

Wizualizacja wrzenia etanolu na powierzchniach miedzianych z równoległymi mikrokanalami

Robert KANIOWSKI^(a) Robert PASTUSZKO^(a)

^(a) Politechnika Świętokrzyska, Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, Poland
kaniowski@tu.kielce.pl

STRESZCZENIE

Urządzenia stosowane w energetyce projektowane są do pracy w zadanym zakresie temperaturowym. W celu utrzymania właściwej temperatury pracy istotne jest stosowanie odpowiednich wymienników ciepła, wykorzystujących specjalne powierzchnie, umożliwiające zwiększenie współczynnika przejmowania ciepła i odprowadzanego strumienia ciepła. W pracy przedstawiono krzywe wrzenia oraz badania wizualizacyjne etanolu. Średnice oraz częstotliwości odrywających się pęcherzy parowych określono rejestrując obrazy przy użyciu cyfrowej kamery monochromatycznej PHOT MV-D1024-160-CL (Photonfocus). Kamera wykonywała zdjęcia z szybkością 428 klatek na sekundę przy rozdzielczości 500x250 pikseli. Parametry odrywających się pęcherzy porównano z wartościami teoretycznymi, obliczonymi na podstawie zmodyfikowanej zależności Zuber'a. Badania wykonano na powierzchniach miedzianych z naciętymi równoległymi mikrokanalami przy wzrastającej gęstości strumienia ciepła w ciśnieniu atmosferycznym.

Słowa kluczowe: mikrokanaly, wymiana ciepła, wrzenie etanolu, wizualizacja wrzenia.

1. WSTĘP

Układy elektroniczne wysokiej mocy wykorzystywane m.in. w technice kosmicznej, wojskowej, medycznej i jądrowej generują znaczne strumienie ciepła. Do urządzeń wytwarzających duże strumienie ciepła zalicza się układy z procesorami, rury cieplne, kompaktowe wymienniki ciepła, reaktory jądrowe, silniki spalinowe, turbiny gazowe, źródła promieniowania świetlnego dużej mocy oraz różnego rodzaju źródła energii. Wzrost mocy podzespołów elektronicznych przy jednoczesnym zmniejszaniu ich wymiarów wymaga odpowiedniego rodzaju chłodzenia. System chłodzenia powinien umożliwiać odprowadzanie znacznych strumieni ciepła do otoczenia. Uzyskanie możliwie dużej gęstości strumienia ciepła przy małej różnicy temperatury między powierzchnią grzejną i płynem jest możliwe dzięki wykorzystaniu zmiany fazy towarzyszącej procesom wrzenia. Wymiana ciepła przy wrzeniu charakteryzuje się znaczną intensywnością, lecz nowoczesne urządzenia wymagają odprowadzania tak dużych gęstości strumienia ciepła, jakich nie zapewnia proces wrzenia na powierzchniach gładkich. W związku z tym istnieje konieczność poszukiwania nowych metod intensyfikacji wymiany ciepła przy wrzeniu. Polegają one między innymi na zastosowaniu rozwiniętych mikropowierzchni grzejnych, tj. zmianie ukształtowania powierzchni poprzez wykonywanie w niej otworów, mikrożeber, rowków lub zwiększeniu chropowatości. Skutecznym sposobem intensyfikacji wymiany ciepła przy wrzeniu jest powiększenie liczby ośrodków nukleacji i zapewnienie ich ciągłego działania Chuang i in. (2019), Surtaev i in. (2018). Ze względu na znacznie obniżoną temperaturę wrzenia, ciecze organiczne, takie jak etanol, stanowią atrakcyjną alternatywę dla wody jako płyny robocze w dwufazowych wymiennikach przenoszących duże strumienie ciepła. Shen i in. (2019) stosowali powierzchnie z naprzemiennym układem struktur hydrofilowych i hydrofobowych, uzyskując około trzykrotne zwiększenie współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu etanolu. Sinha i in. (2022) stosując wrzenie etanolu na powierzchniach pokrytych tlenkiem tytanu, uzyskali około dwukrotny wzrost współczynnika przejmowania ciepła. Kalani i Kandlikar (2013) wykorzystali otwarte struktury mikrokanalowe (głębokość kanału 0,245 – 0,470 mm, szerokość 0,194 – 0,406 mm) do badania

współczynnika przejmowania ciepła, również wykorzystując etanol jako czynnik roboczy. Największe współczynniki przejmowania ciepła, powyżej $70 \text{ kWm}^{-2}\text{K}^{-1}$, uzyskano dla mikrokanalów o głębokości 0,46 mm i szerokości 0,2 mm.

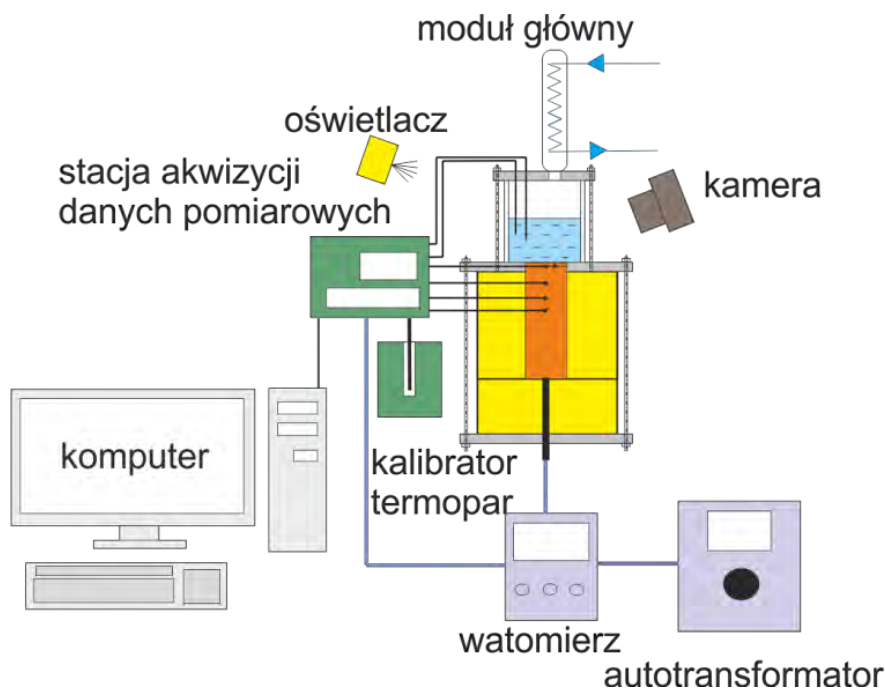
W artykule przedstawiono badania eksperymentalne wymiany ciepła w warunkach wrzenia pęcherzykowego etanolu. Celem badań było wyznaczenie eksperymentalne współczynników przejmowania ciepła na powierzchniach rozwiniętych, porównanie z powierzchnią gładką oraz określenie metodą obliczeniową średnicy oraz częstotliwości odrywania się pęcherzy parowych i zestawienie z wielkościami mierzonymi.

2. METODYKA POMIAROWA

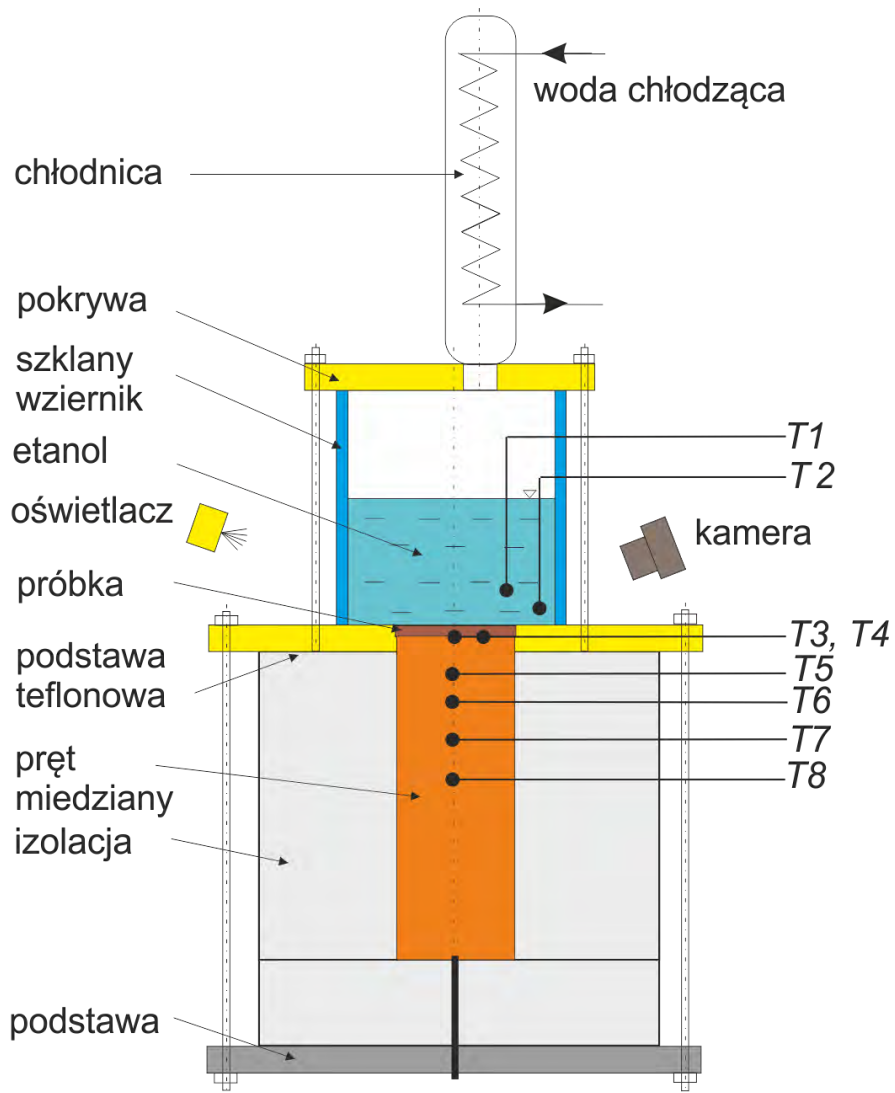
Stanowisko badawcze Kaniowski i Pastuszko (2021a), Pastuszko i in. (2020), rys. 1 i 2, pozwalało na wyznaczenie krzywych wrzenia oraz rejestrację wizualną procesu tworzenia się pęcherzyków pary. Badania eksperymentalne wymiany ciepła na mikrokanalach wykonane zostały w zakresie wrzenia pęcherzykowego do I kryzysu wrzenia przy dużej objętości płynu (ang. *pool boiling*). Poziom cieczy ponad powierzchnią próbki przekraczał 50 mm. Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów, etanol był odgazowywany na stanowisku poprzez doprowadzenie go do wrzenia i utrzymanie tego procesu przez około 15 minut. Dane z pomiarów rejestrowano po ustabilizowaniu się wszystkich wartości temperatur. Badania prowadzono przy ciśnieniu atmosferycznym. Została sprawdzona liniowość pomiarów temperatury wzdłuż pręta miedzianego Kaniowski i Pastuszko (2021b).

Średnice oraz częstotliwości odrywania się pęcherzy parowych wyznaczono w postaci średniej wartości z 8 – 10 miejsc nukleacji dla minimum 30 kolejnych pęcherzy pary. Średnice pęcherzy mierzono w dwóch kierunkach i wyznaczano średnią arytmetyczną. Wielkości te wyznaczono przy stałej wartości gęstości strumienia ciepła. Błąd bezwzględny pomiaru średnicy pęcherza wyniósł 2 piksele, co odpowiada 0,2 mm. Błąd pomiaru częstotliwości odrywania się pęcherza nie może być oszacowany w dokładny sposób, ponieważ zjawisko powstawania i wzrostu pęcherza nie jest równomierne.

Próbki wykonano z miedzi przy pomocy freza palcowego. Powierzchnia wymiany ciepła miała kształt kwadratu o boku 27 mm z naciętymi za pomocą freza tarczowego o szerokości 0,4 mm równoległymi rowkami o głębokości od 0,2 mm do 0,5 mm (rys. 3a). Wymiary na podstawie rysunku 3b podano w tabeli 1.



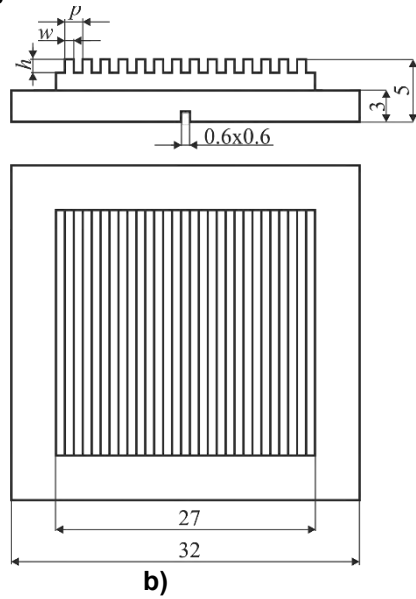
Rysunek 1: Schemat stanowiska pomiarowego



Rysunek 2: Moduł główny



a)



b)

Rysunek 3: a) Zdjęcie powierzchni MC-0.4-0.4-0.8, b) Oznaczenia i wymiary dla powierzchni MC

Tabela 1. Wymiary charakterystyczne próbki (kod powierzchni)

	w , mm	h , mm	ρ , mm
MC-0.4-0.2-0.8	0,4	0,2	0,8
MC-0.4-0.3-0.8	0,4	0,3	0,8
MC-0.4-0.4-0.8	0,4	0,4	0,8
MC-0.4-0.5-0.8	0,4	0,5	0,8

Współczynnik przejmowania ciepła zdefiniowano zgodnie z prawem Newtona jako gęstość strumienia ciepła podzieloną przez różnicę temperatur powierzchni grzejnej i płynu:

$$\alpha = \frac{q}{\frac{T_{T3} + T_{T4}}{2} - q \left(\frac{\delta_{bs}}{\lambda_{Cu}} + \frac{\delta_{Sn}}{\lambda_{Sn}} \right) - \frac{T_{T1} + T_{T2}}{2}} \quad \text{Równ. (1)}$$

Do obliczenia gęstości strumienia ciepła zastosowano jednowymiarowe równanie Fouriera:

$$q = \lambda_{Cu} \frac{T_{T8} - T_{T5}}{L_{T8-T5}} \cdot \frac{\pi d_{cyl}^2}{4a^2} \quad \text{Równ. (2)}$$

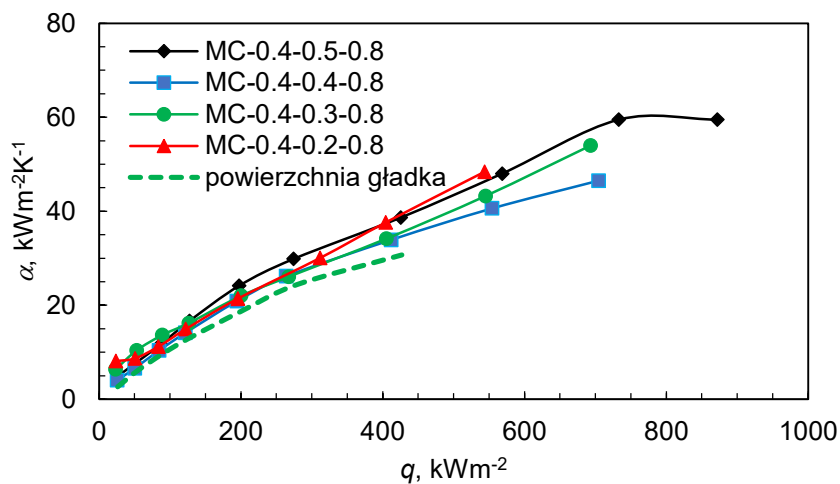
Za pomocą błędu różniczki zupełnej określono niepewność pomiaru Hożejowska i in. (2021):

- Błąd względny pomiaru gęstości strumienia ciepła w przedziale od 24 – 872 kWm⁻² przyjmował wartości między 23% – 2,4%. Największe błędy pomiaru występują przy niewielkich strumieniach ciepła.
- Błąd względny wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła, który zależy od gęstości strumienia ciepła i przegrzania, zawarty między 2,6 a 59,5 kWm⁻²K⁻¹ wyniósł od 25,1% do 4,7%.

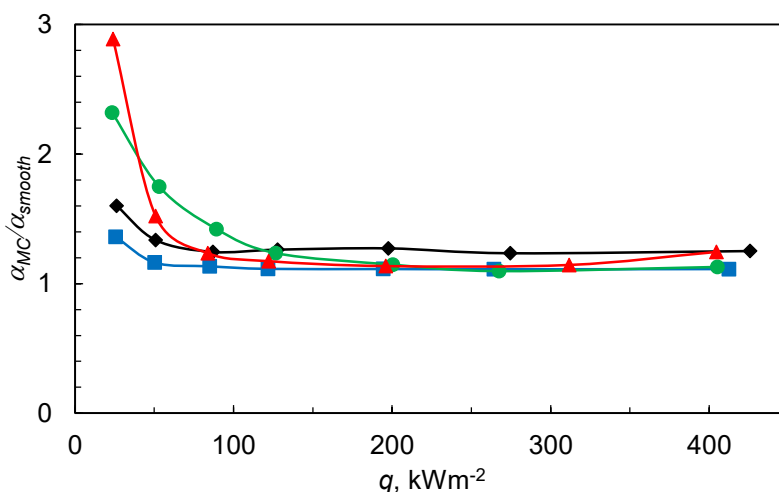
3. WYNIKI

Dla badanych próbek z mikrokanalami stwierdzono nieznaczną intensyfikację wymiany ciepła w porównaniu z powierzchnią gładką (rys. 4). Współczynnik przejmowania ciepła nie jest uzależniony od głębokości mikrokanalu. Spośród badanych próbek najlepsze efekty uzyskano dla powierzchni MC-0.4-0.5-0.8, pozwalającej na uzyskanie współczynnika przejmowania ciepła 59,5 kWm⁻²K⁻¹, przy przegrzaniu około 12,3 K. Można zauważyć niewielki, wzrastający trend krytycznej gęstości strumienia ciepła w funkcji głębokości mikrokanalu. Badane powierzchnie z mikrokanalami umożliwiają uzyskanie od 27% do 105% wzrostu maksymalnej wartości q odniesionej do powierzchni gładkiej. Na rysunku 5 przedstawiono przyrosty α dla powierzchni MC, w odniesieniu do gładkiej powierzchni wzorcowej. W przypadku $q < 100$ kWm⁻² uzyskano maksymalnie trzykrotny przyrost α , a dla pozostałych wartości q przyrost współczynnika przejmowania ciepła był niemal stały i nie przekraczał wartości 1,23. Przy niewielkich gęstościach strumienia ciepła rzędu 25 kWm⁻² powstają pęcherzyki pary o średnicach w zakresie od 0,6 do 1,8 mm, a ich częstotliwość odrywania się od powierzchni grzewczej zmienia się w granicach 60 Hz – 110 Hz (rys. 6,7). W początkowej fazie wrzenia pęcherzykowego wzrost strumienia ciepła powoduje spadek częstotliwości odrywania się pęcherzyków w przypadku powierzchni z mikrokanalami o głębokości 0,3 – 0,5 mm i równoczesny nawet czterokrotny wzrost średnic pęcherzyków w zakresie gęstości strumienia ciepła 25 - 125 kWm⁻² (MC-0.4-0.5-0.8).

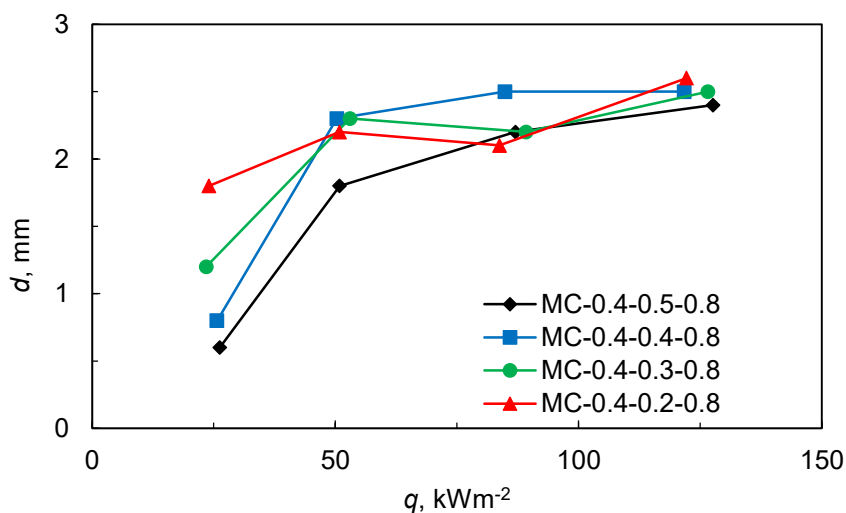
Odmienne zachowuje się powierzchnia z najpłytszymi mikrokanalami: przyrost średnicy wynosi około 44%, czemu towarzyszą minimalne zmiany częstotliwości. Przy gęstościach strumieni ciepła powyżej 50 kWm^{-2} , częstotliwości odrywania się pęcherzyków stabilizują się w zakresie 60 – 70 Hz, co wiąże się z generowaniem pęcherzy o średnicach powyżej 1,8 mm.



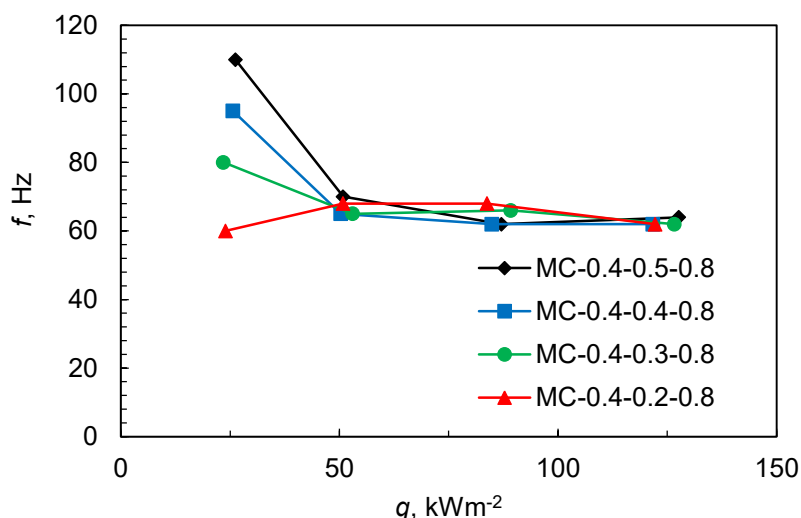
Rysunek 4: Współczynnik przejmowania ciepła w funkcji gęstości strumienia ciepła



Rysunek 5: Gęstości strumienia ciepła w funkcji przegrzania



Rysunek 6: Średnica pęcherzy parowych w chwili oderwania vs. gęstość strumienia ciepła



Rysunek 7: Częstotliwość odrywania się pęcherzy parowych vs. gęstość strumienia ciepła

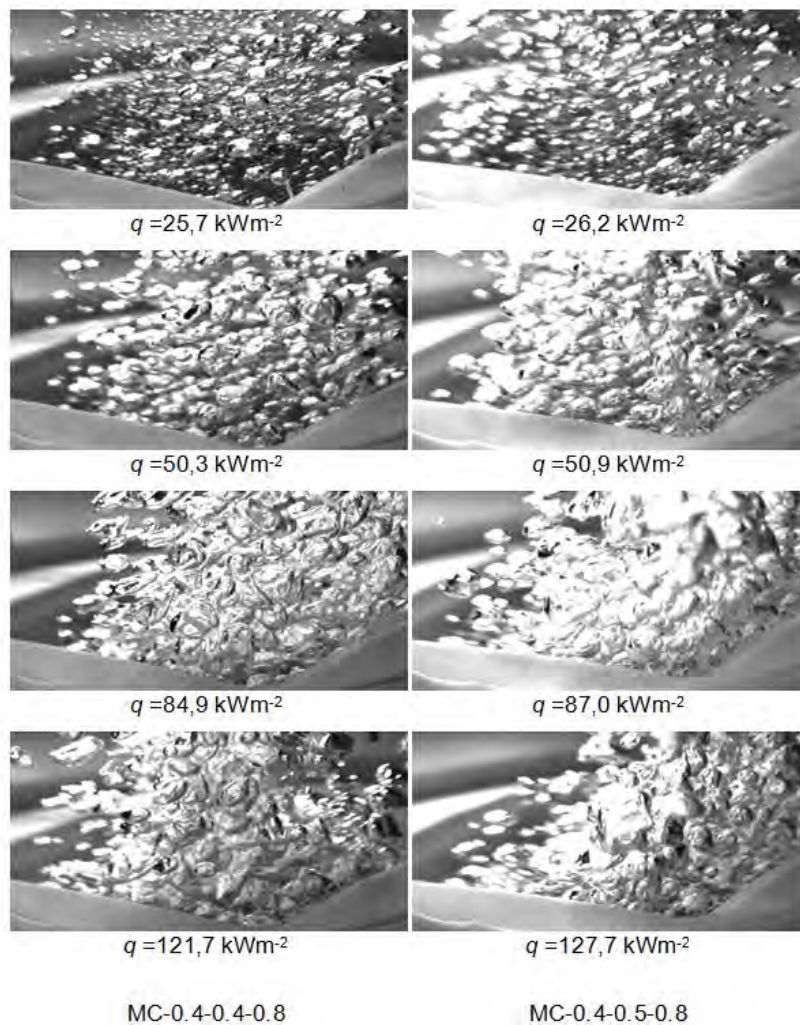
Przy zbliżonych gęstościach strumienia ciepła w początkowej fazie wrzenia pęcherzykowego, ilość miejsc nukleacji jest zbliżona, lecz średnice (rys. 6) i częstotliwości odrywających się pęcherzy (rys. 7) pary znacznie się różnią od siebie. Przy wzrastającym q pęcherze pary zaczynają być bardzo podobne do siebie (średnica ok. 2,5 mm), a częstotliwość odrywania jest na tym samym poziomie i wynosi około 65 Hz. Ośrodki nukleacji działają nieprzerwanie, są rozrzucone po całej powierzchni i nie wpływają na siebie. Natomiast przy $q > 86 \text{ kWm}^{-2}$ niektóre pęcherze zaczynają się łączyć a pomiar średnicy i częstotliwości staje się utrudniony. Na rysunku 8 przedstawiono obrazy wrzenia pęcherzykowego etanolu na powierzchni z minikanalami, przy wzrastającym strumieniu cieplnym. Dla małych przegrzań pomiędzy powierzchnią grzejną a płynem, pęcherze pary przyjmują eliptyczne kształty.

Niektóre pory działają cały czas aktywnie, wytwarzając pęcherzyki pary. Pęcherzyki pary zaczynają łączyć się ze sobą jeszcze przed oderwaniem (koalescencja pozioma) i po oderwaniu (koalescencja pionowa). Powyżej wartości gęstości strumienia ciepła 130 kWm^{-2} obserwacje ilościowe stają się niemożliwe, ze względu na przesłanianie obrazu przez pęcherzyki, które łącząc się tworzą tunele parowe oraz duże obszary o nieregularnych kształtach. Zależności pomiędzy częstotliwością i średnicą odrywających się pęcherzy przedstawiono na rys.9. Dane eksperymentalne sprawdzono stosując korelację Zuber (1963):

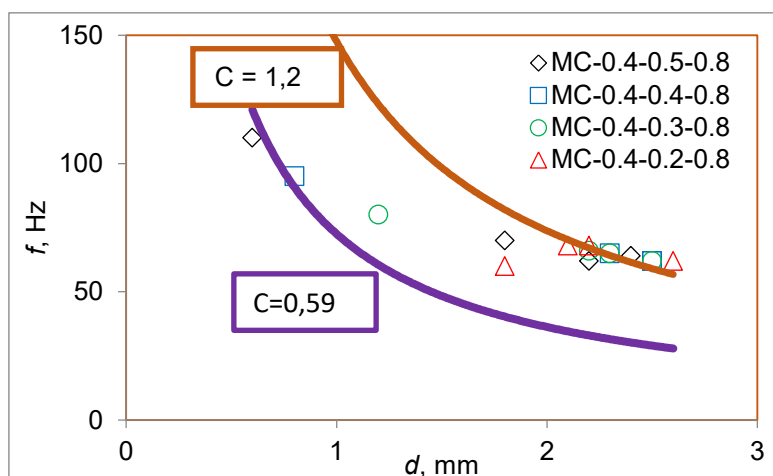
$$fd = C \left(\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_l^2} \right)^{0.25} \quad \text{Równ. (3)}$$

gdzie stała $C = 0,59$.

Biorąc pod uwagę dane eksperymentalne dla wrzenia etanolu na powierzchniach z mikrokanalami, częstotliwości obliczone na podstawie tej korelacji są zaniżone w odniesieniu do większych średnic odrywających się pęcherzy. Korekta współczynnika C w równaniu (3) z 0,59 na 1,2 powoduje, że zależność teoretyczna jest dobrze dopasowana do danych eksperymentalnych w odniesieniu do większych średnic pęcherzy, tj. przekraczających 2 mm, co, z wyjątkiem powierzchni o najgłębszych mikrokanalach, odpowiada gęstościom strumienia ciepła większym od 50 kWm^{-2} .



Rysunek 8: Wizualizacja wrzenia pęcherzykowego



Rysunek 9: Częstotliwość w funkcji średnicy odrywających się pęcherzy

4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wymiany ciepła na powierzchni z równoległymi mikrokanalami podczas wrzenia pęcherzykowego etanolu. Wykonano obrazy wizualizacji pęcherzy pary oraz zmierzono średnice odrywających się pęcherzy i częstotliwości

oderwania od powierzchni. Maksymalna (krytyczna) gęstość strumienia ciepła wyniosła 872,4 kWm⁻², co przewyższa o 105% wartość dla powierzchni płaskiej bez mikrokanalów. Uzyskany współczynnik przejmowania ciepła, około dwukrotnie większy w porównaniu z maksymalnym dla powierzchni gładkiej, był równy 59,5 kWm⁻²K⁻¹ dla powierzchni z mikrokanalami o głębokości 0.5 mm. Zaproponowana zmodyfikowana korelacja Zuber'a daje możliwość uzyskania poprawnej zależności pomiędzy częstotliwością i średnicą odrywających się pęcherzy w zakresie gęstości strumienia ciepła 50 – 125 kWm⁻².

PODZIĘKOWANIA

Badania są częściowo wspierane przez projekt NCN. Projekt został sfinansowany z środków przyznanych na podstawie decyzji nr DEC-2021/05/X/ST8/01098.

NOMENKLATURA

<i>a</i>	szerokość próbki (m)	λ	wsp. przewodzenia ciepła (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
<i>C</i>	stała	ρ	gęstość (kgm ⁻³)
<i>d</i>	średnica (m)	σ	napężenie styczne (Nm ⁻¹)
<i>f</i>	Częstotliwość (Hz)		Indeksy
<i>g</i>	Przyspieszenie ziemskie ms ⁻²	<i>bs</i>	baza próbki
<i>h</i>	wysokość (m)	<i>Cu</i>	miedź
<i>p</i>	podziałka (m)	<i>cyl</i>	cylinder
<i>q</i>	gęstość strumienia ciepła (Wm ⁻²)	<i>l</i>	ciecz
<i>T</i>	temperatura (K)	<i>MC</i>	mikrokanal
<i>w</i>	szerokość (m)	<i>smooth</i>	gładka
	Symbole greckie	<i>Sn</i>	cyna
α	wsp. przejmowania ciepła (Wm ⁻² K ⁻¹)	<i>v</i>	para
δ	grubość, (m)		

LITERATURA

- Chuang, T.J., Chang, Y.H., Ferng, Y.M., 2019. Investigating effects of heating orientations on nucleate boiling heat transfer, bubble dynamics, and wall heat flux partition boiling model for pool boiling. *Applied Thermal Engineering* 163, 114358.
- Hożejowska, S., Kaniowski, R., Pastuszko, R., 2021. Application of the Trefftz Method for Pool Boiling Heat Transfer on Open Microchannel Surfaces. *Heat Transfer Engineering* 0, 1–13.
- Kalani, A., Kandlikar, S.G., 2012. Pool Boiling Heat Transfer Over Microchannel Surfaces With Ethanol at Atmospheric Pressure. *American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, pp. 333–339.
- Kaniowski, R., Pastuszko, R., 2021a. Boiling of FC-72 on Surfaces with Open Copper Microchannel. *Energies* 14, 7283.
- Kaniowski, R., Pastuszko, R., 2021b. Pool Boiling of Water on Surfaces with Open Microchannels. *Energies* 14, 3062.
- Pastuszko, R., Kaniowski, R., Wójcik, T.M., 2020. Comparison of pool boiling performance for plain micro-fins and micro-fins with a porous layer. *Applied Thermal Engineering* 166, 114658.
- Shen, B., Hamazaki, T., Ma, W., Iwata, N., Hidaka, S., Takahara, A., Takahashi, K., Takata, Y., 2019. Enhanced pool boiling of ethanol on wettability-patterned surfaces. *Applied Thermal Engineering* 149, 325–331.
- Sinha, A., Prakash Kar, S., Swain, A., 2022. An experimental study on effect of titanium oxide coated heater substrate on pool boiling enhancement. *Materials Today: Proceedings*, 3rd International Conference on Processing and Characterization of Materials 2021 62, 5948–5955.
- Surtaev, A., Kuznetsov, D., Serdyukov, V., Pavlenko, A., Kalita, V., Komlev, D., Ivannikov, A., Radyuk, A., 2018. Structured capillary-porous coatings for enhancement of heat transfer at pool boiling. *Applied Thermal Engineering* 133, 532–542.
- Zuber, N., 1963. Nucleate boiling. The region of isolated bubbles and the similarity with natural convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 6, 53–78.