokątnym (głębokość 1 mm), ogrzewanych asymetrycznie wspólną ścianką grzejną. Badania wykonano w warunkach stacjonarnych, przy stałej wartości masowego natężenia przepływu i niewielkim nadciśnieniu. Podczas eksperymentów moduł testowy ustawiono poziomo, a przepływ

płynu roboczego następował nad ścianką grzejną. W celu wyznaczenia lokalnych współczynników przejmowania ciepła na styku płyn chłodniczy - ścianka grzejna zastosowano uproszczoną jednowymiarową metodę obliczeniową. Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, że najniższą temperaturę powierzchni ścianki grzejnej i najwyższe wartości współczynnika przejmowania ciepła w obszarze wrzenia przechłodzonego, uzyskano dla płynu Novec 649, w porównaniu z innymi testowanymi płynami chłodniczymi. Ponadto, stosując ten płyn jako roboczy, zaobserwowano wraz z rozwojem wrzenia pęcherzykowego występowanie największych struktur parowych, a tym samym najwyższy udział fazy parowej w mieszaninie dwufazowej. Z kolei, najwyższą temperaturę powierzchni grzejnej oraz najniższe wartości współczynnika przejmowania ciepła uzyskano dla płynu FC-770. Analizując wyniki badań wizualizacyjnych przepływu dwufazowego dla tego płynu, zaobserwowano jedynie drobne pęcherzyki parowe, a ilość fazy parowej w mieszaninie była najmniejsza w porównaniu do wyników zgromadzonych dla wszystkich czynników roboczych. Sporządzone krzywe wrzenia wykazywały typowy przebieg, z występowaniem histerezy nukleacji. Najwyższą różnicę temperatury płyty grzejnej i płynu w rdzeniu przepływu w warunkach zerowego kryzysu wrzenia otrzymano dla płynu Novec 7200, w porównaniu do pozostałych testowanych płynów chłodniczych.

PODZIĘKOWANIA

Przedstawiona praca została sfinansowana z grantu Narodowego Centrum Nauki nr UMO-2018/31/B/ST8/01199.

NOMENKLATURA

A	pole powierzchni (m^2)	I	natężenie dostarczanego prądu (A)
α	współczynnik przejmowania ciepła ($W \times m^{-2} \times K^{-1}$)	λ	współczynnik przewodzenia ciepła ($W \times m^{-1} \times K^{-1}$)
	gęstość strumienia ciepła ($W \times m^{-2}$)	q_{loss}	straty ciepła do otoczenia ($W \times m^{-2}$)
T	temperatura (K)	ΔU	spadek napięcia (V)
x	kierunek prostopadły do kierunku przepływu płynu i szerokości kanału	δ	grubość (mm)
f	płyn (indeks dolny)	P	płyta grzejna (indeks dolny)

ODNIESIENIA

Boertz, H., Baars, A.J., Cieśliński, J. T., Smoleni S., 2018. Numerical Study of Turbulent Flow and Heat Transfer of Nanofluids in Pipes. Heat Transfer Engineering 39(3), 241–251.

Bohdal, T., 2001. Development of Bubbly Boiling in Channel Flow. Experimental Heat Transfer, 14 (3), 199–215.

Grabowski, M., Hozejowska, S., Maciejewska, B., Płaczkowski, K., Poniewski, M. E., 2020. Application of the 2-D Trefftz Method for Identification of Flow Boiling Heat Transfer Coefficient in a Rectangular MiniChannel. Energies 13(15), 3973.

Halon, S., Gil, B., Bialko, B., Zajaczkowskia, B., 2021. Influence of saturation temperature and heat flux on pool boiling of R245fa. Experimental Heat Transfer 34(7), 587–604.

Halon, S., Krolicki, Z., Revellin R., Zajaczkowski, B., 2022. Heat transfer characteristics of flow boiling in a micro channel array with various inlet geometries. Int. J. of Heat and Mass Transfer 187, 122549.

Jakubowska, B., Mikielewicz, D., 2019. An improved method for flow boiling heat transfer with account of the reduced pressure effect. Thermal Science 23(4), 1261–1272.

Jakubowska, B., Mikielewicz, D., Klugmann, M., 2019. Experimental study and comparison with predictive methods for flow boiling heat transfer coefficient of HFE7000. Int. J. of Heat and Mass Transfer 142, 118307.

Kandlikar, S. G., Grande, W. J., 2003. Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology. Heat Transfer Engineering 24(1), 3–17.

Kaniowski, R., Pastuszko, R., 2018. Comparison of heat transfer coefficients of open micro-channels and plain micro-fins. EPJ Web of Conferences 180, 02041.

Kaniowski, R., Pastuszko, R., 2021. Pool Boiling of Water on Surfaces with Open Microchannels. Energies 14(11), 3062.

Kaniowski, R., Poniewski, M., 2013. Measurements of two-phase flow patterns and local void fraction in vertical rectangular minichannel. Archives of Thermodynamics 34(2), 3–21.

Klugmann, M., Dąbrowski, P., Mikielewicz, D., 2019. Flow Boiling in Minigap in the Reversed Two-Phase Thermosiphon Loop. Energies 12(17), 3368.

Klugmann, M., Dąbrowski, P., Mikielewicz, D., 2020. Flow distribution and heat transfer in minigap and minichannel heat exchangers during flow boiling. Applied Thermal Engineering 181, 116034.

Kruzel, M., Bohdal, T., Sikora, M., 2020. Heat transfer and pressure drop during refrigerants condensation in compact heat exchangers. Int. J. of Heat and Mass Transfer 161, 120283.

Orman, Ł. J., Radek, N., Pietraszek, J., Szczepaiak, M., 2020. Analysis of enhanced pool boiling heat transfer on laser-textured surfaces. Energies 13(11), 1–19.

Orman, Ł. J., Radek, N., Kapjor, A., 2018. Surface Treatment Technologies for Boiling Heat Transfer augmentation. Materials Research Proceedings 5, 216–219.

Piasecka, M., 2019. Wymiana ciepła przy wrzeniu podczas przepływu w miniprzestrzeniach o zróżnicowanej geometrii. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 225 stron.

Piasecka, M., Strąk, K., 2019. Influence of the Surface Enhancement on the Flow Boiling Heat Transfer in a Minichannel. Heat Transfer Engineering 40(13–14), 1162–1175.

Piasecka, M., Strąk, K., 2021. Characteristics of refrigerant boiling heat transfer in rectangular mini-channels during various flow orientations. Energies 14(16), 4891.

Piasecka, M., Strąk, K., Maciejewska, B., 2021. Heat transfer characteristics during flow along horizontal and vertical minichannels. Int. J.of Multiphase Flow 137, 103559.

Płaczkowski, K., Grabowski, M., Poniewski, M. E., 2021. Novel Twofold Use of Photographic Technique for Simultaneous Flow Boiling Image Recording and Void Fraction Computation in a Mini-Channel Experiment. Energies 14(15), 4478.

Shah, R. K., 1981. Classification of heat exchangers', in In: Kakac S., Bergles A. E., Mayinger F., eds., Hemisphere Publishing Washington DC, 9–46.

Sikora, M., 2021. Flow Structure Investigations during Novec Refrigerant Condensation in Minichannels. Materials 14(22), 6889.

Sikora, M., Bohdal, T., Formela, K., 2021. Experimental Study of HFE 7000 Refrigerant Condensation in Horizontal Pipe Minichannels. Materials 14(22), 6886.

Strąk, K., Piasecka, M., 2020. The applicability of heat transfer correlations to flows in minichannels and new correlation for subcooled flow boiling. Int. J. of Heat and Mass Transfer 158, 119933.

Wajs, J., Kura, T., Mikielewicz, D., Fornalik-Wajs, E., Mikielewicz, J., 2022. Numerical analysis of high temperature minichannel heat exchanger for recuperative microturbine system. Energy 238, 121683.