## MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

# **M61**

Magdalena Piasecka

# WRZENIE W PRZEPŁYWIE NA ROZWINIĘTYCH POWIERZCHNIACH MINIKANAŁÓW

Kielce 2014

#### MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY NR M61

Redaktor Naukowy serii NAUKI TECHNICZNE – BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN prof. dr hab. inż. Stanisław ADAMCZAK, dr h.c.

Recenzenci prof. dr hab. inż. Tadeusz BOHDAL prof. dr hab. inż. Dariusz MIKIELEWICZ

Redakcja Irena PRZEORSKA-IMIOŁEK

Projekt okładki Tadeusz UBERMAN

© Copyright by Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2014

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana czy rozpowszechniana w jakiejkolwiek formie, w jakikolwiek sposób: elektroniczny bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiowaniem, nagrywaniem na taśmy lub przy użyciu innych systemów, bez pisemnej zgody wydawcy.

PL ISSN 1897-2691

Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej 25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7 tel./fax 41 34 24 581 e-mail: wydawca@tu.kielce.pl www.wydawnictwo.tu.kielce.pl

### Spis treści

Ważniejsze oznaczenia	7
Przedmowa	11
1. WSTĘP	13
2. WRZENIE W PRZEPŁYWIE W MINIKANAŁACH – STAN WIEDZY	16
2.1. Wprowadzenie	16
2.2. Klasyfikacja kanałów	16
2.3. Wrzenie podczas przepływu czynników chłodniczych przez kanały	
o małej średnicy hydraulicznej	18
2.3.1. Minikanały o powierzchniach gładkich	18
2.3.2. Mikro- lub minikanały o powierzchniach rozwinietych	22
2.4. Wpływ wybranych parametrów na proces wrzenia w minikanałach	26
2.5. Wybrane zagadnienia wymiany ciepła przy wrzeniu realizowane	
w polskich ośrodkach	28
2.6. Podsumowanie	36
3. POWIERZCHNIE ROZWINIETE STOSOWANE W BADANIACH	
WYMIANY CIEPŁA	37
3.1. Wprowadzenie	37
3.2. Własne powierzchnie rozwinięte stosowane w badaniach	38
3.2.1. Powierzchnie teksturowane laserowo	40
3.2.2. Powierzchnie wykonane w procesie elektroerozii	40
3.2.3. Powierzchnie piaskowane	41
3.3. Podsumowanie	41
4. BADANIA EKSPERYMENTALNE – METODYKA	42
4.1. Uzasadnienie podiecia tematu	42
4.2. Cel i zakres badań	42
4.3. Stanowisko badawcze	46
4.3.1. Budowa stanowiska badawczego	46
4.3.2. Obieg czynnika roboczego	46
4.3.3. Obiegi wspomagające	48
4.3.4. Sekcja pomiarowa	48
4.3.5. Własności materiałowe odcinka testowego	51
4.3.6. Układ akwizycji danych pomiarowych	51

	4.4.	Rozwiniete powierzchnie grzeine	52
		4.4.1. Powierzchnie teksturowane laserowo	42
		4.4.2. Powierzchnie wykonane w procesie elektroerozji	55
		4.4.3. Powierzchnie piaskowane	56
	4.5.	Wymiana ciepła podczas wrzenia w przepływie – metodyka badań	56
		4.5.1. Skalowanie pomiaru temperatury powierzchni grzejnej	56
		4.5.2. Procedura prowadzenia badań cieplnych	57
		4.5.3. Identyfikacja zjawisk towarzyszących rozwojowi wrzenia w kanale	57
		4.5.4. Podstawowe wielkości charakteryzujące badania eksperymentalne	60
		4.5.5. Zakres zmienności parametrów eksperymentalnych	65
		4.5.6. Procedura analizy obrazów struktur przepływu	66
		4.5.7. Ocena dokładności pomiarów	67
	4.6.	Opory przepływu dwufazowego – metodyka badań	73
		4.6.1. Założenia ogólne	73
		4.6.2. Model homogeniczny	73
		4.6.3. Model rozdzielony	75
	4.7.	Podsumowanie	77
5.	BA	DANIA EKSPERYMENTALNE – WYNIKI I ANALIZA	79
	5.1.	Wprowadzenie	79
	5.2.	Wyniki badań wymiany ciepła	80
		5.2.1. Uwagi ogólne	80
		5.2.2. Badania wizualizacyjne	82
		5.2.3. Wpływ temperatury czynnika roboczego na wymianę ciepła	88
		5.2.4. Wpływ przegrzania powierzchni grzejnej oraz ciśnienia nasycenia	
		na wymianę ciepła	89
		5.2.5. Współczynnik przejmowania ciepła podczas rozwoju wrzenia	91
		5.2.6. Krzywe wrzenia	94
		5.2.7. Mapy i struktury przepływu dwufazowego	97
	5.3.	Wyniki badań oporu przepływu dwufazowego	109
		5.3.1. Wyniki badań oporu przepływu dla kanału pionowego	109
		5.3.2. Wyniki porównawczych badań oporu przepływu dla kanału pionowego	
		1 poziomych	111
	5.4.	Wpływ rodzaju powierzchni rozwiniętej i położenia kanału na rozwój wrzenia	
		i opory przepływu	116
		5.4.1. Wpływ rodzaju powierzchni rozwiniętej i położenia kanału	
		na współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nasyconego	116
		5.4.2. Wpływ orientacji kanału na przebieg krzywych wrzenia	119
		5.4.3. Wpływ rodzaju powierzchni rozwiniętej i położenia kanału	
		na wyznaczone eksperymentalnie opory przepływu	120

5.4.4. Wpływ rodzaju powierzchni rozwiniętej i położenia kanału	
na struktury przepływu dwufazowego	121
5.5. Wpływ wybranych parametrów cieplno-przepływowych i geometrycznych	
na rozwój wrzenia	124
5.5.1. Wpływ ciśnienia wlotowego na rozwój wrzenia	124
5.5.2. Wpływ strumienia masy na rozwój wrzenia	125
5.5.3. Wpływ głębokości i szerokości kanału na rozwój wrzenia	127
5.5.4. Wpływ rodzaju płynu chłodniczego na rozwój wrzenia	127
5.6. Analiza porównawcza wyników badań własnych i innych autorów	128
5.6.1. Uwagi wstępne	128
5.6.2. Wyniki badań własnych a korelacje wymiany ciepła podczas wrzenia	128
5.6.3. Współczynniki przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie	
i objętości na powierzchni rozwiniętej	148
5.7. Propozycja własnego równania kryterialnego	153
5.7.1. Zdefiniowanie parametru rozwinięcia powierzchni	154
5.7.2. Równanie kryterialne dla wrzenia nasyconego	157
5.7.3. Zależności dla inicjacji wrzenia i wrzenia przechłodzonego	159
5.8. Podsumowanie	161
C WNIGOULLWATVCZNE DO DDZVOZŁVCH DADAŃ	162
6. WNIOSKI I WYI YCZNE DO PRZYSZŁYCH BADAN	163
6.1. W nioski z wykonanych badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych	103
6.2. wytyczne do przysztych badan	100
Literatura	168
Streszczenie	183
Summary	185
ZAŁACZNIK A. Własne propozycje wykorzystania powierzchni rozwinietych	
w zastosowaniach praktycznych	187
ZAŁĄCZNIK B. Technika termografii ciekłokrystalicznej	195
ZAŁĄCZNIK C. Uzupełniające rysunki do rozdziału 4	201
ZAŁĄCZNIK D. Uzupełniające rysunki do rozdziału 5 (płyta CD)	211

### Ważniejsze oznaczenia

Symbol	Opis	Jednostka
A	pole powierzchni	$m^2$
BI	początek (inicjacja) wrzenia	-
С	stała w modelu Lockharta–Martinelli'ego	-
Cp	ciepło właściwe	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
d	średnica	m
f	współczynnik strat tarcia	-
g	przyśpieszenie ziemskie	m·s <sup>-2</sup>
G	gęstość strumienia masy	kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>
Н	głębokość	m
hue	barwa w układzie <i>HSI</i>	-
Ι	natężenie prądu	А
i	entalpia właściwa	$J \cdot kg^{-1}$
j	prędkość pozorna	m·s <sup>-1</sup>
L	długość	m
L	stała <i>Laplace'a</i>	m
l	wymiar charakterystyczny pęcherzyka pary	m
M	masa molowa	kg/mol
т	masa	kg
р	ciśnienie	$N \cdot m^{-2}$
$Q_m$	masowe natężenie przepływu	kg·s <sup>-1</sup>
$Q_V$	objętościowe natężenie przepływu	$m^3 \cdot s^{-1}$
$q_w$ , $q$	gęstość strumienia ciepła	W⋅m <sup>-2</sup>
$R^2$	współczynnik determinacji	_
Ra	chropowatość powierzchni	μm
r	ciepło parowania	J·kg <sup>-1</sup>
$S_M$	obwód ogrzewanej części kanału	m

SEE	błąd wpasowania krzywej kalibracyjnej	Κ
Т	temperatura	Κ
U	napięcie	V
u	prędkość przepływu	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$
V	objętość	m <sup>3</sup>
v	objętość właściwa	m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup>
W	szerokość	m
Х	stopień suchości	-
x	współrzędna, kierunek wzdłuż przepływu	m

Greckie	Opis	Jednostka
α	współczynnik przejmowania ciepła	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
β	kąt nachylenia w odniesieniu do poziomu	о
δ	grubość	m
δ	błąd średni kwadratowy	_
Δ	przyrost	_
$\Delta T_{sat}$	przegrzanie powierzchni grzejnej, $\Delta T_{sat} = T_F - T_{sat}$	K
$\Delta T_f$	różnica temperatury, $\Delta T_f = T_F - T_f$	K
$\Delta T_{sub}$	niedogrzanie płynu do temperatury nasycenia na włocie ( $\Delta T_{sub} = T_{sat,in} - T_{f,in}$ )	K
λ	współczynnik przewodzenia ciepła	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
μ	współczynnik lepkości dynamicznej	$N \cdot s \cdot m^{-2}$
ρ	gęstość	kg·m <sup>-3</sup>
$\sigma$	błąd pomiaru temperatury	K
$\sigma$	napięcie powierzchniowe	N·m
Φ	dwufazowy współczynnik w modelu rozdzielonym	_
$\varphi$	stopień zapełnienia	-
χ	parametr Lockharta–Martinelli 'ego	—

#### Liczby podobieństwa

Bo	liczba wrzenia	$Bo = Ku = \frac{q_w}{w}$
Ku	liczba Kutateladzego	$G \cdot r$
Со	liczba ograniczająca	$Co = \frac{1}{d_h} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}}$
Eo	liczba Eötvösa	$g(\rho_l - \rho_v) \cdot d_h^2$
Bd	liczba Bonda	$Eo = Bd = \frac{\sigma}{\sigma}$
Fr	liczba <i>Froude'a</i>	$Fr = \frac{G^2}{\rho^2 \cdot g \cdot d_h}$
Ja	liczba Jakoba	$Ja = \frac{c_{pl} \cdot \rho_l \cdot \Delta T_{sub}}{\rho_v \cdot r}$
Nu	liczba Nusselta	$Nu = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda_l}$
Pr	liczba Prandtla	$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}$
Re	liczba Reynoldsa	$Re = \frac{G \cdot d_h}{\mu}$
We	liczba Webera	$We = \frac{u^2 \cdot d_h \cdot \rho}{\sigma}$

#### Indeksy dolne

A	przyśpieszeniowy
l	ciecz
cal	dotyczy kalibracji
card	dotyczy kart pomiarowych stacji akwizycji danych
exp	eksperymentalny
F	folia
f	płyn
H	hydrostatyczny (grawitacyjny)

Н	homogeniczny
h	hydrauliczny
in	wlot
M	minikanał
nb	wrzenie pęcherzykowe
out	wylot
p	punkt pomiarowy
pb	wrzenie w dużej objętości
prop	proponowany
r	zredukowane (dotyczy ciśnienia)
ref	odniesienia
sat	nasycenie (saturacja), dotyczy wrzenia nasyconego
sens	dotyczy czułości urządzeń pomiarowych
sub	dotyczy wrzenia przechłodzonego
th	termodynamiczny
t	dla przepływu turbulentnego
Т	tarciowy
TP	dwufazowy
theor	teoretyczny
therm	dotyczy termopar
V	para

#### Przedmowa

Monografia jest podsumowaniem prac naukowych, prowadzonych w ramach projektów badawczych w latach 2009–2014 na Politechnice Świętokrzyskiej, kierowanych przez autorkę. W pracy przedstawiono analizowane eksperymentalnie zagadnienia wymiany ciepła i spadku ciśnienia podczas przepływu płynu chłodniczego przez minikanały o grzejnej powierzchni rozwiniętej. Wyniki analiz matematycznych i obliczeń numerycznych związanych z przedstawionym w pracy tematem, omówiono w równolegle wydanej monografii pt. *Zastosowanie funkcji Trefftza do wyznaczania pól temperatury i współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie*, autorstwa: S. Hożejowskiej, B. Maciejewskiej i M. Piaseckiej.

Praca adresowana jest do szerokiego grona inżynierów zainteresowanych zagadnieniami wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie, w szczególności w minikanałach. Celem autorki było napisanie pracy na tyle przystępnej, by skorzystać z niej mogli również studenci piszący prace dyplomowe lub dysertacje doktorskie, związane tematycznie z opisywanymi w monografii zagadnieniami.

Autorka wyraża nadzieję, że niniejsza monografia będzie ważnym opracowaniem pozwalającym na uściślenie zagadnień wymiany ciepła podczas wrzenia w minikanałach, co w konsekwencji uzupełni wiedzę i niezbędną do utworzenia pełnego modelu matematycznego zjawisk wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie w przestrzeniach ograniczonych.

Autorka

# **1** wstęp

Nieustanny postęp technologiczny oraz rewolucja informatyczna są przyczyną wzrostu wymagań energetycznych przy jednoczesnej tendencji do miniaturyzacji nowoczesnych urządzeń. Doprowadzanie energii i chłodzenie elementów elektronicznych wymuszają ciągłe zwiększanie efektywności stosowanych procesów cieplnych. Maszyny, ich elementy i podzespoły wytwarzają podczas pracy ciepło, które powoduje przyrost temperatury tych urządzeń. W celu zapewnienia właściwej, długotrwałej pracy urządzeń i bezpieczeństwa użytkowników, zbyt wysoka temperatura musi być obniżana. Niezmiernie ważne dziedziny przemysłu: energetyka jądrowa, motoryzacja, inżynieria chemiczna i wiele innych – wszędzie tam, gdzie zachodzi przepływ strumieni ciepła o bardzo dużej gęstości – są bezpośrednio zależne od nowych i sprawniejszych wymienników i silników cieplnych. Intensyfikacja wymiany ciepła odgrywa ogromną rolę w mikroelektronice i kompaktowych wymiennikach ciepła.

Skutecznym sposobem chłodzenia jest wykorzystanie procesów wymiany ciepła przebiegających ze zmianą stanu skupienia, ze względu znacznie większą efektywność procesu. Współczynniki przejmowania ciepła uzyskiwane podczas procesu wrzenia są nawet kilkudziesięciokrotnie wyższe niż podczas konwekcji wymuszonej bez zmiany fazy.

Z powodu nieustannego wzrostu technologicznego poszukiwane sa metody pozwalające na intensyfikację wymiany ciepła. Zainteresowanie metodami intensyfikacji wymiany ciepła podczas wrzenia nasiliło się szczególnie od lat 60. XX wieku. Wzrost współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia jest osiągany metodami pasywnymi lub aktywnymi. Z uwagi na duże oszczędności energetyczno-materiałowe, intensywnie rozwijane są techniki pasywne, polegające na modyfikowaniu charakterystyki i struktury powierzchni wymieniającej ciepło. Opracowanie technologii wytwarzania specjalnych powierzchni strukturalnych, stosowanych głównie podczas badań wrzenia w dużej objętości, powodował wielokrotne zwiększenie współczynnika przejmowania ciepła, w porównaniu z powierzchnią technicznie gładką. Rozwinięcie powierzchni grzejnej przez wytworzenie na niej wgłębień, pozwala bowiem na zwiększenie liczby aktywnych ośrodków wrzenia oraz powoduje zwiększenie powierzchni oddającej ciepło. W efekcie występuje zmniejszenie przegrzania powierzchni przy równoczesnym wzroście odprowadzanego ciepła. Wykorzystanie powierzchni rozwiniętej do chłodzenia urządzeń o zwartej konstrukcji (np. mikroprocesorów, układów scalonych o wielkiej skali integracji) lub wykorzystanie jej w elektroenergetyce (przykładowo w elektrociepłowniach opartych na turbinach gazowych), pozwala na dodatkową intensyfikację wymiany ciepła.

Wymiana ciepła, realizowana z wykorzystaniem układów z kanałami o niewielkich wymiarach, jest coraz szerzej badana i stosowana ze względu na ogromny potencjał do transferu 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, dla niewielkich wymiarów układu wymiany ciepła. Zatem miniaturyzacja i duża sprawność cieplna dają się pogodzić, między innymi dzięki wykorzystaniu zjawisk przepływu dwufazowego przy wrzeniu w mini- i mikrokanałach. Należy podkreślić, że prawidłowa praca wielu urządzeń, w których występuje wymiana ciepła przy dwufazowym przepływie, jest związana z wytworzeniem ściśle określonego rodzaju przepływu i stabilnym jego utrzymywaniem.

Reasumując, zastosowanie procesu wrzenia podczas przepływu w minikanałach z rozwiniętą powierzchnią grzejną wykorzystuje kompleksowo wszystkie przedstawione możliwości intensyfikacji wymiany ciepła. Zagadnienie to jednak do dziś jest niedostatecznie rozpoznane. Prezentowane w literaturze wyniki badań dotyczące wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie przez kanały o niewielkich wymiarach są niespójne, a często nawet sprzeczne. W literaturze przedmiotu nie funkcjonują uogólnione, uniwersalne równania kryterialne, które pozwoliłyby, dla różnych geometrii kanałów, prognozować wymianę ciepła. Proponowane przez różnych badaczy korelacje dotyczące obliczania współczynników przejmowania ciepła w kanałach są na ogół weryfikowane eksperymentalnie jedynie dla układów z kanałami o gładkich powierzchniach grzejnych.

W wyniku dotychczasowych badań, prowadzonych przez autorkę od niemal 20 lat w Politechnice Świętokrzyskiej, zbudowano i wyposażono kilka stanowisk badawczych do badania procesu wrzenia w przepływie przez minikanały. Prezentowane w monografii badania są wynikiem eksperymentów przeprowadzonych na najnowszym stanowisku, w którym zasadniczo przeprojektowano i zmniejszono układ przepływowy czynnika chłodniczego, zminiaturyzowano urządzenia, zmodernizowano rozwiązania hydrauliczne obiegu przepływowego oraz unowocześniono system do akwizycji i przetwarzania danych, jak i rejestracji kolorowych obrazów. Najważniejszym innowacyjnym elementem badań jest zastosowanie nowej konstrukcji modułu pomiarowego, pozwalającej na obserwację obu powierzchni kanału i wykorzystanie rozwiniętych powierzchni grzejnych oraz zapewnienie dowolnej orientacji przestrzennej kanału. W eksperymentach wykorzystuje się bezkontaktową metodę pomiaru dwuwymiarowego pola temperatury – termografię ciekłokrystaliczną – do detekcji dwuwymiarowego rozkładu temperatury powierzchni grzejnej. Jednocześnie prowadzona jest bezpośrednia obserwacja struktur przepływu dwufazowego podczas wrzenia płynu chłodniczego w kanale.

Celem przeprowadzonych badań jest analiza procesów wymiany ciepła i towarzyszącego im zagadnienia oporów przepływu dwufazowego w kanale. Inne ważne zagadnienia rozpatrywane w pracy to: wyznaczenie stopnia zapełnienia i stopnia suchości dla wybranych przekrojów (na drodze eksperymentalnej i teoretycznej) oraz rozpoznanie struktur przepływu dwufazowego (wraz ze sporządzeniem map struktur). Kolejnymi analizowanymi w pracy zagadnieniami są: wpływ rozwinięcia powierzchni grzejnej i położenia kanału na rozwój wrzenia i opory przepływu oraz wpływ wybranych parametrów cieplno-przepływowych (ciśnienie i prędkość przepływu), wymiarów geometrycznych kanału i rodzaju płynu chłodniczego na proces wrzenia w kanale.

Ostatnio w literaturze dominują prace analityczno-numeryczne dotyczące zagadnień wymiany ciepła. Spotyka się takie, w których rezygnuje się z badań eksperymentalnych. Wydaje się, że nie jest to właściwe działanie, gdyż eksperyment stanowi bazę do analiz matematycznych i procedur numerycznych, czyli wyniki badań eksperymentalnych służą jako wyjściowe do takich analiz i wówczas oba zagadnienia dopełniają się wzajemnie. Należy mieć na uwadze, że eksperyment jest zawsze najważniejszym czynnikiem, który przyczynia się do bezpośredniego rozwiązywania zagadnień wymiany ciepła przy wrzeniu. Jest to zagadnienie szczególnie istotne w skomplikowanych układach wymiany ciepła, w których wymiar pęcherzyków może być większy niż wymiar kanału, gdyż w takich warunkach trudno jest prognozować wymianę ciepła.

Przedstawione w pracy wyniki badań lokalnego współczynnika przejmowania ciepła posłużyły do numerycznego rozwiązania zagadnienia odwrotnego przepływu ciepła przez moduł pomiarowy. Wyniki zaprezentowano w monografii poświęconej zastosowaniom funkcji *Treffiza* do wyznaczania pól temperatury i współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie [Hożejowska i inni, 2014b].

W pracy zawarto ponadto propozycje praktycznego wykorzystania poruszanych zagadnień. Opracowano kilka koncepcji zastosowania powierzchni rozwiniętych w wymiennikach ciepła. Niektóre z proponowanych koncepcji wdrożono w postaci prototypów, jak np. kolektor słoneczny z absorberem o powierzchni rozwiniętej.

# **2** WRZENIE W PRZEPŁYWIE W MINIKANAŁACH – STAN WIEDZY

#### 2.1. WPROWADZENIE

Badania wymiany ciepła podczas przepływu w przestrzeniach o niewielkich wymiarach są intensywnie rozwijane w nauce światowej dopiero od kilkunastu lat. Badania takie prowadzone są w wielu laboratoriach na całym świecie. Aktualnie również w Polsce zwiększyła się liczba jednostek badawczych, zajmujących się wymianą ciepła w przepływie jedno- i dwufazowym przez mikro- i minikanały.

W niniejszym rozdziale przedstawiono klasyfikację kanałów, wykorzystywanych w badaniach dotyczących wymiany ciepła oraz przegląd wybranych pozycji literatury. Przegląd ten ujmuje wybrane wyniki badań doświadczalnych, dotyczące zagadnień wymiany ciepła podczas konwekcji wymuszonej i wrzenia w minikanałach o różnej geometrii i orientacji przestrzennej, przy czym zagadnienia przedstawiono osobno dla kanałów posiadających powierzchnie gładkie i sztucznie rozwinięte.

#### 2.2. KLASYFIKACJA KANAŁÓW

W literaturze zaproponowano kilka różnych sposobów podziałów kanałów, w których realizowana jest wymiana ciepła. Istniejące w literaturze korelacje, dobrze rozpoznane i eksperymentalnie zweryfikowane dla kanałów o dużych średnicach, często nie dają pożądanych rezultatów w opisie zjawisk, które towarzyszą przepływowi płynu w kanałach o małych wymiarach, zwłaszcza podczas przemian fazowych. Skomplikowane zjawisko zmiany fazy, jakim jest wrzenie, wiaże się z procesem formowania, wzrostu i odrywania pęcherzyków parowych w kanale. Procesy te w mini- czy mikroprzestrzeniach są ograniczone niewielkimi wymiarami kanałów. Proces wrzenia zależny jest od wielu parametrów, z których najważniejsze są: napięcie powierzchniowe, siła wyporu czy naprężenie ścinające na powierzchni. Wspomniane zagadnienia sa bardzo skomplikowane i wymagają opisu, m.in. za pomoca równań ruchu, energii czy masy. W wersji inżynierskiej wykorzystuje się często teorie podobieństwa i analize wymiarowa. W takim podejściu bierze się pod uwage liczby kryterialne, które wiąża wymiar kanału (najczęściej charakteryzowany przez średnice hydrauliczną kanału) z właściwościami termomechanicznymi wrzącej cieczy. Klasyfikację kanałów szczegółowo omówiono między innymi w pracach [Thome, 2004-2010; Cheng i Mewes, 2006; Dutkowski, 2011].

Jedną ze znanych klasyfikacji kanałów, stosowanych w kompaktowych wymiennikach ciepła, sformułował *Shah* i inni [Shah, 1981]. W klasyfikacji tej wartości liczbowe średnic hydraulicznych determinują podział kanałów. Średnicę hydrauliczną  $d_h = 6$  mm uznano jako wymiar rozgraniczający podział na kanały konwencjonalne i minikanały. Liczby kryterialne *Bonda* lub *Eötvösa* wyrażają stosunek sił grawitacji do sił napięcia powierzchniowego, zgodnie z zależnością:

$$Bo = Eo = \frac{g(\rho_l - \rho_v) \cdot d_h^2}{\sigma}.$$
 (2.1)

Jeżeli liczby osiągają duże wartości, oznacza to że dominują siły grawitacji, jeżeli niewielkie, że siłą dominującą jest siła napięcia powierzchniowego. Liczby te często są stosowane jako kryterium podziału kanałów na kanały konwencjonalne i minikanały. W często cytowanej pracy *Brauner* i *Moalema-Marona* [Brauner i Moalem-Maron, 1992] liczbę *Eötvösa* przyjęto jako granicę między pojęciem minikanału i kanału konwencjonalnego.

Wielu autorów jako kryterium graniczne kanałów konwencjonalnych i o małych wymiarach, podawało stałą *Laplace'a L*, powiązaną z liczbą *Bonda* i *Eötvösa*, przykładowo tak jak w [Tripplet i inni, 1999; Passos i inni, 2005], zdefiniowaną:

$$L = \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}} \,. \tag{2.2}$$

Kryterium podziału kanałów na mikro- i makrokanały, zaproponowali również *Kew* i *Cornwell* [Kew i Cornwell, 1997]. Wartość liczby kryterialnej *Co*, zwanej liczbą ograniczającą (ang. *confinement number*), równa 0,5 stanowiła kryterium podziału kanałów. Liczbę tę zdefiniowano jako:

$$Co = \frac{L}{d_h} = \frac{1}{d_h} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}} \,. \tag{2.3}$$

Autorzy stwierdzili, że proces powstawania pęcherzyków parowych, wielkości współczynników wymiany ciepła oraz oporów przepływu dwufazowego w kanałach o małej średnicy, różnią się znacząco od wielkości opisujących przepływ w kanałach konwencjonalnych, gdy liczba kryterialna Co > 0,5. Gdy wartość Co < 0,5 charakter przepływu w kanałach o małej średnicy hydraulicznej staje się porównywalny do przepływu w kanałach konwencjonalnych.

W literaturze można odnaleźć inne modyfikacje przedstawionych liczb kryterialnych, przykładowo zaproponowaną przez *Harirchiana* i *Garimellę* konwekcyjną liczbę  $Co_{conv}$  [Harirchian i Garimella, 2010].

W klasyfikacji podanej przez *Mehendale'ego* i innych [Mehendale i inni, 2000] wyróżniono cztery grupy wymienników ciepła z kanałami. W zależności od średnicy hydraulicznej kanałów wyróżniono podział na: mikrowymienniki (średnica od 1  $\mu$ m do 100  $\mu$ m), mezowymienniki (średnica od 100  $\mu$ m do 1 mm), kompaktowe wymienniki (średnica od 1 mm do 6 mm) oraz konwencjonalne wymienniki ciepła (średnica powyżej 6 mm). W tej klasyfikacji kryterium podziału na kanały o małej średnicy i kanały konwencjonalne stanowi średnica hydrauliczna równa 6 mm.

*Kandlikar* [Kandlikar, 2002a] zaproponował klasyfikację kanałów w zależności od wielkości średnicy hydraulicznej. W podstawowej klasyfikacji wyróżniono następujące rodzaje kanałów: kanały konwencjonalne o średnicy  $d_h > 3$  mm, minikanały o średnicy z zakresu 3 mm  $\ge d_h > 200$  µm oraz mikrokanały o średnicy z zakresu 200 µm  $\ge d_h > 10$  µm.

Uogólnione definicje minikanałów traktują takie kanały jako elementy do realizacji wymiany ciepła, dla których zastosowanie klasycznych teorii nie daje możliwości prawidłowej oceny hydrodynamicznej i termicznej procesów przepływu płynu i zjawisk wymiany ciepła. Według aktualnego stanu wiedzy, w praktyce upowszechniły się dwa podstawowe kryteria podziału kanałów: ze względu na wielkość średnicy hydraulicznej – zaproponowany przez *Kandlikara* oraz podający jako kryterium podziału wartość liczby *Co* – podany przez *Kewa* i *Cornwella*.

#### 2.3. WRZENIE PODCZAS PRZEPŁYWU CZYNNIKÓW CHŁODNICZYCH PRZEZ KANAŁY O MAŁEJ ŚREDNICY HYDRAULICZNEJ

#### 2.3.1. Minikanały o powierzchniach gładkich

W rozdziale skoncentrowano się na przedstawieniu wybranych pozycji literaturowych, traktujących o wrzeniu podczas przepływu płynów chłodniczych przez minikanały. Od końca lat 80. XX wieku do 2005 roku ukazało się stosunkowo niewiele prac na ten temat, przy czym są one często cytowane przez kolejnych, już bardzo licznych badaczy.



**Rys. 2.1.** Krzywa wrzenia dla wrzenia w przepływie czynnika chłodniczego R-113 przez minikanał, opracowana na podstawie [Lazarek i Black, 1982]

Prekursorami badań wymiany ciepła podczas przepływu płynów chłodniczych przez kanały o małej średnicy, choć według przedstawionych klasyfikacji, będących poza zakresem minikanałów, byli *Lazarek* i *Black*. W pracy [Lazarek i Black, 1982], przedstawili oni wyniki badań wymiany ciepła podczas wrzenia czynnika R-113, przepływającego przez pionowy minikanał o średnicy 3,15 mm. Przedmiotem ich obserwacji było zjawisko *histerezy nukleacji*, powstającej podczas przepływu czynnika chłodniczego przez minikanał, które ilustruje pokazana na rysunku 2.1 krzywa wrzenia. Autorzy zaproponowali własne równanie kryterialne do obliczania liczby *Nusselta*, oznaczone w tabeli 5.2 rozdziału 5 jako (5.26).

Przedmiotem zainteresowania *Wambsganssa* i innych [Wambsganss i inni, 1993] była wymiana ciepła podczas przepływu R-113 przez symetrycznie ogrzewany, kołowy minikanał o średnicy 2,92 mm. Badano wpływ wybranych parametrów na współczynnik przejmowania ciepła. Otrzymane eksperymentalnie wartości współczynników przejmowania ciepła porównano z wartościami obliczonymi na podstawie równań zaproponowanych przez innych autorów, otrzymując dużą zgodność z równaniem *Lazarka* i *Blacka*. Identyfikację struktur przepływu, formujących się podczas wrzenia w minikanale o przekroju prostokątnym lub kołowym, omówiono w pracach [Wambsganss i inni, 1991, 1993].

W [Chin, 1997; Chin i inni, 1998a,b] przedstawiono badania wymiany ciepła podczas przepływu czynnika R-11 przez pionowy, asymetrycznie ogrzewany minikanał o głębokości 1 mm. W badaniach wykorzystano termografię ciekłokrystaliczną w celu identyfikacji rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej. Eksperymenty dotyczyły obszarów konwekcji wymuszonej, inicjacji wrzenia oraz rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego, w warunkach przepływu laminarnego i turbulentnego. Inicjację wrzenia obserwowano jako *front wrzenia*, charakteryzujący się silnym spadkiem temperatury powierzchni grzejnej. W zależności od rodzaju przepływu wyróżniono dwa rodzaje inicjacji wrzenia. Zaprezentowano własne zależności na prognozowanie inicjacji wrzenia, zależnie od przebiegu *histerezy nukleacji*. Wyniki poszerzonych badań eksperymentalnych, z zastosowaniem minikanałów o różnych głębokościach (2 mm, 1 mm i 0,5 mm), omówione zostały przez *Hollingswortha* [Hollingsworth, 2004]. Zaproponowano parametr *turning angle*, definiowany jako "skalarny miernik przejścia do rozwiniętego wrzenia".

Ammerman i You [Ammerman i You, 1998] użyli w badaniach czynnik FC-87, przepływający przez asymetrycznie ogrzewany, poziomy minikanał o przekroju kwadratowym, o bokach: 2 mm, 1 mm i 0,5 mm. Zainteresowano się wymianą ciepła podczas konwekcji wymuszonej i wrzenia w przepływie. Zauważono, że zmniejszanie wymiarów minikanału sprzyja intensyfikacji wymiany ciepła i powoduje uzyskanie wyższych wartości współczynnika przejmowania ciepła.

Yan i Lin w [Yan i Lin, 1998] przedstawili rezultaty badań eksperymentalnych, których celem było określenie współczynnika przejmowania ciepła i spadku ciśnienia podczas przepływu czynnika chłodniczego R-134a przez 28 minikanałów o jednakowej średnicy 2 mm, tworzących płaską wiązkę ogrzewaną symetrycznie. Badano wpływ strumienia ciepła na strumień masy oraz wpływ parametrów cieplno-przepływowych na wymianę ciepła i spadek ciśnienia w kanale, m.in. zaobserwowano, że współczynnik przejmowania ciepła wzrasta ze wzrostem strumienia ciepła i ciśnienia. Porównano wartości współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia w kanałach o małej średnicy z danymi otrzymanymi dla kanałów o dużych wymiarach (powyżej 8 mm), przy czym okazał się on wyższy o 30÷80%. *Bao* i inni w [Bao i inni, 2000a,b] przedstawili wyniki badań wymiany ciepła podczas wrzenia czynników chłodniczych R-11 i R-123 przepływających w równomiernie ogrzewanym, poziomym minikanale o średnicy 1,95 mm. Autorzy określili wpływ wybranych parametrów, takich jak: strumień masy, gęstość strumienia ciepła, stopień suchości i ciśnienie na współczynnik przejmowania ciepła w obszarze wrzenia. Stwierdzono, że współczynnik wzrasta ze wzrostem strumienia ciepła i ciśnienia oraz nie zależy od strumienia masy.

Badania konwekcji wymuszonej podczas wrzenia w przepływie czynników R-123 i FC-72 w kołowym minikanale o średnicach: 0,19 mm, 0,3 mm i 0,51 mm, zaprezentowano w [Yen i inni, 2003]. Stwierdzono, że współczynnik przejmowania ciepła zmniejsza się ze wzrostem stopnia suchości i nie zależy od strumienia masy. Wartości współczynnika przejmowania ciepła różniły się od uzyskiwanych w kanałach konwencjonalnych. Wykorzystanie wybranych z literatury zależności nie przyniosło zgodności z wynikami z eksperymentu.

W pracy [Huo i inni, 2004] omówiono badania wrzenia czynnika R-134a w rurce o średnicach: 2,01 mm i 4,26 mm. Autorzy wyróżnili dwie strefy: wrzenia pęcherzykowego, w której współczynnik przejmowania ciepła zależy od strumienia ciepła i ciśnienia, a nie zależy od strumienia masy i stopnia suchości oraz strefę wrzenia konwekcyjnego, w której współczynnik przejmowania ciepła zależy od strumienia masy i stopnia suchości, a nie zależy od strumienia ciepła.

Eksperymentalne badania wymiany ciepła podczas wrzenia czynników chłodniczych R-134a i R-407C, przepływających przez poziome kanały o średnicy z zakresu od 0,83 mm do 2 mm, przedstawiono w pracy [Lie i inni, 2006]. Celem badań było określenie wpływu stopnia suchości, strumienia masy, temperatury saturacji i strumienia ciepła na współczynnik przejmowania ciepła. Zauważono, że współczynnik ten wzrasta znacząco i prawie liniowo ze stopniem suchości czynnika chłodniczego. Wzrasta on również znacząco ze wzrostem strumienia ciepła, strumienia masy i temperatury saturacji. Zaproponowano empiryczną zależność do obliczania współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu podczas przepływu przez minikanał dla czynników chłodniczych, które wykorzystywano w badaniach.

Wrzenie podczas przepływu przez kanał o małej średnicy hydraulicznej było tematem wielu publikacji *Kandlikara* [Kandlikar, 2002a,b, 2004; Kandlikar i Balasubramanian, 2004; Kandlikar i inni, 2005]. W [Kandlikar, 2002b] przedstawiono: analizę wpływu konfiguracji minikanału wymieniającego ciepło (pojedynczy kanał lub wiele kanałów) na wymianę ciepła i spadek ciśnienia, struktury przepływu, zagadnienia tworzenia pęcherzyków i dwufazowego przepływu oraz wymianę ciepła i spadek ciśnienia podczas wrzenia w przepływie w minikanałach. Mechanizmy wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie w makro- i minikanałach analizowano w [Kandlikar, 2004].

Wiele publikacji *Thome'ego* dotyczyło mechanizmów wymiany ciepła w mikroi minikanałach. W pracy [Thome, 2004] poruszył on podstawowe zagadnienia dotyczące przepływu dwufazowego, wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie w minikanałach, mechanizmów wymiany ciepła w mikrokanałach i modeli wrzenia dla przepływu w mikrokanałach. Zauważono, że otrzymane eksperymentalnie współczynniki przejmowania ciepła dla wrzenia w przepływie są silnie zależne od strumienia ciepła i ciśnienia, a nieznacznie zależą od strumienia masy i stopnia suchości. Stwierdzono, że modele obowiązujące dla kanałów o wymiarach konwencjonalnych (rozpatrywane w makroskali) nie są dostosowane dla określenia współczynników wrzenia w przepływie przez mikrokanały (zagadnienia w mikroskali). W [Thome i inni, 2004] zaprezentowano trzystrefowy model wrzenia w przepływie przez mikrokanały. Modyfikację modelu trzystrefowego zaproponowano w [Agostini i Thome, 2005].

Spośród najnowszych prac, omawiających wyniki badań podczas wrzenia w przepływie czynników chłodniczych przez minikanały wspomniano kilka prac. Jedna z nich [Saraceno i inni, 2012] dotyczy minikanału kołowego i prezentuje kompleksowe wyniki dla wrzenia przechłodzonego i nasyconego czynnika FC-72. Najważniejszą część modułu testowego stanowił minikanał o średnicy 1,016 mm i długości 100 mm, ogrzewany na długości 62 mm. Autorzy, na pod-stawie analizy danych, zaobserwowali zależność współczynnika przejmowania ciepła od strumienia ciepła, szczególnie dokładnie analizowaną w obszarze wrzenia przechłodzonego. Stwierdzili, że współczynnik przejmowania ciepła wzrasta wraz ze wzrostem strumienia ciepła oraz bardzo słabo zależy od stopnia suchości. Podano również, że zależność współczynnika przejmowania ciepła od stopnia suchości jest szczególnie silna w obszarze wrzenia nasyconego. Otrzymano dobrą zgodność wyników własnych z otrzymanymi ze znanej korelacji *Liu i Wintertona* [Liu i Winterton, 1991] (omówiona w rozdziale 5).

Wiele prac Palma dotyczyło wymiany ciepłą ze zmianą fazy, a w szczególności wrzenia w przepływie przez minikanały, wyniki publikowano już od ponad 25 lat. Przykładowo w pracy [Owhaib i inni, 2004] przedstawiono wyniki badania wymiany ciepła podczas wrzenia czynnika chłodniczego R-134a w mini- i makrokanałach. Przedmiotem badań było określenie współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia nasyconego w pionowym kanale, o przekroju kołowym i średnicach: 1,7 mm; 1,224 mm oraz 0,826 mm. Zaobserwowano, że współczynnik ten zależy w dużym stopniu od strumienia ciepła i ciśnienia, a nie zależy od strumienia masy i stopnia suchości. Przeprowadzone eksperymenty pokazały, że osiągane wartości współczynnika przejmowania ciepła w przepływie okazują się być wyższe dla minikanałów niż dla makrokanałów. W [Ali i inni, 2012] przedstawiono wyniki wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie czynników R-134a i R-245fa w poziomym minikanale o średnicy 0,781 mm i długości 191 mm, ogrzewanych równomiernie. Stwierdzono, że współczynnik przejmowania ciepła rośnie wraz ze wzrostem strumienia ciepła, natomiast nie jest on uzależniony od strumienia masy. Wyniki te potwierdziły wcześniej sformułowane wnioski w [Ali i inni, 2011], dotyczące wrzenia w przepływie R-134a przez minikanał o średnicy 1,7 mm i długości 220 mm, w której dodatkowo podano, że współczynnik przejmowania ciepła nie zależy od stopnia suchości, ale wzrasta w niewielkim stopniu wraz ze wzrostem ciśnienia. Jedna z ostatnich prac [Samoteeva i Palm, 2014], prezentująca wyniki badań wrzenia w przepływie czynnika R-134a w minikanale o przekroju prostokątnym i średnicy hydraulicznej 1,253 mm, potwierdza wcześniej sformułowane wnioski. Dodatkowo zaobserwowano, że wpływ stopnia suchości na współczynnik przejmowania ciepła jest obserwowany jedynie dla niskich strumieni ciepła, dla których otrzymywane są bardzo niskie stopnie suchości.

Jak wspomniano, w drugiej połowie pierwszego dziesięciolecia XXI wieku tematyka wymiany ciepła w przepływie przez mini- i mikrokanały stała się przedmiotem zainteresowania coraz większej liczby badaczy. Najczęściej w literaturze można odnaleźć badania na modułach z mikrokanałami – elementów chłodzenia zespołów elektronicznych (ang. *heat sink*), takich jak procesory, obejmujące również procesy zmiany fazy. Badania często dotyczą płynów chłodniczych. Poniżej omówiono przykładową pracę, prezentującą wyniki badań na układach z mikrokanałami, a dotyczącą wymiany ciepła przy wrzeniu podczas przepływu fluorinertu FC-72 w mikrokanałach o przekrojach prostokątnych.

Zagadnienia spadku ciśnienia w przepływie dwufazowym oraz współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie FC-72 przez dwa zespoły mikrokanałów, omówiono w [Park i inni, 2012]. Kanały posiadały przekrój prostokątny, o średnicach hydraulicznych: 61 µm i 278 µm. Zaobserwowano, że spadek ciśnienia wzrasta wraz ze wzrostem stopnia suchości oraz strumienia masy. Nie zaobserwowano wpływu strumienia ciepła na spadek ciśnienia. Stwierdzono, że współczynnik przejmowania ciepła wzrasta wraz ze wzrostem stopnia suchości. Autorzy podali, że na zależność współczynnika od stopnia suchości wpływa ponadto stosunek strumienia ciepła do strumienia masy.

#### 2.3.2. Mikro- lub minikanały o powierzchniach rozwiniętych

W celu intensyfikacji wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie w kanałach o małych wymiarach rozważa się przede wszystkim: zmianę parametrów geometrycznych kanałów oraz ich kąta ustawienia, modyfikację cząstek wrzącego płynu, wykorzystanie w badaniach nanocieczy, a także stosuje się rozwinięte czy porowate powierzchnie grzejne, o różnych stopniach rozwinięcia, uzyskiwane na drodze specjalnych procesów technologicznych. Intensyfikacja wrzenia na rozwiniętych powierzchniach grzejnych następuje ze wzrostem liczby aktywnych zarodków pary – potencjalnych ośrodków nukleacji, w których "uwięziona" para zapewnia duży obszar dla wzrostu pęcherzyków.

Poniżej przedstawiono przegląd prac, które dotyczą zagadnienia wymiany ciepła przy wrzeniu w mini- lub mikrokanałach o powierzchni rozwiniętej. Należy nadmienić, że są to prace nieliczne. Trudno jest odnieść się wyłącznie do pozycji traktujących jedynie o wynikach badań z wykorzystaniem płynów chłodniczych, dlatego też zdecydowano się omówić także badania dla innych, popularnych czynników (wody, etanolu). *Ammerman* i *You* [Ammerman i You, 2001] przeprowadzili eksperymenty podczas wrzenia FC-87 w minikanale o przekroju kwadratowym (wymiar 2 mm) i długości 8 cm. Powierzchnie kanału zostały pokryte powłoką porowatą o grubości ok. 100 μm, z proszku diamentowego o wymiarach 8÷12 μm. Zastosowanie mikroporowatego pokrycia spowodowało inicjację wrzenia przy niższych przegrzaniach powierzchni grzejnej, zaobserwowano również wyższe wartości współczynnika przejmowania ciepła. Ponadto stwierdzono, że mikropokrycie wywarło niewielki wpływ na spadek ciśnienia w przypadku wrzenia przechłodzonego.

Prace [Kosar i inni, 2005a,b] prezentują wyniki eksperymentalnych badań wrzenia w przepływie wody przez kanał o średnicy hydraulicznej 227 μm, posiadający mikrowgłębienia wytworzone na ściankach bocznych kanału. W [Kosar i inni, 2005a] autorzy nie przedstawili konkretnych wniosków dotyczących intensyfikacji wymiany ciepła przy wykorzystaniu powierzchni z mikrowgłębieniami, natomiast głównym przedmiotem ich zainteresowania było wystąpienie krytycznego strumienia ciepła, analiza własnych danych i zastosowanie znanych w literaturze empirycznych równań korelacyjnych oraz przedstawienie własnej zmodyfikowanej zależności do opisu liczby *Nusselta*. W [Kosar i inni, 2005b] autorzy analizowali dane uzyskane przy ciśnieniu atmosferycznym, jak i dla ciśnienia o wartości 47 kPa. Zaobserwowano, że współczynnik przejmowania ciepła przyjmuje zbliżone jakościowo wyniki, ponadto wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia na wylocie dla średnich i wysokich strumieni ciepła. W zależności od strumienia masy i ciepła zaobserwowano dominujący charakter konwekcyjnej wymiany ciepła w rozważanych mechanizmach wymiany ciepła.

W pracy [Kuo i Peles, 2007] przedstawiono wyniki badań wrzenia podczas przepływu wody destylowanej przez pięć mikrokanałów ustawionych równolegle, każdy o przekroju 200 µm x 253 µm i długości 10 mm. Mikrokanały posiadały boczne powierzchnie rozwinięte o mikrowgłębieniach tunelowych o średnicy 50 µm, w rozstawie co 100 µm. Podczas badań ogrzewano dolną powierzchnię kanałów. Przeprowadzono analizę porównawczą wyników z otrzymanymi dla kanałów gładkich, w zakresie współczynników przejmowania ciepła i krytycznego strumienia ciepła. Stwierdzono, że mikrokanały o powierzchniach rozwiniętych pozytywnie wpływają na powtarzalność i jednolitość tworzących się pęcherzyków pary, które są rozmieszczone bardziej równomiernie. Zastosowanie powierzchni rozwiniętych wpływa znacząco na obniżenie strumienia ciepła doprowadzanego do powierzchni grzejnej, w stosunku do kanałów gładkich. Efektywny strumień ciepła w warunkach inicjacji wrzenia dla powierzchni rozwiniętych okazał się być nawet o 70% wyższy niż dla kanałów gładkich, w porównaniu do wszystkich testowanych wartości strumienia masy. Zdaniem autorów wgłębienia na powierzchni kanałów powodują wystąpienie inicjacji wrzenia, przy znacznie niższych przegrzaniach powierzchni, niż ma to miejsce dla kanałów o powierzchni gładkiej.

W badaniach *Khanikara* i innych [Khanikar i inni, 2009] zastosowano pokrycie dolnej powierzchni kanału o szerokości 10 mm i głębokości 0,371 mm nanorurkami węglowymi. W eksperymentach wykorzystywano wodę jako płyn roboczy. Porównując wyniki otrzymane przy wysokich i niskich strumieniach masy zaobserwowano wyraźny wpływ zastosowania powierzchni rozwiniętych na intensyfikację wymiany ciepła przy wysokich prędkościach. Przedmiotem szczególnego zainteresowania autorów był krytyczny strumień ciepła.

W badaniach przedstawionych w pracy [Wang i Peterson, 2010] wykorzystano metalowe drobne siatki porowate, stanowiące jedną ze ścian czterech, równoległych mikrokanałów o głębokości 510 µm i długości 57,1 mm. Jako czynnik roboczy w układzie przepływowym zastosowano HFE 7000. Porównano własne dane z wynikami dla mikrokanałów gładkich. Analizując przebieg krzywych wrzenia zaobserwowano niższe przegrzanie powierzchni grzejnej dla mikrokanałów o powierzchni rozwiniętej, przy znacząco niższej temperaturze powierzchni grzejnej, w porównaniu do kanałów gładkich. Autorzy sugerowali, że zastosowanie siatki porowatej wpływa na zwiększanie się wielkości pęcherzyków parowych i wzrost ich liczby. Ponadto stwierdzono, że wykorzystanie w badaniach powierzchni rozwiniętej nie spowodowało zmiany wartości spadku ciśnienia podczas przepływu.

Głównym przedmiotem zainteresowania autorów w [Sun i inni, 2011a] była identyfikacja wpływu mikropokrycia porowatego na intensyfikację wymiany ciepła w kanale. W poziomo zorientowanym module testowym uformowano kanał pro-stokątny o średnicach hydraulicznych: 0,49 mm, 0,93 mm i 1,26 mm. Dolną po-wierzchnię kanału stanowiła miedziana płytka z powierzchnią rozwiniętą, od strony płynu w kanale. Zastosowano trzy rodzaje mikropokryć porowatych napiekanych, o uśrednionej średnicy napiekanych cząstek: 20 µm, 50 µm i 120 µm. Bada-nia wykonano przy wykorzystaniu czynnika FC-72 w obiegu przepływowym. Stwierdzono, że zastosowanie mikropokrycia porowatego w kanale spowodowało intensyfikację procesu wymiany ciepła. Jedno z pokryć – wybrane jako optymalne - spowodowało, iż przegrzanie dla inicjacji wrzenia zmniejszyło się o 7,4 K, a temperatura powierzchni grzejnej o 10,3 K, podczas gdy maksymalny strumień ciepła zwiększył się o 20%. Autorzy stwierdzili, że współczynniki przejmowania ciepła dla powierzchni rozwiniętej okazały się 7÷10 razy wyższe niż dla gładkiej; obserwacje prowadzono dla różnych strumieni masy. Analizowano wpływ wymiarów kanału na procesy wymiany ciepła. Zauważono, że zmniejszanie wymiarów kanału i strumienia masy spowodowało zmniejszenie wartości krytycznego strumienia ciepła. Z kolei w [Sun i inni, 2011b] autorzy w badaniach wykorzystali poziomy kanał prostokątny o głębokości 1,28 mm i średnicy hydraulicznej 2,27 mm. Czynnikiem roboczym była woda. Eksperymenty wykonano dla pięciu różnych mikropokryć porowatych napiekanych na powierzchnię kanału. Stwierdzono, że mikropokrycie porowate może powodować 2,7-krotny wzrost współczynnika przejmowania ciepła, w porównaniu do kanałów gładkich w obszarze wrzenia przechłodzonego oraz 3-krotny - w obszarze wrzenia nasyconego.

Eksperymentalne badania wrzenia w przepływie przez kanał o wymiarach 0,36 mm x 5 mm x 26 mm i średnicy hydraulicznej 672 µm, z pokryciem miedzianym "nanoszkieletem" (ang. *nanowires*) omówiono w [Morshed i inni, 2012]. Kanał ogrzewano asymetrycznie (ogrzewana dolna powierzchnia mikrokanału). Eksperymenty prowadzono dla zmiennych wartości strumienia masy i niedogrzania cieczy do temperatury nasycenia. Wyniki dotyczące zastosowania pokryć porowatych porównano z wynikami dla kanału gładkiego. Stwierdzono wzrost intensyfikacji wymiany ciepła: do 25% w obszarze konwekcji jednofazowej, do 56% dla obszaru wrzenia oraz do 20% większy spadek ciśnienia w obu obszarach (konwekcji jednofazowej i wrzenia).

W pracy [Bai i inni, 2013] przedstawiono wyniki badań wrzenia podczas przepływu etanolu poprzez trzy równoległe mikrokanały o średnicy 540 µm, z pokryciem porowatym otrzymanym za pomocą metody spiekania oraz dla powierzchni gładkiej. W wyniku analizy porównawczej wyników zaobserwowano intensyfikację wymiany ciepła w kanale z pokryciem porowatym, zależną od wielkości cząstek powierzchni porowatej. Intensyfikacja wymiany ciepła malała wraz ze wzrostem stopnia suchości pary.

Interesującym zagadnieniem, powiązanym z rozwinięciem powierzchni mikrokanałów, jest zagadnienie wspływu chropowatości ich powierzchni na wymianę ciepła przy wrzeniu w przepływie. Jones i Garimella [Jones i Garimella, 2010] badali wpływ chropowatości powierzchni na wymianę ciepła i spadek ciśnienia podczas wrzenia w przepływie wody destylowanej w układzie dziesięciu równoległych mikrokanałów o przekroju 500 µm x 500 µm i długości 25,4 mm. Na podstawie eksperymentów z wykorzystaniem kilku różnych rozwinięć powierzchni stwierdzono, że chropowatość powierzchni wywiera nieznaczny wpływ na inicjację wrzenia i niewielki wpływ na wartość współczynnika przejmowania ciepła dla wrzenia nasyconego, przy niskich strumieniach ciepła. Dla większych strumieni ciepła (powyżej 1500 kW/m<sup>2</sup>), dla dwóch analizowanych powierzchni o największej chropowatości (3,9 µm i 6,7 µm) otrzymano zbliżone wartości współczynnika przejmowania ciepła, 20÷35% wyższe niż otrzymane dla powierzchni o najmniejszej chropowatości (1,4 µm). Analiza wartości spadku ciśnienia wskazała, że tylko dla powierzchni o największej chropowatości (6,7 µm) można zauważyć niekorzystny wpływ chropowatości powierzchni na spadek ciśnienia.

Na podstawie analizy badań eksperymentalnych będących wynikiem własnych doświadczeń z wykorzystaniem gładkiej folii grzejnej w minikanale, ogrzewanym asymetrycznie, m.in. omówionych w [Piasecka, 2004, 2006, 2009a,c, 2010a, 2012a; Piasecka i inni, 2004, 2005, 2006, 2010; Piasecka i Poniewski, 2004a-c, 2008; Hożejowska i inni, 2002, 2009; Piasecka i Maciejewska, 2010a,b, 2012b, 2013a; Poniewski i inni, 2010] oraz z wykorzystaniem folii rozwiniętej [Piasecka, 2012b-e, 2013a,c,d, 2014a,c; Piasecka i Maciejewska, 2012a, 2013b,c, 2014], stwierdzono, że zastosowanie grzejnej powierzchni rozwiniętej powoduje, że wrzenie rozpoczyna się przy niższych gęstościach strumienia ciepła (ok. 30%) niż ma to miejsce dla folii gładkiej. Jest to prawdopodobnie spowodowane większą ilością występujących w powierzchni potencjalnych ośrodków nukleacji. Konse-kwencją zmniejszenia wartości strumienia ciepła jest niższa temperatura powierzchni grzejnej, która powoduje zmniejszenie przegrzania powierzchni. Wpływ rozwinięcia powierzchni minikanału na współczynnik przejmowania ciepła przy wrzeniu zależy od zastosowanej powierzchni, warunków cieplno-przepływowych

oraz orientacji przestrzennej minikanału. Porównując wyniki badań otrzymanych dla powierzchni gładkiej i rozwiniętej, zaobserwowano wyższe wartości współczynnika dla grzejnej powierzchni rozwiniętej, od kilku do kilkudziesięciu procent, przy czym zagadnienie to szczegółowo omówiono w rozdziale 5 pracy.

#### 2.4. WPŁYW WYBRANYCH PARAMETRÓW NA PROCES WRZENIA W MINIKANAŁACH

Własne badania wrzenia w przepływie prowadzone są dla zmiennych parametrów cieplno-przepływowych, dla różnej geometrii i orientacji przestrzennej minikanału.

W celu podkreślenia jak różne, czasami całkowicie odmienne wnioski z analizy wyników eksperymentów można odnaleźć w literaturze, i udowodnić, że istnieje potrzeba, aby na drodze własnych eksperymentów rozpoznać zależności i zweryfikować je dla wykorzystywanego modułu testowego z minikanałem, zestawiono przykładowe wnioski badaczy dotyczące wpływu strumienia ciepła, strumienia masy, stopnia suchości, ciśnienia, niedogrzania cieczy do temperatury nasycenia na wlocie, wymiarów kanału oraz zastosowania rozwiniętej powierzchni grzejnej na wartość współczynnika przejmowania ciepła.

Zgodnie z wybranymi pozycjami literatury współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie:

- wzrasta wraz ze wzrostem strumienia ciepła [Yan i Lin, 1998; Bao i inni, 2000a,b; Park i inni, 2003; Owhaib i inni, 2004; Sobierska i inni, 2005; Wang i inni, 2005; Lie i inni, 2006; Thome i inni, 2004; Dutkowski, 2011; Saraceno i inni, 2012; Park i inni, 2012]; z kolei w pracy [Yang i Fujita, 2004] wskazano, że strumień ciepła wywierał niewielki wpływ na wartość tego współczynnika;
- nie zależy od strumienia masy [Bao i inni, 2000b; Owhaib i inni, 2004; Park i inni, 2003; Peng i Wang, 1993; Sobierska i inni, 2005; Wang i Peng, 1993; Yen i inni, 2003; Ali i inni, 2011, 2012]; nieznacznie zależy od strumienia masy [Thome, 2004]; rośnie ze wzrostem strumienia masy [Lie i inni, 2006; Orozco i Hanson, 1992], zależy od strumienia masy jedynie w strefie wrzenia konwekcyjnego [Huo i inni, 2004];
- nie zależy od stopnia suchości [Ali i inni, 2011]; bardzo słabo zależy od stopnia suchości [Saraceno i inni, 2012]; nieznacznie zależy od stopnia suchości [Thome, 2004]; ma na niego wpływ stopień suchości jedynie dla bardzo niskich strumieni ciepła [Samoteeva i Palm, 2014]; maleje ze wzrostem stopnia suchości [Yen i inni, 2003], ale wyłącznie dla X > 0,2÷0,4 [Park i inni, 2012]; zależy od stopnia suchości jedynie w strefie wrzenia konwekcyjnego [Huo i inni, 2004]; wzrasta znacząco i prawie liniowo ze stopniem suchości [Lie i inni, 2006];
- wzrasta ze wzrostem ciśnienia [Bao i inni, 2000b; Lie i inni, 2006; Owhaib i inni, 2004; Wang i inni, 2005; Yan i Lin, 1998; Ali i inni, 2011; Samoteeva

i Palm, 2014]; zależy od ciśnienia [Huo i inni, 2004; Thome, 2004; Kosar i inni, 2005b]; nie zależy od ciśnienia [Su i inni, 2005; Wang i Peng, 1993]; zależy od ciśnienia jedynie w strefie wrzenia pęcherzykowego [Huo i inni, 2004];

- nie ma na niego wpływu niedogrzanie cieczy do temperatury nasycenia na wlocie do minikanału [Peng i Wang, 1993; Revelin i Thome, 2005; Wang i Peng, 1993; Wojtan i inni, 2005]; wzrasta ze wzrostem niedogrzania czynnika chłodniczego [Chin, 1997; Orozco i Hanson, 1992];
- wzrasta wraz z redukcją wymiarów minikanału [Ammerman i You, 1998; Orozco i Hanson, 1992; Owhaib i inni, 2004; Peng i inni, 1998; Peng i Wang, 1993; Su i inni, 2005; Tian i inni, 2004; Yang i Fujita, 2004]; wpływ średnicy mikrokanału na współczynnik przejmowania ciepła w przepływie dwufazowym nie jest ściśle określony [Dupont i Thome, 2004]; średnica minikanału nie wpływa na model przepływu [Revelin i Thome, 2005];
- wzrasta, jeśli stosuje się rozwiniętą powierzchnię grzejną [Ammerman i You, 2011; Khanikar i inni, 2009; Sun i inni, 2011a, 2011b; Morshed i inni, 2012; Bai i inni, 2013].

#### Inicjacja wrzenia

Inicjacji wrzenia w minikanale towarzyszy często *histereza nukleacji*. Zjawisko *histerezy nukleacji*, powstającej podczas wrzenia płynu chłodniczego w kanałach, zaobserwowano w publikacjach [Lazarek i Black, 1982; Bilicki, 1983, 1997; Bohdal, 1985, 2000, 2001a,b; Orozco i Hanson, 1992; Chin, 1997; Chin i inni, 1998a,b; Hapke i inni, 2000; Hollingsworth, 2003, 2004; Yen i inni, 2003; Daniel i inni, 2006; Martin-Callizo i inni, 2007; Harirchian i Garimella, 2008; Sun i inni, 2011a; Saraceno i inni, 2012; Dutkowski, 2011]. Przebieg typowej krzywej wrzenia z widoczną *histerezą nukleacji*, zaprezentowanej przez *Lazarka* i *Blacka* w [Lazarek i Black, 1982], pokazano na rysunku 2.1. *Histerezie nukleacji* towarzyszy znaczny spadek temperatury na powierzchni grzejnej, nawet do 70 K [Yen i inni, 2003]. W [Hollingsworth, 2003, 2004] zaproponowano parametr opisujący inicjację wrzenia, zależny od przebiegu *histerezy nukleacji*.

W pracach [Peng i inni, 1998; Peng i Wang, 1993; Revelin i Thome, 2005; Tian i inni, 2004; Wang i Peng, 1993] stwierdzono, że inicjacja wrzenia pęcherzykowego zależy od wymiarów minikanału, a także od strumienia masy [Chin i inni, 1998; Hapke i inni, 2000; Yen i inni, 2003] i niedogrzania płynu chłodniczego na wlocie [Chin i inni, 1998b; Orozco i Hanson, 1992]. Rezultaty badań wpływu wymiarów minikanału na inicjację wrzenia strumienia ciepła czasami są często rozbieżne. Według [Chin i inni, 1998; Orozco i Hanson, 1992] wzrost strumienia masy i niedogrzania płynu chłodniczego na wlocie wpływa na wzrost strumienia ciepła, potrzebnego do inicjacji wrzenia. Z kolei zgodnie z [Hapke i inni, 2000; Yen i inni, 2003] wraz ze wzrostem strumienia masy możliwość wystąpienia inicjacji wrzenia pęcherzykowego ulega zmniejszeniu.

*Histerezę nukleacji* zaobserwowano również w badaniach własnych, omówionych między innymi w [Piasecka, 2004, 2006, 2009a,c, 2010a, 2012a; Piasecka i inni, 2004, 2005, 2006, 2010, 2012b-e, 2013a,c,d, 2014a,c; Piasecka i Poniewski, 2004a-c; Hożejowska i inni, 2002, 2009; Piasecka i Maciejewska, 2010a,b, 2012b, 2013a; Piasecka i Maciejewska, 2010a,b, 2012a,b, 2013a-c] oraz w niniejszej pracy. Spostrzeżenia autorki pracy, dotyczące wpływu wybranych czynników na inicjację wrzenia i przebieg *histerezy nukleacji* przedstawiono w punkcie 5.5 rozdziału 5.

#### 2.5. WYBRANE ZAGADNIENIA WYMIANY CIEPŁA PRZY WRZENIU REALIZOWANE W POLSKICH OŚRODKACH

Poniżej omówiono skrótowo osiągnięcia polskich zespołów badawczych dotyczące zagadnień wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie. W szerszym zakresie omówiono osiągnięcia w zakresie wrzenia w przepływie w minikanałach.

Zespół pod kierunkiem Bohdala w Politechnice Koszalińskiej od wielu lat zajmuje się tematyką wymiany ciepła czynników chłodniczych w kanałach, przebiegającej ze zmianą fazy. Prace Bohdala i członków jego zespołu dotyczyły zarówno wymiany ciepła podczas wrzenia czynników chłodniczych w kanałach o wymiarach konwencjonalnych [Bohdal, 1985, 2000, 2001a,b; Bohdal i Kuczyński, 2004, 2005], jak i skraplania [Bohdal i Matysko, 2006; Bohdal i Kuczyński, 2011]. Od kilku lat jednakże tematyką prac stały się również procesy wymiany ciepła ze zmianą fazy w minikanałach [Bohdal i inni, 2011; Kuczyński i inni, 2012, 2013]. Głównym tematem prac Dutkowskiego [Dutkowski 2008, 2009, 2010a,b, 2011] była wymiany ciepła i opory przepływu dwufazowego podczas przepływu wody i czynników chłodniczych przez minikanały o przekroju kołowym. W [Dutkowski, 2011] przedstawiono wyniki badań podczas wrzenia kilku czynników w minikanałach kołowych o średnicy z zakresu 0,21÷2,3 mm i długości 500 mm wraz z ich szczegółową analizą. Badania przeprowadzono w warunkach diabatycznych i adiabatycznych, z wykorzystaniem czynników: powietrze, woda, mieszanina wodapowietrze, czynniki chłodnicze R-134a i R-404A. W pracy szczególną uwagę skierowano na zagadnienia niestabilności procesu wrzenia, m.in. zerowy kryzys wrzenia. Podczas wrzenia w przepływie czynnika chłodniczego przez minikanał zaobserwowano zjawisko, polegające na spadku temperatury nasycenia, wskutek znaczącego wzrostu oporów przepływu i w efekcie odparowania rozprężnego, nazwanego flashing. Zaproponowano własne korelacje do określania współczynnika przejmowania ciepła oraz tarciowego składnika oporu przepływu dwufazowego podczas wrzenia czynników chłodniczych R-134a i R-404A w minikanałach. Jedno z nich podano w dalszej części rozdziału, oznaczone jako (2.30).

Szerokie spektrum badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych dotyczących wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie w minikanałach prowadzone jest przez zespół kierowany przez *D. Mikielewicza* z Politechniki Gdańskiej [Mikielewicz, 2010; Mikielewicz i Mikielewicz, 2011; Mikielewicz i inni, 2007, 2012]. W pracy [Mikielewicz i inni, 2007] przedstawiono półempiryczny model do stępowania kryzysów wrzenia.

wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła, omówiony w dalszej części monografii. W [Mikielewicz i inni, 2012] analizowano zagadnienie wrzenia podczas przepływu czynnika R-123 przez kanały kołowe o średnicy 2,3 mm oraz długości 380 mm, gładkie lub z wkładką z turbulizatorami. Badania przeprowa-dzono w zakresie strumieni ciepła 28,5÷68,4 kW/m<sup>2</sup>, strumienia masy 534÷3011 kg/(m<sup>2</sup>s), w pełnym zakresie zmiany stopnia suchości (0÷1). Badano wpływ strumienia masy i strumienia ciepła na współczynnik przejmowania ciepła dla gładkiej rury oraz dwóch wariantów rury z wewnętrznymi turbulizatorami. W przypadku rury gładkiej otrzymano rozkład współczynnika przejmowania ciepła przypominający kształt litery "M". Badania wykazały, że nie osiągnięto efektu intensyfikacji wymiany ciepła. Wkładki turbulizujące wypełniły na tyle przekrój kanału i prawdopodobnie spowodowały laminaryzację przepływu, co mogło wpłynąć na uzyskanie niższych współczynników przejmowania ciepła. Autorzy wynik ten zinterpretowali jako przesunięcie się przepływu w kierunku większych zawartości fazy parowej, przy których obniża się współczynnik przejmowania ciepła, jak pokazały badania dla rur gładkich. Stwierdzili ponadto, że możliwy jest efekt intensyfikacji za pomocą badanych turbulizatorów dla małych zawartości fazy parowej w przepływie. Porównano dane eksperymentalne z korelacjami dostępnymi w literaturze. Najlepszą zgodność osiągnięto posługując się korelacją Mikielewicza i innych [Mikielewicz i inni, 2007] oraz zależnością Lazarka i Blacka [Lazarek i Black, 1982]. Stwierdzono, że użycie turbulizatorów może mieć znaczenie przy lokalizacji wy-

Tematyką prac Cieślińskiego oraz jego zespołu jest zarówno wrzenie w dużej objętości na powierzchniach rozwiniętych [Cieśliński, 2002; Cieśliński i Krasowski, 2013], jak i wrzenie w przepływie [Dawidowicz i Cieśliński, 2012], a także porównanie wyników obu rodzajów wrzenia [Cieśliński, 2011]. Dane doświadczalne dotyczą wody, czynników chłodniczych (R-22, R-134a, R-407C), mieszanin czynników chłodniczych z olejami. W pracy [Dawidowicz i Cieśliński, 2012] przedstawiono dane dla wrzenia podczas przepływu wymienionych wyżej czynników chłodniczych czystych lub ich mieszanin z olejami, przez poziomy wymiennik ciepła typu rura w rurze. W badaniach następował przepływ czynnika przez 2 mm miniprzestrzeń pierścieniową. Wewnętrzna powierzchnia rury środkowej (średnica 10 mm, długość 2 m), posiadała rozwiniętą powierzchnię z metalowym pokryciem porowatym. W wyniku analizy własnych danych eksperymentalnych autorzy podali, iż w przypadku wrzenia w przepływie czystych czynników chłodniczych zastosowanie porowatej powłoki na wewnętrznej powierzchni rurki wpływa na uzyskanie wyższych wartości współczynnika przejmowania ciepła i jednocześnie niższego spadku ciśnienia, w porównaniu z danymi uzyskanymi dla wrzenia w przepływie przez rurę gładką, dla tego samego strumienia masy. Zaproponowano korelację dla obliczania współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia przepływu czystych czynników chłodniczych wewnątrz rurki z powłoką porowatą, która stanowi modyfikację korelacji D. Mikielewicza i innych, omówionej w dalszej części rozdziału [Mikielewicz i inni, 2007].

Zagadnienia wymiany podczas przepływu płynów przez krótkie minikanały kołowe prowadzone były przez *Wilk* z Politechniki Rzeszowskiej [Wilk, 2009, 2012]. Badania eksperymentalne, omówione w [Wilk, 2009], dotyczyły konwekcyjnej wymiany ciepła i masy w kanałach kołowych o małej średnicy wewnętrznej (1,5 mm) i niewielkiej długości (15 mm), w zakresie rozwiniętego przepływu laminarnego.

W Politechnice Świętokrzyskiej od 20 lat prowadzono badania procesu wrzenia w zespole kierowanym przez *Poniewskiego*, aktualnie kierującego zespołem badawczym w filii Politechniki Warszawskiej w Płocku. Badania w Politechnice Świętokrzyskiej dotyczyły zarówno wrzenia w dużej objętości na powierzchniach rozwiniętych, jak i w minikanałach o grzejnej powierzchni gładkiej.

*Wójcik, Pastuszko* i *Orzechowski* zajmowali się zagadnieniem wymiany ciepła podczas wrzenia w objętości. Obszarem głównego zainteresowania *Wójcika* [Wójcik, 2010] była inicjacja wrzenia i histereza wymiany ciepła na pokryciach porowatych, natomiast *Pastuszki* [Pastuszko, 2008, 2010, 2012a,b] – wymiana ciepła przy wrzeniu na żebrach lub mikrożebrach ze strukturami tunelowymi. Stanowisko do badania wrzenia w dużej objętości omówiono w punkcie 5.6.3 rozdziału 5. *Orzechowski* przeprowadzał badania z zakresu wymiany ciepła przy wrzeniu na żebrach, również z mikropowierzchnią strukturalną [Orzechowski, 2003, 2007, Orzechowski i Tyburczyk, 2011]. Nowy zespół *Orzechowskiego*, oprócz wrzenia w objętości, zajmuje się również innymi obszarami wymiany ciepła podczas wrzenia, m.in. procesem odparowania dużych kropel wody [Orzechowski i Wciślik, 2013, 2014].

Podczas poprzednich badań Piaseckiej zbudowano i wyposażono stanowisko eksperymentalne do badania wymiany ciepła przy wrzeniu i konwekcji wymuszonej w pojedynczym minikanale, ogrzewanym asymetrycznie. Głównym przedmiotem zainteresowania była inicjacja wrzenia w minikanale pionowym o powierzchni gładkiej [Piasecka, 2004, 2006, 2009a,c, 2010a; Piasecka i inni, 2004, 2005, 2006, 2010; Piasecka i Poniewski, 2004a-c; Hożejowska i inni, 2002, 2009; Poniewski i inni, 2010]. Wdrożono technikę termografii ciekłokrystalicznej [Piasecka i Poniewski, 2008; Piasecka, 2009b, 2010c] oraz wykonano pomiary termowizyjne do oszacowania strat ciepła do otoczenia [Piasecka i Poniewski, 2004a]. Zaproponowano własne modele przybliżeń przepływu ciepła przez poszczególne elementy modułu pomiarowego z minikanałem (folię i szkło): jedno- i dwuwymiarowy. Do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła z odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła stosowano metody analityczno-numeryczne bazujące na funkcjach Trefftza. W [Piasecka i inni, 2004, 2005, 2010; Hożejowska i inni, 2002, 2009] funkcje Trefftza wykorzystano do rozwiązywania prostych i odwrotnych zagadnień wymiany ciepła występujących podczas przepływu wrzącego czynnika chłodniczego przez pionowy minikanał o przekroju prostokątnym. Metodą *Trefftza* wyznaczono dwuwymiarowe rozkłady temperatury szklanej przegrody oraz folii grzejnej. Znajomość rozkładu temperatury folii na styku folia - wrzący płyn w kanale, pozwoliła wyznaczyć współczynnik przejmowania ciepła z warunku brzegowego Robina. Kolejne prace badawcze i analizy matematyczne dotyczące wrzenia w minikanałach prostokątnych, asymetrycznie ogrzewanych folią grzejną, również rozwiniętą (temat niniejszej monografii), kontynuowano pod kierow-

nictwem Piaseckiej w ramach realizowanej pracy badawczej. W [Hożejowska i inni, 2013; Hożejowska i Piasecka, 2013] przedstawiono model wymiany ciepła w cieczy przy dwufazowym przepływie, przyjmując dachowy profil prędkości. Opisany problem rozwiązano metodą Trefftza wyznaczając, dla przyjętego równania zachowania energii, dwa zbiory funkcji Trefftza zależnych od profilu prędkości cieczy. Dla metody Trefftza w [Grysa i inni, 2012] zastosowano rachunek wyrównawczy wykorzystując znajomość błędów pomiarowych temperatury. Aplikacja rachunku wyrównawczego spowodowała znaczne zmniejszenie średniego błędu względnego współczynnika przejmowania ciepła. W [Grysa i inni 2012; Piasecka i Maciejewska 2012a, 2013a-c, 2014] do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie czynnika chłodniczego przez prostokątny minikanał ogrzewany asymetrycznie, zaproponowano wykorzystanie MES z funkcjami Trefftza, jako funkcjami kształtu. W [Piasecka i Maciejewska, 2013b] do konstrukcji funkcji kształtu wykorzystano interpolacje Hermite'a, w pozostałych wymienionych pracach wykorzystano interpolację Lagrange'a. W [Piasecka i Maciejewska, 2012b] do rozwiązania odwrotnego zagadnienia brzegowego przewodzenia ciepła zastosowano metodę Becka wraz z metodą Trefftza. Bezwęzłową metodę Trefftza, polegającą na rozwiązywaniu zagadnienia w podobszarach, połączoną z rachunkiem wyrównawczym, wykorzystano z kolei w [Hożejowska i inni, 2014c]. Całość obliczeń i analiz matematycznych oraz wyników, związanych z zastosowaniem funkcji Trefftza do wyznaczania pól temperatury i współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie w minikanałach, przedstawiono w monografii [Hożejowska i inni, 2014b].

Obszarem zainteresowania *Kaniowskiego* była analiza struktur przepływu dwufazowego podczas przepływu płynu chłodniczego przez pionowy minikanał o gładkiej powierzchni grzejnej. Zagadnienia dotyczące modelu wymiany ciepła w cieczy przy dwufazowym przepływie, przy przyjęciu parabolicznego profilu prędkości, omówiono w [Hożejowska i inni, 2014a].

Rozwiązywaniem zagadnień prostych i odwrotnych mechaniki oraz zagadnieniami odwrotnymi przewodnictwa ciepła, zajmują się w Politechnice Poznańskiej *Ciałkowski* i *Frąckowiak*. W pracy [Ciałkowski i Frąckowiak, 2002] zastosowano funkcje *Trefftza* do rozwiązywania niestacjonarnego ruchu cieczy lepkiej.

W Politechnice Wrocławskiej prowadzone były prace dotyczące analizy numerycznej wymiany ciepła i oporu przepływów w minikanałach, jak podano w [Dutkowski, 2011].

#### Korelacje polskich naukowców w zakresie wrzenia w przepływie

Korelacje polskich naukowców w zakresie wrzenia w przepływie zostały szeroko omówione w pracy *Bohdala* [Bohdal, 2001b].

*J. Mikielewicz* (1972) dla wrzenia przechłodzonego w przepływie, zaproponował korelację opartą na liczbach *Kutateładzego (Ku)* i *Jakoba (Ja)*:

$$\frac{\alpha_{TP}}{\alpha_k} = 120 \cdot \left(Ku\right)^{0,7} \cdot \left(Ja\right)^{-0,6},\tag{2.4}$$

gdzie:

$$Ku = \frac{q}{r \cdot \rho_v \cdot u_v},\tag{2.5}$$

$$Ja = \frac{c_{pl} \cdot \rho_l \cdot \Delta T_{sub}}{r \cdot \rho_v}.$$
(2.6)

Współczynnik przejmowania ciepła winien być wyznaczany z równania *Dittu-sa-Boeltera*:

$$\alpha_k = \left(0,023 \cdot Re_l^{0,8} \cdot Pr_l^{0,4}\right) \cdot \left(\frac{\lambda_l}{d_h}\right).$$
(2.7)

*J. Mikielewicz* [Mikielewicz, 1974], wykorzystując analogię pomiędzy wymianą energii mechanicznej i cieplnej, zaproponował półempiryczną metodę dla opisu procesu wrzenia pęcherzykowego podczas przepływu cieczy przechłodzonej, w następującej postaci:

$$\frac{\alpha_{TP}}{\alpha_k} = \sqrt{R^{0.8} + \left[ \left( \frac{\alpha_{pb}}{\alpha_k} \right) \cdot \frac{\Delta T_{sat}}{\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}} \right]^2} , \qquad (2.8)$$

gdzie:

- $\alpha_k$  współczynnik przejmowania ciepła dla konwekcyjnej wymiany ciepła w przepływie cieczy, o gęstości strumienia masy takim samym, jak w przepływie dwufazowym;
- $\alpha_{pb}$  współczynnik przejmowania ciepła dla wrzenia w objętości, przy tej samej gęstości strumienia ciepła;
- R współczynnik oporu dwufazowego dla mieszaniny dwufazowej.

Kolejna korelacja J. Mikielewicza i innych, przedstawiona w [Mikielewicz i inni, 1992] (podano zgodnie z [Bohdal, 2001b]), przyjęła następującą postać:

$$\frac{\alpha_{TP}}{\alpha_v} = \sqrt{R_G^n + p \cdot \left(\frac{\alpha_{pb}}{\alpha_k}\right)^2} , \qquad (2.9)$$

gdzie:

R<sub>G</sub> – zależność Mullera-Steinhagena-Hecka

$$R_G = \left[ f_1 + 2(1 - f_1) X \right] \cdot (1 - X)^{1/3} + X^3, \qquad (2.10)$$

$$f_1 = \left(\frac{\mu_l}{\mu_\nu}\right)^{0.25} \cdot \frac{\rho_\nu}{\rho_l}, \qquad (2.11)$$

$$\alpha_{\nu} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\nu}}{d} \cdot Re_{\nu}^{0,8} \cdot Pr_{\nu}^{1/3}, \qquad (2.12)$$

$$Re_{v} = \frac{G \cdot d}{\mu_{v}}, \qquad (2.13)$$

$$p = aC_o^b \cdot Re_l^c \cdot Bo^d \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^e \cdot \left(\frac{p_n \cdot l}{\sigma}\right)^f \cdot Fr^g \cdot Pr_l^{\frac{1}{3}}, \qquad (2.14)$$

gdzie:

*l* – wymiar charakterystyczny pęcherzyka pary, stała *Laplace'a*, zdefiniowana wzorem (2.2).

Późniejsza modyfikacja zależności polegała na zastąpieniu  $R_G$  przez  $R_{GM}$ , zgodnie z następującą zależnością:

$$R_{GM} = \left[ f_{1z} + 2(1 - f_{1z})X \right] \cdot (1 - X)^{1/3} + X^3, \qquad (2.15)$$

przy czym:

$$f_{1z} = \frac{\mu_v}{\mu_l} \cdot \frac{c_l}{c_v} \cdot \left(\frac{\lambda_l}{\lambda_v}\right)^{1.5}.$$
 (2.16)

Wówczas postać uogólnioną korelacji podano w postaci:

$$\frac{\alpha_{TP}}{\alpha_v} = \sqrt{R_{GM}^n + p \cdot \left(\frac{\alpha_{pb}}{\alpha_v}\right)^2} .$$
(2.17)

Współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha_{pb}$  w korelacjach *Mikielewicza* proponuje się obliczać z korelacji *Coopera*, omówionej w rozdziale 5 – wzór (5.1).

*Bilicki* (1979) rozwinął korelację *J. Mikielewicza*, podając jej następującą postać [Bohdal, 2001b]:

$$\frac{\alpha_{TP}}{\alpha_k} = \sqrt{R^{0.8} + A_1 \cdot K u^{0.8} \cdot R e^{0.75} \cdot B o^{-0.7} \cdot \left(\frac{\alpha_{pb}}{\alpha_k}\right)^2} , \qquad (2.18)$$

gdzie:

 $A_1 = 0,2$  – dla kanału pionowego,  $A_1 = 0,32$  – dla kanału poziomego, liczba *Reynoldsa* – dla fazy ciekłej, pozostałe oznaczenia, jak dla wzorów podanych wyżej. *Troniewski* [Troniewski, 1977] zaproponował korelację, która może być stosowana dla wrzenia amoniaku i freonów, w postaci:

$$\frac{\alpha_{TP}}{\alpha_k} = C \cdot \left(\frac{1}{\chi_t}\right)^{n_1} \cdot \left(\frac{d}{0,014}\right)^{n_2}, \qquad (2.19)$$

gdzie:

- C = 4,22;
- $n_1 = 0,61; n_2 = -0,66;$
- $\alpha_k$  wyznaczana z następującej zależności dla konwekcyjnej wymiany ciepła w przepływie:

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_l}{d} \cdot Re_l^{0,8} \cdot Pr_l^{0,33} .$$
 (2.20)

*Bohdal* w [Bohdal, 2001b] przedstawił: model wrzenia przechłodzonego w przepływie, jednowymiarowy model rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego, trójskładnikowy model wrzenia pęcherzykowego oraz model rozwoju wrzenia pęcherzykowego. Zaproponował również zależność dla rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego w przepływie, w postaci:

$$Nu = A \cdot (Re)^{n_1} \cdot (Fr)^{n_2} \cdot (Ku)^{n_3} \cdot (Bo)^{n_4}, \qquad (2.21)$$

gdzie:

 $A = 4,5 \cdot 10^{-5}$  – dla kanału pionowego;  $A = 5,1 \cdot 10^{-5}$  – dla kanału poziomego;  $n_1 = 2,42; n_2 = -0,35; n_3 = 1,3; n_4 = -1,08.$ 

W zakresie wrzenia przechłodzonego wprowadzono pojęcie bezwymiarowego współczynnika, jako kryterium początku wrzenia pęcherzykowego, zdefiniowanego jako:

$$B = \frac{\Delta T_w}{\Delta T_{sub}} \,. \tag{2.22}$$

Zmodyfikowaną postać korelacji *J. Mikielewicza* dla kanałów o wymiarach konwencjonalnych zaproponowali *D. Mikielewicz* i *inni* [Mikielewicz i inni, 2007], w postaci:

$$\frac{\alpha_{TP}}{\alpha_{ref}} = \sqrt{R_{M-S}^{0,76} + \frac{1}{1+P} \cdot \left(\frac{\alpha_{nb}}{\alpha_{ref}}\right)^2} , \qquad (2.23)$$

$$R_{M-S} = \left| 1 + 2\left(\frac{1}{f_1} - 1\right) \cdot X \right| \cdot \left(1 - X\right)^{\frac{1}{3}} + X^3 \cdot \frac{1}{f_{1z}}, \qquad (2.24)$$

$$f_1 = \left(\frac{\mu_l}{\mu_v}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{-1}, \qquad (2.25)$$

$$f_{1z} = \frac{\mu_{\nu}}{\mu_l} \cdot \frac{c_l}{c_{\nu}} \cdot \left(\frac{\lambda_l}{\lambda_{\nu}}\right)^{1,5}.$$
(2.26)

Korekcyjny parametr P definiowany jest w postaci:

$$P = a \cdot \left(R_{M-S} - 1\right)^b \cdot Re_l^c \cdot Bo^d , \qquad (2.27)$$

przy czym współczynniki a, b, c, d wyznaczono eksperymentalnie, otrzymując:

$$\frac{\alpha_{TP}}{\alpha_{ref}} = \sqrt{R_{M-S}^{0,76} + \frac{1}{1+2,53\cdot 10^{-3} \cdot Re^{1,17} \cdot Bo^{0,6} \cdot \left(R_{M-S}-1\right)^{-0,65}} \cdot \left(\frac{\alpha_{nb}}{\alpha_{ref}}\right)^2,$$
(2.28)

przy czym  $\alpha_{ref}$  wyznaczane jest ze wzoru *Dittusa-Boeltera* – równanie (2.7).

Dla kanałów o małej średnicy występujący współczynnik  $R_{M-S}$  należy wyznaczać jako:

$$R_{M-S} = \left| 1 + 2\left(\frac{1}{f_1} - 1\right) \cdot X \cdot Co^{-1} \right| \cdot (1 - X)^{\frac{1}{3}} + X^3 \cdot \frac{1}{f_{1z}},$$
(2.29)

gdzie:

Co-liczba ograniczająca, zdefiniowana w równaniu (2.7).

*Dutkowski* w [Dutkowski, 2011] zaproponował następującą zależność dla minikanałów kołowych, w zakresie wrzenia nasyconego:

$$\alpha_{TP} = 0,41Re_l^{0,848} \cdot Bo^{0,66} \cdot Co^{-0,62} \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{1,28}.$$
 (2.30)

#### 2.6. PODSUMOWANIE

W przeglądzie literatury skoncentrowano się na wybranych wynikach badań doświadczalnych, dotyczących wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie w mini-i mikrokanałach o powierzchniach grzejnych gładkich i rozwiniętych.

W literaturze potwierdzono, że na wartość współczynnika przejmowania ciepła mają wpływ parametry cieplno-przepływowe, takie jak: strumień masy, gęstość strumienia ciepła, ciśnienie, niedogrzanie cieczy do temperatury nasycenia na wlo-cie do kanału, ale również geometryczne, takie jak przekrój i orientacja przestrzenna kanału oraz własności cieplne cieczy wrzącej. Wpływ wymienionych parametrów na proces wrzenia nie został szczegółowo rozpoznany, często zdarzają się wyniki rozbieżne, a nawet sprzeczne. Zastosowanie rozwiniętej powierzchni grzejnej intensyfikuje proces wymiany ciepła, jednak nadal niedostatecznie zbadany jest wpływ rozwinięcia powierzchni na proces wrzenia.

Wymienione czynniki wskazują na celowość przeprowadzenia badań i analizy własnych wyników eksperymentalnych, które będą kolejnym przybliżeniem tego ważnego, a nadal niedostatecznie rozpoznanego i opisanego teoretycznie zagadnienia. Nieustanny postęp technologiczny, któremu towarzyszy miniaturyzacja urzą-dzeń oraz konieczność odprowadzania strumieni ciepła o dużych gęstościach, jest podstawowym czynnikiem, który wskazuje na ważność omawianego zagadnienia. Ponadto w rozdziale omówiono zagadnienia wymiany ciepła przy wrzeniu, re-alizowane w różnych ośrodkach badawczych w Polsce. Dodatkowo omówiono

korelacje polskich naukowców w zakresie wrzenia w przepływie.
# **3** POWIERZCHNIE ROZWINIĘTE STOSOWANE W BADANIACH WYMIANY CIEPŁA

# 3.1. WPROWADZENIE

Warunkami koniecznymi do inicjacji procesu wrzenia na powierzchni, oprócz warunku podstawowego – temperatura powierzchni grzejnej musi być wyższa od temperatury nasycenia, są:

- istnienie zarodków nowej fazy,
- istnienie gradientu temperatury na ogrzewanej powierzchni.

W trakcie badań nad wymianą ciepła podczas wrzenia zauważono, że kluczowe dla przebiegu procesu jest inicjowanie nukleacji pęcherzyków parowych. Zachodzi ono w miejscach, zwanych ośrodkami nukleacji. Są to miejsca w kraterach lub na obrzeżach tych kraterów, w których istnieją optymalne warunki dla zainicjowania powstania pęcherzyka parowego. W zmiennych warunkach strumienia ciepła przekazywanego do cieczy, ośrodki nukleacji zmieniają się wraz ze zmianą strumienia ciepła. Nukleacja zachodzi na różnych częściach rozwiniętej powierzchni wymiany ciepła. Biorąc to pod uwagę, należy doprowadzić powierzchnie wymiany ciepła do takiego stanu, w którym istnieją możliwie szerokie możliwości zainicjowania wrzenia. Uzyskiwanie, tak jak w tradycyjnej metodzie, równomiernego rozłożenia możliwie zbliżonych do siebie elementów struktury powierzchni (podobnych wielkością i kształtem kraterów), ogranicza znacznie ilość ośrodków nukleacji przy zmiennych warunkach termodynamicznych.

Z obserwacji wrzenia wynika, że zagłębienia na technicznie gładkiej powierzchni grzejnej są miejscami, w których tworzą się, wzrastają i odrywają pęcherzyki pary. Przyjmuje się, że w zagłębieniach znajdują się niewielkie ilości pary. W ten sposób nierówności powierzchni grzejnej stają się naturalnymi ośrodkami nukleacji. Zarodki mogą być również wynikiem wtrąceń obcych ciał w cieczy (zarodki typu zanieczyszczeniowego), czy też lokalnego zróżnicowania jej gęstości, wobec średniej jej wartości (zarodki typu fluktuacyjnego). Mikropowierzchnie rozwinięte posiadają wytworzone sztucznie zagłębienia.

Wzrost współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia jest osiągany metodami pasywnymi (np. poprzez zwiększenie chropowatości powierzchni, nałożenie materiału porowatego, stosowanie ożebrowania, struktur podpowierzchniowych lub układów złożonych) oraz aktywnymi (np. wprowadzanie drgań powierzchni, mieszania, natrysku i rozpylania cieczy, pola elektrycznego). Do obiecujących kierunków rozwoju pokryć powierzchni wymiany ciepła należą spiekane, metalowe, włókniste struktury kapilarno-porowate [Wójcik, 2010]. Czasami stosowane są powierzchnie łączące kilka metod zwiększania wymiany ciepła, takich jak: rozwinięcie powierzchni, pokrycie porowate i tunele podpowierzchniowe [Pastuszko, 2012b]. Stwierdzono, że intensyfikacja wymiany ciepła spowodowana jest zwiększeniem liczby ośrodków nukleacji oraz tym, że warstwa rozwinięta może stanowić przeszkodę w przemieszczaniu zarodków pary przez strumień chłodnej cieczy, jak ma to miejsce na gładkiej powierzchni. Zastosowanie powierzchni rozwiniętej zwiększa także stosunek powierzchni oddającej ciepło do objętości zajmowanej przez ciecz.

Z uwagi na duże oszczędności energetyczno-materiałowe, rozwijane są intensywnie techniki pasywne, polegające na modyfikowaniu charakterystyki i struktury powierzchni wymieniającej ciepło. Istnieje obecnie wiele technik pasywnych intensyfikacji wymiany ciepła, w których modyfikuje się powierzchnie poprzez oddziaływanie:

- chemiczne,
- cieplne,
- mechaniczne (żeberkowanie, mikrożeberkowanie lub radełkowanie powierzchni),
- mechaniczno-cieplne.

Wśród metod cieplnych można wymienić procesy: natryskiwania cieplnego plazmowego i w łuku elektrycznym, spiekanie cząstek metalu, wykonywanie mikrootworów wiązką laserową czy stosowanie procesu elektroerozji.

# 3.2. WŁASNE POWIERZCHNIE ROZWINIĘTE STOSOWANE W BADANIACH

W badaniach własnych wykorzystano kilka metod wytworzenia powierzchni rozwiniętych: teksturowanych laserowo, otrzymanych metodą elektroerozji oraz piaskowania.

Pokazane na rysunku 3.1 widoki powierzchni folii (rozwiniętej i gładkiej), jak i analizy powierzchni prezentowane w kolejnym rozdziale (rys. 4.7 i 4.8) i załączniku C (rys. od C.2 do C.5), wykonano przy wykorzystaniu mikroskopu metalograficznego odwróconego NIKON ECLIPS MA200. Do badań topografii powierzchni po obróbkach wykorzystano makroskop NIKON SMZ 1500 z obiektywem HR PLAN. Wymienione typy urządzeń optycznych są także wyposażone w kamery cyfrowe i zintegrowane we wspólny system z cyfrowym analizatorem obrazu NIS 4. Pozwala to na natychmiastowe wykonywanie analiz i pomiarów zarejestrowanych obrazów.

Wymienione urządzenia udostępnione zostały przez Laboratorium Mikroskopii Optycznej Zakładu Materiałoznawstwa i Technologii Amunicji Politechniki Świętokrzyskiej.



**Rys. 3.1.** Widok powierzchni folii (a-f) rozwiniętych otrzymanych metodą: laserową (a-d), elektroerozji (e) i piaskowania (f); g) gładkiej

# 3.2.1. Powierzchnie teksturowane laserowo

Teksturowanie laserowe należy do grupy technologii, zwanych mikroobróbką laserową [Antoszewski, 2010]. Są to procesy obróbki ubytkowej, przy której obszary materiału mają wymiary w skali mikrometrów lub milimetrów, a do usuwania materiału używana jest energia wiązki laserowej. Mikroobróbka laserowa jest często stosowana wówczas, gdy wymagana jest wysoka dokładność wymiarowa i w przypadku materiałów wysoko wytrzymałych. Teksturowanie laserowe polega na nadawaniu powierzchni obrabianego materiału pożądanej struktury geometrycznej i/lub rozkładu właściwości. W mikroobróbce laserowej szczególnie istotny jest czas impulsu wiązki, bowiem w zależności od intensywności promieniowania i czasu ekspozycji można wykorzystywać różne mechanizmy oddziaływania na materiał. Wynika to ze skończonego czasu reakcji elektronów i sieci atomowej materiału na fotony. Od długości trwania impulsów laserowych zależy wielkość strefy wpływu ciepła. Często obróbka długimi impulsami pozostawia wyraźne ślady przetopienia i zmiany struktury materiału na skutek oddziaływania ciepła.

# 3.2.2. Powierzchnie wykonane w procesie elektroerozji

Drugą z zastosowanych metod uzyskania zwiększonej chropowatości powierzchni folii grzejnej jest elektroerozja [Piasecka, 2014b]. W przypadku obróbki elektroiskrowej następuje przenoszenie erodowanego materiału z anody na katodę. W efekcie tworzy się na powierzchni katody warstwa składająca się z czystego materiału anody lub warstwa powstająca w wyniku oddziaływania między sobą materiałów elektrod i czynnika międzyelektrodowego (zwykle powietrza). Intensywność procesu przenoszenia materiału zależy od wielu czynników, głównie od energii impulsu. Wskutek impulsowego "uderzania" strumienia elektronów w powierzchnię materiału przedmiotu obrabianego powstaje punktowe, gwałtowne jego nagrzanie. W tym miejscu, dzięki wysokiemu gradientowi temperatury, zachodzi zmiana struktury powierzchni materiału, obserwowana jako krater, bruzdy czy nieregularne wgłębienia nadtopionego materiału. W czasie wyładowania impulsowego między elektrodą a powierzchnią w kanale iskrowym powstaje strefa plazmy, która szybko osiąga wysoką temperaturę, rzędu 8 000°C÷12 000°C. Tak wysoka temperatura na powierzchni materiału powoduje jego gwałtowne punktowe topienie. Równocześnie powstaje tam pęcherzyk gazowy, spowodowany odparowaniem materiału obrabianego. Zjawiskom tym towarzyszy bardzo wysokie ciśnienie. Prowadzi to do eksplozji pęcherzyka i wyrzucania cząstek stopionego materiału oraz uformowania krateru lub innych nieregularnych struktur. Po zakończeniu wyładowania impulsowego następuje nagły spadek temperatury powierzchni. Część wyerodowanych cząsteczek, zakrzepłych w formie mikrobrył o nieregularnych kształtach, zastyga na krawędziach krateru, a reszta pozostaje usunięta w wyniku późniejszego płukania. W przypadku serii impulsów uzyskuje się różną chropowatość powierzchni obrobionych.

Podczas przeprowadzania procesu elektroerozji dokonuje się zmian parametrów pracy elektrodrążarki, takich jak posuw i wielkość szczeliny erozyjnej. Parametry dobiera się tak, aby losowo oddalać się od wartości przyjętych jako optymalne z punktu widzenia prowadzenia procesu elektroerozji. Prawie każde zaburzenie fizyczne w szczelinie erozyjnej, czy też zróżnicowanie posuwu erody, powoduje zmniejszenie energii impulsu roboczego. Prowadzi to do powstawania bardzo nie-równomiernego pod względem geometrycznym krateru, z wieloma miejscami mo-gącymi być ośrodkami nukleacji w warunkach zmiennych strumieni ciepła.

# 3.2.3. Powierzchnie piaskowane

Piaskowanie jest procesem technologicznym, który polega na czyszczeniu, bądź kształtowaniu dowolnej powierzchni materiału za pomocą ukierunkowanego, silnego strumienia sprężonego powietrza, zawierającego piasek lub inne twarde cząsteczki. Proces piaskowania pozwala na uzyskanie pożądanej chropowatości, czyli osiągnięcia odpowiedniego stopnia rozwinięcia powierzchni.

# 3.3. PODSUMOWANIE

Wykorzystane w badaniach metody wytwarzania powierzchni rozwiniętych (teksturowanych laserowo, otrzymanych metodą elektroerozji oraz piaskowania) należą do technik pasywnych, polegających na modyfikowaniu charakterystyki i struktury powierzchni wymieniającej ciepło. Z uwagi na duże oszczędności energetyczno-materiałowe metody te aktualnie rozwijane są bardzo intensywnie.

Z obserwacji wrzenia wynika, że zagłębienia na technicznie gładkiej powierzchni grzejnej są miejscami, w których tworzą się, wzrastają i odrywają pęcherzyki pary. Stwierdzono, że intensyfikacja wymiany ciepła na powierzchniach rozwiniętych spowodowana jest głównie zwiększeniem liczby ośrodków nukleacji.

# **4** BADANIA EKSPERYMENTALNE – METODYKA

# 4.1. UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU

Na podstawie skrótowego przeglądu literatury, zamieszczonego w rozdziale 2, można stwierdzić, że wnioski z badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych występujące w literaturze często znacznie się między sobą różnią. Brak jest systematycznych badań, dotyczących wpływu parametrów cieplno-przepływowych, wymiarów geometrycznych i orientacji przestrzennej kanału na wartości współczynnika przejmowania ciepła i opory przepływu podczas wrzenia w przepływie w kanałach o małej średnicy hydraulicznej. Z licznych badań eksperymentalnych wynika, że w takich kanałach występuje intensyfikacja wymiany ciepła w porównaniu do kanałów o wymiarach standardowych. Ta intensyfikacja może być znacząco wyższa w przypadku zastosowania powierzchni rozwiniętej, w porównaniu do gładkiej powierzchni grzejnej. Interesujące jest zagadnienie, czy i jak wzrost tej intensyfikacji jest bezpośrednio zależny od rodzaju i stopnia rozwinięcia powierzchni grzejnej. Skomplikowane mechanizmy wrzenia w minikanałach sprawiają, że zagadnienie wymaga analiz zarówno eksperymentalnych, jak i teoretycznych, a wyniki mogą być niejednoznaczne.

Podsumowując, przedstawiony stan wiedzy wskazuje jednoznacznie na potrzebę kontynuacji systematycznych badań eksperymentalnych i rozważań teoretycznych w zakresie wymiany ciepła i oporów przepływu podczas wrzenia w minikanałach o różnej geometrii i orientacji przestrzennej. Przedmiotem szczególnego zainteresowania są minikanały o rozwiniętej powierzchni grzejnej, których stosowanie przyczynia się do zwiększonej intensyfikacji ciepła.

# 4.2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Wyniki badań eksperymentalnych pozwolą ujednolicić i usystematyzować wiedzę na temat wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie przez minikanały o przekroju prostokątnym, o różnej orientacji przestrzennej, asymetrycznie ogrzewane rozwiniętą powierzchną grzejną. Celem badań jest zweryfikowanie wpływu powierzchni grzejnych o różnym stopniu rozwinięcia i rozmieszczeniu wgłębień na intensyfikację procesu wrzenia. Pozwoli to na uzyskanie bezpośrednich spostrzeżeń dotyczących zjawisk fizycznych i umożliwi pełniejszy opis rozwoju wrzenia podczas przepływu płynu chłodniczego przez minikanały prostokątne. Szczegółowe cele naukowe badań są następujące:

- rozpoznanie procesu rozwoju wrzenia podczas przepływu czynników chłodniczych przez minikanał o rozwiniętej powierzchni grzejnej (dwa rodzaje wgłębień na powierzchni, rozmieszczonych równo- lub nierównomiernie, różny stopień rozwinięcia powierzchni);
- analiza wpływu wybranych geometrii minikanału z rozwiniętą powierzchnią grzejną, przy różnych orientacjach kanału i zmiennych wymiarach geometrycznych, na rozwój wrzenia pęcherzykowego;
- analiza wpływu wybranych parametrów eksperymentalnych na proces wrzenia w minikanale o rozwiniętej powierzchni grzejnej (gęstość strumienia ciepła i masy, ciśnienie i niedogrzanie cieczy do temperatury nasycenia na wlocie do kanału);
- analiza charakteru zmian oporów przepływu; weryfikacja przydatności istniejących modeli spadku ciśnienia przepływu dwufazowego;
- wizualizacja struktur przepływu dla przepływu przez minikanały, posiadające rozwiniętą powierzchnię grzejną; wyznaczenie stopnia zapełnienia i stopnia suchości dla przepływu dwufazowego, sporządzenie map struktur przepływu;
- analiza intensyfikacji wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie w minikanale z różnymi rodzajami rozwiniętej powierzchni grzejnej, w tym: z rozmieszczonymi równomiernie mikrowgłębieniami, wykonanymi techniką laserową oraz z rozmieszczonymi nierównomiernie miniwgłębieniami, otrzymanymi metodą elektroerozji;
- pomiar temperatury powierzchni grzejnej wykonany w sposób bezkontaktowy (termografia ciekłokrystaliczna);
- zastosowanie istniejących korelacji do analizy wyników badań doświadczalnych oraz zaproponowanie równania kryterialnego uzależniającego liczbę *Nusselta* od wybranych liczb podobieństwa.

W badaniach eksperymentalnych i teoretycznych skoncentrowano się na zagadnieniach rozwoju wrzenia pęcherzykowego podczas przepływu czynnika chłodniczego w minikanale o przekroju prostokątnym. Badania wykonywano przy zwiększaniu i zmniejszaniu gęstości strumienia ciepła dostarczanego do asymetrycznie ogrzewanego kanału, o głębokości z zakresu 0,7÷1,5 mm, szerokości 40 i 60 mm (podstawowa 40 mm) oraz różnej orientacji przestrzennej. W badaniach stosowano grzejnik jednostronnie rozwinięty, o różnym stopniu rozwinięcia powierzchni. Jako podstawowy czynnik roboczy w obiegu głównym stanowiska zastosowano fluorową ciecz organiczną – Fluorinert FC-72. Płyny dielektryczne obojętne chemicznie, których przykładem są fluorinerty, niepalne i praktycznie nietoksyczne, znajdują szerokie zastosowanie w elektronice. Ze względu na wymogi ochrony środowiska, przede wszystkim w aspekcie przeciwdziałania efektom globalnego ocieplenia, w ofertach firm występują nowe ekologiczne czynniki, jakim jest Novec 7100 (nowy czynnik firmy 3M), na którym przeprowadzono wstępne badania. Jednak brak pełnych danych dotyczących jego właściwości uniemożliwił wykonanie pełnych obliczeń. W pracy wszystkie dane domyślnie podawane są dla czynnika FC-72.

Na stanowisku badawczym wykorzystywano symultanicznie dwa układy akwizycji obrazu:

- a) z aparatem cyfrowym do identyfikacji dwuwymiarowych pól temperatury układ wykorzystujący metodę termografii ciekłokrystalicznej, za pomocą której dokonywany jest dokładny, powtarzalny pomiar rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej, na podstawie rejestrowanego rozkładu jej barwy;
- b) z aparatem cyfrowym lustrzanką i specjalistycznym oprogramowaniem do obróbki obrazu, celem identyfikacji oraz badania rozwoju struktur przepływu dwufazowego i oceny stopnia zapełnienia.

Podczas doświadczeń rejestrowano lokalne zmiany następujących parametrów cieplno-przepływowych, w stanach ustalonych:

- natężenie przepływu płynu w kanale;
- (nad)ciśnienie na wlocie i wylocie do/z kanału;
- temperatura na wlocie i wylocie do/z kanału;
- natężenie prądu i spadek napięcia na folii grzejnej, z których wyznacza się gęstość strumienia ciepła na powierzchni grzejnej;
- kolorowe cyfrowe obrazy termografy z aparatu cyfrowego do analizy pola temperatury powierzchni grzejnej;
- czarno-białe obrazy z aparatu cyfrowego lustrzanki do identyfikacji struktur przepływu dwufazowego.

Dane doświadczalne gromadzono w postaci cyfrowej do dalszej analizy.

Podstawowe wielkości wyznaczane:

- dwuwymiarowy rozkład temperatury powierzchni grzejnej,
- stopień zapełnienia i stopień suchości dla przepływu dwufazowego,
- mapy struktur przepływu dwufazowego,
- rozkład temperatury badanej cieczy oraz ciśnienia wzdłuż długości kanału,
- eksperymentalny spadek ciśnienia podczas przepływu płynu przez kanał oraz wyznaczany teoretycznie z wykorzystaniem istniejących modeli spadku ciśnienia w przepływie dwufazowym,
- lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła przy wykorzystaniu jednowymiarowego przybliżenia przepływu ciepła przez główne elementy modułu pomiarowego.

Program badań eksperymentalnych obejmował badania struktur przepływu dwufazowego cieczy wrzącej w kanale, na podstawie analizy obrazów wysokiej rozdzielczości (uzyskanych z aparatu cyfrowego) oraz wyznaczenie dwuwymiarowych rozkładów temperatury na folii grzejnej (przy wykorzystaniu termografii ciekłokrystalicznej) w funkcji zmian następujących parametrów:

- a) geometrycznych, w tym:
  - głębokości/szerokości kanału,
  - kąta ustawienia kanału w stosunku do poziomu;
- b) cieplno-przepływowych, w tym:
  - gęstości strumienia ciepła, zarówno dla zwiększania, jak i zmniejszania jego wartości, celem detekcji zjawiska histerezy,
  - gęstości strumienia masy (masowej prędkości przepływu),
  - ciśnienia na wlocie do kanału,
  - oporów przepływu.

W badaniach jako powierzchnię grzejną kanału, przez który przepływała ciecz robocza, zastosowano folię z superstopu *Haynes-230*, jednostronnie rozwiniętą (od strony płynu w kanale), o dwóch podstawowych rodzajach rozwinięcia:

- a) z mikrowgłębieniami rozmieszczonymi równomiernie, wykonanymi metodą teksturowania laserowego,
- b) z minigłębieniami rozmieszczonymi nierównomiernie, wykonanymi metodą elektroerozji.

Program badań teoretycznych obejmował:

- analizę procesów wymiany ciepła w kanale w powiązaniu z charakterem obserwowanych struktur dwufazowych przy wrzeniu w przepływie;
- rozpoznanie struktur przepływu oraz określenie udziałów fazy ciekłej i parowej, na podstawie badań obrazów uzyskanych za pomocą aparatu cyfrowego; wyznaczenie stopnia zapełnienia fazy parowej oraz stopnia suchości w funkcji zmiennej orientacji przestrzennej kanału;
- skonstruowanie map struktur przepływu dwufazowego w różnych położeniach przestrzennych kanału;
- określenie związku parametrów cieplno-przepływowych z charakterem obserwowanych struktur dwufazowych przy wrzeniu w przepływie;
- analizę spadku ciśnienia podczas przepływu dwufazowego, na podstawie danych eksperymentalnych i dostępnych w literaturze modeli (homogeniczny, rozdzielony);
- wyznaczenie eksperymentalnych krzywych wrzenia przy zwiększaniu i zmniejszaniu strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej; analizę jakościową uzyskanych krzywych wrzenia ze szczególnym uwzględnieniem wpływu orientacji przestrzennej i zastosowanych powierzchni rozwiniętych;
- wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła na ogrzewanej powierzchni (folia rozwinięta od strony płynu w kanale) przy zmiennych następujących parametrach: strumieniu masy cieczy wrzącej, ciśnieniu cieczy w kanale oraz zmiennej geometrii (głębokości i szerokości kanału) i orientacji przestrzennej kanału;

- sformułowanie nowego równania kryterialnego opisującego wymianę ciepła podczas rozwoju wrzenia w przepływie w minikanale;
- porównanie wyników badań wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie z danymi dla wrzenia w objętości, przy zastosowaniu powierzchni grzejnej rozwiniętej o zbliżonych parametrach geometrycznych;
- porównanie wyników własnych z wybranymi pozycjami z literatury.

Rezultaty badań eksperymentalnych i analizy teoretycznej wykorzystano do:

- opracowania patentu PL, pt. Struktura intensyfikująca wymianę ciepła przy wrzeniu, nr 217287;
- propozycji praktycznego wykorzystania poruszanych zagadnień (w ramach udziału w programu stażowym), w tym do opracowania kilku koncepcji zastosowania powierzchni rozwiniętych w wymiennikach ciepła; niektóre z koncepcji wdrożono w postaci prototypów (kolektory słoneczne z absorberami o powierzchni rozwiniętej).

# 4.3. STANOWISKO BADAWCZE

# 4.3.1. Budowa stanowiska badawczego

Na rysunku 4.1 pokazano schemat głównych systemów i obiegów realizowanych na stanowisku badawczym oraz widok stanowiska pomiarowego, na którym zaznaczono widoczne elementy, wyszczególnione w dalszej części rozdziału – rysunki 4.2. i 4.5.

# 4.3.2. Obieg czynnika roboczego

Na rysunku 4.1a pokazano schemat blokowy głównych obiegów stanowiska badawczego. Obieg główny czynnika roboczego, zawiera następujące podstawowe elementy: moduł pomiarowy z minikanałem (1), pompa przepływowa wirnikowa (2), regulator ciśnienia pełniący funkcję zbiornika wyrównawczego (3), wymiennik ciepła typu rura w rurze, chłodzony wodą (4), filtr (5), zespół rotametrów (6) oraz separator powietrza (7). Układ uzupełniają dwa przetworniki ciśnienia (8), zainstalowane na wlocie i wylocie do/z kanału. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano kanał ustawiony w położeniach pokazanych na rysunku 4.2c. W rozwiązaniu konstrukcyjnym możliwe jest pochylanie kanału w pełnym zakresie (360°), z regulacją zmiany kąta, co 15°. W obiegu głównym następuje przepływ czynnika chłodniczego FC-72 (wstępne badania wykonano na czynniku Novec 7100).



**Rys. 4.1.***a)* Schemat głównych obiegów i systemów akwizycji danych realizowanych na stanowisku badawczym, b)-e) widok stanowiska pomiarowego; 1 – moduł pomiarowy z minikanałem, 2,9 – pompa przepływowa wirnikowa, 3 – regulator ciśnienia/zbiornik wyrównawczy, 4 – wymiennik ciepła typu rura w rurze, 5,10,13 – filtry, 6 – zespół rotametrów, 7,12 – separatory powietrza, 8 – przetworniki ciśnienia, 11 – przepływowy podgrzewacz wody, 14 – aparat cyfrowy lustrzanka, 15 – aparat cyfrowy, 16 – lampy halogenowe, 17 – świetlówki LED, 18 – stacja akwizycji danych pomiarowych, 19 – laptop, 20 – autotransformator, 21 – spawarka inwertorowa, 22 – bocznik, 23 – amperomierz, 24 – woltomierz

# 4.3.3. Obiegi wspomagające

Obieg wspomagający – "kalibracyjny" jest wykorzystywany do kalibracji barwy powierzchni grzejnej kanału względem odpowiadającej jej temperatury, co jest niezbędne przy stosowaniu w badaniach techniki termografii ciekłokrystalicznej. Jest to zamknięty obieg wody, który uruchamiany jest przed właściwymi badaniami wymiany ciepła. Składają się na niego następujące elementy (rys. 4.1a): pompa wirnikowa (9), przepływowy podgrzewacz wody (11), filtry (10,13) oraz separator powietrza (12).

Technikę termografii ciekłokrystalicznej oraz procedurę kalibracji barwy powierzchni względem temperatury omówiono szczegółowo w załączniku B, a oszacowanie dokładności pomiarów przy wykorzystaniu tej techniki przedstawiono w punkcie 4.5.1.

Powierzchnia (folia) grzejna w module pomiarowym jest zasilana spawarką inwertorową (21) z płynną regulacją prądu (do 300 A). Regulację i kontrolę układu prądowego zapewniają: bocznik (22), amperomierz (23), woltomierz (24) oraz autotransformator (20).

## 4.3.4. Sekcja pomiarowa

W module pomiarowym (rys. 4.2a) znajduje się minikanał (1) o przekroju prostokątnym, o regulowanej głębokości z zakresu 0,7÷1,5 mm (rys. 4.2b), szerokości 40 i 60 mm i długości 360 mm, przez który przepływa płyn chłodniczy (FC-72, Novec 7100). Orientację przestrzenną modułu pomiarowego pokazano na rysunku 4.2c. Podstawowe położenia modułu to: kanał poziomy, położenie 0° (płyn w kana-le nad powierzchnią grzejną); położenie skośne 45°; kanał pionowy, położenie 90°; położenie skośne 135° oraz położenie 180° (płyn w kanale pod powierzchnią grzejna). O głębokości kanału decyduje grubość zastosowanej przekładki. Zastosowano przekładki grubości 0,7 mm, 1 mm (wymiar podstawowy-bazowy) i 1,5 mm. Na konstrukcję modułu (rys. 4.2a) składają się: korpus (6), folia grzejna (2) oraz pokrywa (5). Elementy miedziane stanowią dwie elektrody (9) dostarczające prąd do cienkiej metalowej folii grzejnej (2). Na powierzchni grzejnej stykającej się z płynem w kanale występuje rozwinięcie na wycinku folii (rys. 4.3a) lub na całej jej powierzchni (rys. 4.3b). Zastosowano dwa podstawowe rodzaje powierzchni rozwinietych, uzyskanych z różnych procesów technologicznych: teksturowania laserowego i elektroerozji; próby z procesem piaskowania nie przyniosły zadowalających efektów.

Elementy (4) na rysunku 4.2a, to szyby szklane umożliwiające prowadzenie obserwacji, w tym:

 barwy wskazywanej przez ciekłe kryształy po stronie gładkiej powierzchni folii grzejnej od strony szyby (4a), która umożliwia detekcję rozkładu temperatury na powierzchni folii dzięki termografii ciekłokrystalicznej,  struktur przepływu dwufazowego oraz zjawisk towarzyszących wrzeniu, obserwowanych poprzez szybę (4b) od strony rozwiniętej powierzchni folii podczas przepływu płynu w kanale.

W kanałach wlotowym i wylotowym minikanału modułu pomiarowego (w pierwszych eksperymentach również na szybie przy powierzchni grzejnej, tuż przy wylocie z kanału), zainstalowano termopary typu K (7). Na wlocie i wylocie do/z kanału dokonywany jest pomiar nadciśnienia za pomocą przetworników ciśnienia (8).



**Rys. 4.2.***a)* Schemat modułu pomiarowego: 1 – minikanał, 2 – folia grzejna, 3 – ciekłe kryształy, 4a,b – szkło, 5 – pokrywa, 6 – korpus, 7 – termopary, 8 – przetworniki ciśnienia, 9 – elektrody; b) fragment przekroju modułu w powiększeniu (zaznaczono powierzchnię rozwiniętą folii grzejnej); c) ustawienia przestrzenne modułu wykorzystywane w badaniach



**Rys. 4.3.** Schemat folii grzejnej rozwiniętej: a) na zaznaczonym wycinku, b) na całej powierzchni

Na rysunku 4.4 pokazano widok poszczególnych elementów rozłożonego modułu pomiarowego. Moduł składa się z: pokrywy (1), korpusu (6) oraz folii grzejnej (3) o powierzchni jednostronnie rozwiniętej. Elementy (2) i (5) stanowią płyty szklane. Jak wspomniano, o grubości kanału decyduje grubość zastosowanej przekładki teflonowej (4). Rysunek przedstawia główne elementy konstrukcyjne wersji pierwotnej modułu, w której korpus i pokrywa wykonane zostały z tworzywa sztucznego [Piasecka, 2010b], podczas gdy w wersji docelowej wykonano je jako metalowe.



**Rys. 4.4.** Widok głównych elementów modułu pomiarowego: 1 - pokrywa z widocznymi elektrodami miedzianymi, 2,5 - płyty szklane, 3 - folia grzejna, 4 - przekładka teflonowa, <math>6 - korpus

#### 4.3.5. Własności materiałowe odcinka testowego

Początkowo pokrywę modułu pomiarowego i korpus (5 i 6, rys. 4.2a oraz 1 i 6, rys. 4.4) wykonano z tworzywa sztucznego *Techtron HPV PPS* – polisiarczku fenylenu [Piasecka, 2010b]. Ta odmiana techtronu jest tworzywem wzmocnionym, częściowo krystalicznym. Materiał ten wybrano ze względu na doskonałą odporność chemiczną, odporność na hydrolizę oraz wysoką wytrzymałość mechaniczną, sztywność i twardość w podwyższonych temperaturach. Wystąpiły jednak duże trudności z uszczelnieniem poszczególnych elementów modułu, których przyczyną prawdopodobnie były niewielkie odkształcenia mechaniczne materiału korpusu w wysokiej temperaturze. W wersji podstawowej modułu korpus i pokrywa zostały wykonane z duraluminium *PA6*. Taką wersję modułu wykorzystano w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych.

Materiał folii grzejnej wybrano kierując się wymogiem posiadania przez nią odpowiednio wysokiej rezystancji elektrycznej, przy założeniu, że zmiany oporności właściwej materiału względem temperatury są pomijalnie małe. Spełniła te założenia folia *Haynes-230*, firmy *Haynes Int. Inc.* (USA), wykonana ze stopu metali Ni-Cr-W-Mo o grubości ok. 0,1 mm, której własności elektryczne pozwalają na uzyskanie dużego strumienia ciepła przy stosunkowo niewielkiej powierzchni folii grzejnej. Zależność rezystancji właściwej materiału *Haynes-230* w funkcji temperatury przedstawiono na rysunku C.1 w załączniku C.

#### 4.3.6. Układ akwizycji danych pomiarowych

Koncepcyjny schemat systemu akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych i obrazów kolorowych pokazano na rysunku 4.5. W układzie występują:

- dwa aparaty cyfrowe: *Canon PowerShot G-11* i lustrzanka *Canon EOS 550D* wraz z obiektywami, kartami pamięci i dodatkowym osprzętem;
- oświetlenie: świetlówki LED emitujące "zimne" światło białe skierowane na powierzchnię z warstwą ciekłokrystaliczną oraz lampy halogenowe o łącznej mocy 1,8 kW, oświetlające obraz struktur przepływu dwufazowego w kanale; żarniki halogenów są chłodzone wymuszonym obiegiem powietrza w metalowych korpusach lamp (dodatkowa konstrukcja lamp została wykonana w celu zminimalizowania oddziaływania cieplnego lamp na moduł);
- stacja akwizycji danych pomiarowych *DaqLab 2005*, serii *DaqBoard 2000*, wraz z oprogramowaniem *DASYLab* i komputer z odpowiednim oprogramowaniem, umożliwiające kontrolę i akwizycję podstawowych wielkości pomiarowych (temperaturę, ciśnienie) oraz ich dalsze przetwarzanie oraz obróbkę zarejestrowanych przez aparaty cyfrowe obrazów.

Na schemacie głównych systemów realizowanych na stanowisku badawczym, zamieszczonym na rysunku 4.1a, uwzględniono również system akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych i obrazów.



**Rys. 4.5.** Koncepcyjny schemat systemu akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych i obrazów kolorowych

# 4.4. ROZWINIĘTE POWIERZCHNIE GRZEJNE

## 4.4.1. Powierzchnie teksturowane laserowo

Na jednej z powierzchni folii grzejnej wykonano teksturowanie laserowe. W wyniku procesu otrzymano mikrowgłębienia rozmieszczone równomiernie na powierzchni folii [Piasecka, 2014b]. Do teksturowania wykorzystano drążarkę laserową produkcji *Electro Scientific Industries (ESI)*, model *5200 µvia drill*, posiadającą laser *Nd:YAG*. Laser generuje wiązkę promieniowania nadfioletowego o długości 355 nm. Wokół mikrowgłębień wytwarzana jest nierównomierna warstwa przetopionego metalu o zmiennej wysokości. Główne parametry teksturowania folii grzejnej dla zastosowanych czterech różnych wariantów geometrycznych mikrowgłębień zestawiono w tabeli 4.1. Na rysunku 4.6 przedstawiono schemat rozmieszczenia mikrowgłębień na zadanym wycinku powierzchni folii (patrz rys. 4.3). Mikrowgłębienia wykonano w odległości co 100 µm, w obu osiach.

Główne parametry teksturowania (wartości uśrednione)	Tekstura laserowa nr 1	Tekstura laserowa nr 2	Tekstura laserowa nr 3	Tekstura laserowa nr 4
Średnica pojedynczego mikrowgłębienia	10 µm	10 µm	15 μm	6 µm
Całkowita średnica struktury mikrowgłębienia wraz z kraterem	30 µm	40 µm	50 µm	45 μm
Głębokość pojedynczego mikrowgłębienia	3 µm	2 µm	5,5 µm	1 µm
Wysokość pierścieniowego krateru wokół mikrowgłębienia	7 µm	5 µm	0,5 µm	6,5 µm
Całkowita wysokość struktury mikrowgłębienia wraz z kraterem	10 µm	7 µm	6,5 µm	7,5 µm

 TABELA 4.1. Parametry geometryczne teksturowania laserowego folii grzejnej



Rys. 4.6. Schemat rozmieszczenia mikrowgłębień na powierzchniach teksturowanych laserowo

Charakterystykę rozwiniętej powierzchni folii, uzyskanej przy wykorzystaniu teksturowego laserowania nr 1, pokazano na rysunku 4.7. Rysunek prezentuje widok i topografię 3D powierzchni pojedynczych mikrowgłębień oraz ich przekrój poprzeczny. Charakterystyki dla pozostałych analizowanych powierzchni teksturowanych laserowo przedstawiono w załączniku C na rysunkach od C.2 do C.4.



**Rys. 4.7.** Charakterystyka teksturowanej laserowo folii grzejnej (tekstura laserowa nr 1): a) widok, b) topografia 3D pojedynczego mikrowgłębienia na powierzchni folii, c) przykładowy przekrój poprzeczny przez pojedyncze mikrowgłębienie



# 4.4.2. Powierzchnie wykonane w procesie elektroerozji

**Rys. 4.8.** Charakterystyka rozwiniętej folii grzejnej otrzymanej metodą elektroerozji: a) widok, b) topografia 3D pojedynczego miniwgłębienia na powierzchni folii, c) przykładowy przekrój poprzeczny przez wycinek z miniwgłębieniami

Rozwinięcie powierzchni folii grzejnej w procesie elektroerozji uzyskuje się za pomocą ręcznej elektrodrążarki z pisakiem prowadzonym manualnie. Po wykonaniu testów wybrano jeden sposób prowadzenia pisaka oraz jedną z dwóch nastaw urządzenia. Dużym ograniczeniem wykorzystania tej techniki jest geometria folii – niewielka jej grubość ogranicza spektrum zastosowania elektrodrążarki do pracy przy najniższych możliwych nastawach prądowych. Wywołanie zbyt silnych mikrowyładowań elektrycznych (zbyt duże natężenie prądu) może powodować wystąpienie nierównomierności również po drugiej stronie materiału, który musi pozostać gładki (utrata jednopłaszczyznowości materiału folii po przeciwległej powierzchni dyskwalifikuje zastosowanie termografii ciekłokrystalicznej do detekcji dwuwymiarowego pola temperatury). W efekcie procesu elektroerozji uzyskano miniwgłębienia rozmieszczone nierównomiernie na wycinku lub całej powierzchni folii. Warstwa stopionego materiału folii i materiału elektrody, o wysokości kilku µm, lokalnie do 5 µm, utworzyła wypiętrzenia wokół wgłębień. Średnia głębokość kraterów zwykle nie była wyższa niż 1 µm.

Na rysunku 4.8 pokazano widok i topografię 3D powierzchni wycinka folii ze strukturą miniwgłębień, otrzymanego w wyniku zastosowania procesu elektroerozji oraz przekrój przez przykładowy wycinek z miniwgłębieniami.

# 4.4.3. Powierzchnie piaskowane

Zewnętrzną powierzchnię folii z *Haynes-230* poddano piaskowaniu. Jednak proces ten spowodował nierównomierności po drugiej stronie powierzchni folii. Technika termografii ciekłokrystalicznej wymaga zastosowania gładkiej powierzchni, zatem w omawianych badaniach nie zastosowano powierzchni piaskowanej. Proces ten wykorzystano do przygotowania zewnętrznej powierzchni rurek miedzianych, stanowiącej absorber kolektora słonecznego (omówione szczegółowo w pkt A.2.1, załącznik A). W wyniku procesu na powierzchni rurek. Na rysuniwi ku A.2 w załączniku A pokazano widok i topografię 3D wycinka powierzchni miedzianej ze strukturą miniwgłębień, otrzymanego w procesie piaskowania oraz przekrój poprzeczny przez wycinek powierzchni rurki.

# 4.5. WYMIANA CIEPŁA PODCZAS WRZENIA W PRZEPŁYWIE – METODYKA BADAŃ

# 4.5.1. Skalowanie pomiaru temperatury powierzchni grzejnej

Schemat układu przepływowego do skalowania (kalibracji) temperatury na podstawie obserwowanej barwy powierzchni ciekłokrystalicznej pokazano na rysunku 4.1a oraz na rysunku B.1 w załączniku B.

W procesie kalibracji wodę o zadanej temperaturze doprowadzano do kanału w obiegu zamkniętym. Stopniowe ogrzewanie wody uzyskuje się dzięki elektrycz-

nemu przepływowemu ogrzewaczowi wody, którego grzałka zasilana jest z autotransformatora o płynnej regulacji natężenia prądu. Dla każdej ustalonej temperatury wody w kanale rejestrowany jest barwny obraz powierzchni z warstwą ciekłych kryształów. Efektem końcowym eksperymentu kalibracji jest skonstruowanie pełnego przebiegu *krzywej kalibracyjnej*, przyporządkowującej danej barwie powierzchni odpowiadającą jej temperaturę (rys. 4.12a).

Technikę termografii ciekłokrystalicznej wraz z procedurą kalibracji omówiono szczegółowo w załączniku B.

# 4.5.2. Procedura prowadzenia badań cieplnych

Uruchomienie obiegu głównego płynu chłodniczego w instalacji (patrz: rys. 4.1), następuje po jego odgazowaniu w części pomocniczej (tzw. *by-pass*), na który składają się: moduł pomiarowy – filtr – pompa wirowa – separator powietrza. W dalszej kolejności regulowane są: ciśnienie w instalacji i temperatura cieczy na wlocie do kanału oraz objętościowe natężenie przepływu płynu w instalacji. Po ustawieniu i ustabilizowaniu podstawowych parametrów eksperymentalnych (ciśnienie i niedogrzanie cieczy do temperatury nasycenia na wlocie do kanału, natężenie przepływu cieczy) do folii grzejnej w kanale ze spawarki dostarczany jest prąd poprzez miedziane elektrody (rys. 4.2a). Natężenie prądu dostarczanego ze spawarki regulowano ręcznie potencjometrem do zadanej wartości.

W każdej serii badań zmieniany jest stopniowo strumień ciepła dostarczany do powierzchni grzejnej, drogą wzrostu i następnie spadku jego wartości, które dokonuje się poprzez zmianę mocy grzejnej doprowadzanej do folii. Celem opisanych czynności jest wywołanie rozwoju wrzenia pęcherzykowego, a następnie powrót do procesu konwekcji. Po zarejestrowaniu obrazów (folii grzejnej i struktur przepływu) oraz zebraniu wszystkich informacji o parametrach eksperymentalnych badań, zmianie ulega wartość prądu dostarczanego do powierzchni grzejnej i dokonywany jest kolejny pomiar.

# 4.5.3. Identyfikacja zjawisk towarzyszących rozwojowi wrzenia w kanale

Zjawiska towarzyszące rozwojowi wrzenia są rozpoznawalne na podstawie analizy dwuwymiarowego rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej z warstwą ciekłokrystaliczną. Bezpośrednia obserwacja zachowania się masy płynu przepływającej przez kanał i analiza zarejestrowanych obrazów pozwala na uzupełnienie wiedzy na temat tworzących się struktur przepływu dwufazowego i wyznaczenie stopnia zapełnienia (udziałów cieczy i pary), w zadanych przekrojach wzdłuż przepływu płynu w kanale.



**Rys. 4.9.** Obrazy zarejestrowane podczas przykładowej serii pomiarowej, głębokość kanału 1 mm, FC-72: a),c) barwne obrazy powierzchni z warstwą ciekłokrystaliczną, b) obrazy struktur przepływu dwufazowego; a,b) seria 25: kanał poziomy, położenie 0°, miniwglębienia na całej powierzchni folii, parametry eksperymentalne:  $G = 285 \text{ kg/(m}^2 \text{s})$ ,  $p_{in} = 120 \text{ kPa}$ ,  $\Delta T_{sub} = 44 \text{ K}$ ; c) seria 36: kanał skośny, położenie 135°, mikrowglębienia na całej powierzchni folii, parametry eksperymentalne:  $G = 213 \text{ kg/(m}^2 \text{s})$ ,  $p_{in} = 121 \text{ kPa}$ ,  $\Delta T_{sub} = 42 \text{ K}$ ,  $q_w = 7,02 \div 20,71 \text{ kW/m}^2$ 

Na rysunku 4.9a,b przedstawiono wyniki przykładowej serii pomiarowej 25 (patrz tabela C.1, załącznik C), na które składają się zarejestrowane kolorowe obrazy powierzchni folii z warstwą ciekłokrystaliczną (termografy) oraz czarno-białe obrazy struktur przepływu dwufazowego (jednocześnie rejestrowane po przeciwnej stronie folii grzejnej – od strony płynu w kanale). Barwa czarna obserwowana na termografach świadczy o tym, że temperatura powierzchni jest wyższa lub niższa od pasma aktywnego zastosowanych ciekłych kryształów. Dokładne pasmo aktywne użytej mieszanki ciekłokrystalicznej jest określane podczas eksperymentu skalowania (kalibracji). W celu ilustracji powstawania i przemieszczania się tzw. *frontu wrzenia*, towarzyszącego inicjacji wrzenia pęcherzykowego w kanale, na rysunku 4.9c dodatkowo pokazano obrazy rozkładu barwy, zarejestrowane dla serii pomiarowej 36.

Obserwowany przebieg procesu wrzenia można podzielić na trzy strefy: dwie występujące podczas zwiększania strumienia ciepła, tj. strefę konwekcji jednofazowej zakończonej inicjacją wrzenia i strefę rozwoju wrzenia pęcherzykowego oraz trzecią strefę – wygaszania wrzenia, towarzyszącą zmniejszaniu strumienia ciepła, trwającą od rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego do powrotu do konwekcji jednofazowej.

# A. Strefa konwekcji jednofazowej zakończona inicjacją wrzenia

Podczas początkowego zwiększania strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej zaobserwowano występowanie *frontu wrzenia*, gdy po wzroście temperatury powierzchni przy stałym strumieniu ciepła, następuje nagły jej spadek. *Front wrzenia* rozpoznawany jest jako występujące kolejno (pomiary od nr 1 do 9, rys. 4.9a oraz zaznaczone obrazy na rys. 4.9c):

- stopniowe pojawianie się kolejnych barw w sekwencji widma widzialnego (czerwień, żółty, zielony, niebieski, granatowy/fioletowy, barwy najlepiej widoczne na obrazie pierwszym rys. 4.9c), świadczące o stopniowym wzroście temperatury powierzchni grzejnej; wymiana ciepła pomiędzy ścianką grzejną a cieczą w kanale następuje na drodze jednofazowej konwekcji wymuszonej; zjawisku towarzyszą stabilne wartości ciśnienia i łagodny wzrost temperatury badanego płynu na wylocie z kanału;
- obserwowane gwałtowne zmiany barwy na folii grzejnej następujące odwrotnie do sekwencji widma i dalej powrót do barwy czarnej, czyli nagły spadek temperatury powierzchni grzejnej przy stałym strumieniu ciepła; wówczas w kanale występuje zjawisko *histerezy nukleacji* (zerowego kryzysu wrzenia), towarzyszące inicjacji wrzenia pęcherzykowego. Ze wzrostem dostarczanego do powierzchni grzejnej strumienia ciepła, zaobserwowano przesuwanie się *frontu wrzenia* w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu. Dla orientacji poziomego kanału, położenie 180°, rejestrowano bardzo słabo wyrazisty *front wrzenia*, zjawisko było często trudne do uchwycenia.

Na obrazach struktur przepływu dwufazowego obserwowane jest występowanie pojedynczych pęcherzyków pary. Najwcześniej pojawiają się one w granicy *frontu wrzenia*, tuż przy ściankach kanału (patrz rys. 5.5, rozdz. 5).

#### B. Strefa rozwoju wrzenia pęcherzykowego

Dalsze zwiększanie strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej powoduje zmianę koloru powierzchni, która następuje w sekwencji widma widzialnego, najwcześniej przy wylocie z kanału (pomiary od nr 9 do 23, rys. 4.9a). W kanale występuje wówczas rozwinięte wrzenie pęcherzykowe, przy czym towarzyszą mu wzrost ciśnienia w kanale, wahania przepływu, gwałtowny wzrost temperatury płynu w rdzeniu przepływu i fluktuacje oporów przepływu. Wszystkie te zjawiska świadczą o zwiększaniu ilości fazy parowej w mieszaninie cieczowoparowej i wskazują na występowanie rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego w kanale, co potwierdzają wartości stopnia zapełnienia, wyznaczone w przekrojach znajdujących się w tej strefie. Na obrazach struktur przepływu można dostrzec łączące się struktury pęcherzyków w regularne lub nieregularne struktury korkowe przy wylocie z kanału. Często trudno dostrzegalna jest granica międzyfazowa, zwłaszcza dla tzw. korków parowych, obserwowanych w eksperymentach z ustawieniem pionowym kanału.

## C. Strefa wygaszania wrzenia

Wystąpienie barw widma z górnego zakresu pasma aktywnego ciekłych kryształów na powierzchni folii, wymusza zmniejszanie doprowadzanego do niej strumienia ciepła. Rejestrowane są obrazy odpowiadające pokazanym od pomiaru nr 24 do 30, rys. 4.9a, z łagodną zmianą barw, następującą w kierunku odwrotnym do sekwencji widma. Następuje powrót do wymiany ciepła na drodze konwekcji wymuszonej. "Wygaszanie" wrzenia następuje najwcześniej na wlocie do kanału. Eksperyment kończy powrót barwy folii do barwy czarnej, gdy niemożliwy jest pomiar temperatury przy użyciu wybranej mieszanki ciekłokrystalicznej. W obrazach struktur przepływu dominują struktury korkowe i pęcherzykowe, które stają się coraz mniejsze i stopniowo zanikają.

Szersza analiza obrazów powierzchni termograficznych i struktur przepływu dwufazowego została przeprowadzona w rozdziale 5.

# 4.5.4. Podstawowe wielkości charakteryzujące badania eksperymentalne

Wymiary geometryczne kanału i folii grzejnej przedstawiono w tabeli 4.2.

Element	Wymiar geometryczny	Oznaczenie	Wielkość wymiaru
Kanał	długość	$L_M$	0,36 m
	szerokość	$W_M$	0,06 m 0,04 m
	głębokość	$H_M$	0,0007 m <b>0,001 m (podst.)</b> 0,0015 m
Folia grzejna	długość*	$L_F$	0,45 m
	szerokość	$W_F$	<b>0,052 m (podst.)</b> 0,07 m
	grubość	$\delta_{F}$	1,02·10 <sup>-4</sup> m
	pole powierzchni (długość <sup>*</sup> x szerokość)	$A_F$	<b>0,0234 m<sup>2</sup> (podst.)</b> 0,0315 m <sup>2</sup>

TABELA 4.2. Wymiary geometryczne kanału i folii grzejnej

\* długość folii, na której mierzony jest spadek napięcia

Podstawowe parametry eksperymentalne:

- 1. Mierzone bezpośrednio:
- a) parametry cieplno-przepływowe:
  - lokalna temperatura folii grzejnej  $T_F(x)$  wyznaczana z rozkładu barwy na powierzchni folii grzejnej pokrytej ciekłymi kryształami;
  - temperatura badanego płynu na wlocie *T<sub>f,in</sub>* i wylocie z kanału *T<sub>f,out</sub>* pomiar za pomocą termoelementów typu K, współpracujących ze stacją akwizycji danych pomiarowych;
  - objętościowe natężenie przepływu  $Q_V$  odczyt z rotametrów;
  - nadciśnienie na wlocie *p<sub>in</sub>* i na wylocie *p<sub>out</sub>* do/z kanału pomiar za pomocą przetworników ciśnienia;
  - b) parametry elektryczne:
    - spadek napięcia na długości folii grzejnej  $\Delta U$  pomiar bezpośredni;
    - natężenie prądu dostarczanego do folii grzejnej *I* pomiar pośredni;
  - c) rejestrowane struktury przepływu.
- 2. Mierzone pośrednio:
- a) średnia temperatura badanego płynu w kanale (w rdzeniu przepływu)  $T_f(x)$  założono, że zmienia się liniowo od temperatury mierzonej na wlocie i wylocie do/z kanału;

- b) lokalne ciśnienie w kanale p(x) przyjęto, że zmienia się liniowo od wlotu do wylotu do/z kanału;
- c) lokalna temperatura nasycenia  $T_{sat}(x)$  przyjęto na podstawie lokalnego ciśnienia nasycenia (zmieniającego się liniowo od ciśnienia od wlotu do wylotu do/z kanału);
- d) lokalny współczynnik przejmowania ciepła między powierzchnią grzejną i cieczą  $\alpha(x)$  określany jest przy wykorzystaniu podejść jedno- lub dwuwymiarowych przepływu ciepła przez folię i szkło. W obu podejściach założono, że zmienność strumienia ciepła wzdłuż długości kanału jest znikoma (dlatego została zaniedbana), całe generowane w folii ciepło jest odbierane przez wrzącą ciecz, pominięto występowanie ciekłych kryształów (pomijalnie mała grubość napylonej warstwy ciekłokrystalicznej), założono stan ustalony wymiany ciepła oraz brak strat ciepła do otoczenia. W niniejszej pracy do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła wykorzystano podejście jednowymiarowe przepływu ciepła. W uproszczonym opisie przewodzenia ciepła przez folię grzejną i szkło uwzględniono kierunek normalny do powierzchni folii oraz rozkład temperatury płynu w kanale. Przybliżenie jednowymiarowe omówiono w [Piasecka i inni, 2004, 2006; Piasecka i Maciejewska, 2013c, 2014; Hożejowska i inni, 2009, 2014b]. Współczynnik przejmowania ciepła dla wrzenia przechłodzonego wyznaczono ze wzoru (4.1), a dla wrzenia nasyconego ze wzoru (4.2):

$$\alpha(x) = \frac{I \cdot \Delta U / A_F}{T_F(x) - T_f(x) - \frac{I \cdot \Delta U}{A_F} \cdot \frac{\delta_F}{\lambda_F}},$$
(4.1)

$$\alpha(x) = \frac{I \cdot \Delta U / A_F}{T_F(x) - T_{sat}(x) - \frac{I \cdot \Delta U}{A_F} \cdot \frac{\delta_F}{\lambda_F}},$$
(4.2)

gdzie:

 $\delta_F$  – grubość folii grzejnej,

 $\lambda_F$  – współczynnik przewodzenia ciepła folii, pozostałe elementy objaśniono w tekście.

Przybliżenia dwuwymiarowe omówiono w [Piasecka i inni, 2004, 2006, 2010; Piasecka i Hożejowska, 2006; Hożejowska i inni, 2002, 2009, 2013, 2014b,c; Hożejowska i Piasecka, 2013; Piasecka i Maciejewska, 2010a,b, 2012a,b, 2013a-c, 2014], przy czym wykazano, że uzyskane wartości współczynnika przejmowania ciepła przy zastosowaniu obu metod w zakresie wrzenia przechłodzonego są niewielkie, a w przypadku wrzenia nasyconego – nieco wyższe [Piasecka i Maciejewska, 2014]. Stwierdzono, że wrażliwość metody jednowymiarowej na błędy wejściowe jest najmniejsza ze wszystkich stosowanych metod obliczeniowych. W pracy [Piasecka i Poniewski, 2004a] oszacowano straty ciepła do otoczenia na długości odcinka pomiarowego w sposób pośredni, analizując wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła z uwzględnieniem lub bez uwzględnienia w procedurze obliczeniowej (podejście dwuwymiarowe) temperatury szyby. Pomiar temperatury zewnętrznej powierzchni szkła wykonano za pomocą kamery termowizyjnej. W rezultacie obliczeń okazało się, że straty do otoczenia spowodowały spadek wartości współczynnika przejmowania ciepła maksymalnie o 2%. Należy mieć na względzie, że obliczenia były wykonywane na starszej konstrukcji modułu pomiarowego, gdzie szyba występowała jedynie od strony folii z warstwą ciekłych kryształów, a nie po dwóch. Ponadto w pracy [Kaniowski, 2011] zamieszczono analizę strat ciepła do otoczenia w sekcji pomiarowej modułu o podobnej konstrukcji. Podano, iż nie przekraczają one 0,8%. Reasumując, założono że straty ciepła do otoczenia na odcinku sekcji pomiarowej mogą zostać zaniedbane, gdyż w nieznacznym stopniu wpływają na obliczeniowe wartości współczynnika przejmowania ciepła:

 gęstość strumienia ciepła na powierzchni grzejnej wyznaczono z dostarczonej do niej mocy elektrycznej:

$$q_w = \frac{I \cdot \Delta U}{A_F}, \qquad (4.3)$$

gdzie:

 $A_F$  – pole powierzchni folii grzejnej, wyznaczane jako  $A_F = W_F \cdot L_F$ ;

- średnica hydrauliczna  $d_h$ , którą obliczano według wzoru:

$$d_h = \frac{4 \cdot A_M}{2(W_M + H_M)},\tag{4.4}$$

gdzie:

 $A_M$  – przekrój poprzeczny,

 $W_M$  – szerokość,

 $H_M$  – głębokość,

wymiary dotyczą minikanału;

- lokalna liczba *Nusselta Nu*(x), definiowana jako:

$$Nu(x) = \frac{\alpha(x) \cdot d_h}{\lambda_f}, \qquad (4.5)$$

gdzie:

 $\lambda_f$  – współczynnik przewodzenia ciepła czynnika chłodniczego;

– lokalna różnica temperatury powierzchni grzejnej i temperatury płynu  $\Delta T_j(x)$  (stosowana dla wrzenia przechłodzonego) lub różnica temperatury po-

wierzchni grzejnej i temperatury nasycenia  $\Delta T_{sat}(x)$  (stosowana dla wrzenia nasyconego), w odległości *x* od wlotu do kanału, wyznaczane są odpowiednio z zależności:

$$\Delta T_f(x) = T_F(x) - T_f(x), \qquad (4.6)$$

$$\Delta T_{sat}(x) = T_F(x) - T_{sat}(x); \qquad (4.7)$$

– niedogrzanie cieczy do temperatury nasycenia na wlocie do kanału  $\Delta T_{sub}$ , definiowane jest jako różnica temperatury nasycenia i temperatury płynu, na wlocie do kanału:

$$\Delta T_{sub} = T_{sat,in} - T_{f,in}; \qquad (4.8)$$

prędkość przepływu płynu w kanale u:

$$u = \frac{Q_V}{A_M},\tag{4.9}$$

gdzie:

- $Q_V$  natężenie objętościowe przepływu;
- gęstość strumienia masy (prędkość przepływu masy) G, wyznaczana jest ze wzoru:

$$G = \rho_l \cdot u , \qquad (4.10)$$

gdzie:

 $\rho_l$  – gęstość cieczy;

- liczba Reynoldsa, definiowana jako:

$$Re_l = \frac{G \cdot d_h}{\mu_l},\tag{4.11}$$

gdzie:

- $\mu_l$  współczynnik lepkości cieczy;
- eksperymentalny procentowy stopień zapełnienia przepływu dwufazowego (objętościowy)  $\varphi_{exp}$  (ang. *void fraction*) określono metodą analizy obrazów struktur przepływu w wybranych przekrojach. Wyznaczany jest, podobnie jak w [Kaniowski, 2011], ze wzoru:

$$\varphi_{exp} = \frac{V_{v}}{V_{l} + V_{v}} = \frac{A_{v} \cdot H_{M}}{\left(A_{l} + A_{v}\right) \cdot H_{M}} = \frac{A_{v}}{A_{l} + A_{v}}, \qquad (4.12)$$

gdzie:

 $V_l$  – objętość zajmowana przez ciecz,

 $V_v$  – objętość zajmowana przez parę,

 $A_l$  – powierzchnia zajmowana przez ciecz,

 $A_v$  – powierzchnia zajmowana przez parę.

Wielkości te określa się na podstawie znanych udziałów cieczy i pary, w wybranych przekrojach analizowanych obrazów struktur przepływu. Sposób wyznaczenia stopnia zapełnienia szczegółowo omówiono w punkcie 4.5.6;

– eksperymentalny stopień suchości pary  $X_{exp}$  (ang. vapour quality) jest wy-

znaczany na podstawie eksperymentalnego procentowego stopnia zapełnienia, zgodnie z zależnością:

$$X_{exp} = \frac{m_{\nu}}{m_l + m_{\nu}} = \frac{\varphi_{exp} \cdot \rho_{\nu}}{\left(1 - \varphi_{exp}\right) \cdot \rho_l + \varphi_{exp} \cdot \rho_{\nu}}, \qquad (4.13)$$

gdzie:

 $m_l$  – masa cieczy,

 $m_v$  – masa pary,

 $\rho_v$  – gęstość pary.

#### 4.5.5. Zakres zmienności parametrów eksperymentalnych

Zakresy zmienności parametrów charakteryzujących przeprowadzane badania eksperymentalne przedstawiono w tabeli 4.3. Specyfikację podstawowych parametrów badań eksperymentalnych, w tym szczegółowe parametry eksperymentalne badań przeprowadzonych w ramach pracy, zestawiono w tabeli C.1, załącznik C.

TABELA 4.3. Zakresy zmienności podstawowych parametrów badań eksperymentalnych

Wielkość	Parametr	Jednostka	Zakres
Wielkości mierzone	$Q_V$	m <sup>3</sup> /s	$3,23 \cdot 10^{-6} \div 9,22 \cdot 10^{-6}$
Wienceser mierzene	$p_{in}$	kPa	106,5 ÷ 261
Wielkości nastawiane	$q_V$	kW/m <sup>3</sup>	$5,28 \cdot 10^4 \div 3,42 \cdot 10^5$
Wielkości obliczane	$q_w$	kW/m <sup>2</sup>	5,37 ÷ 34,71
	$\Delta T_{sub}$	K	28 ÷ 67
	и	m/s	0,08 ÷ 0,17
	G	kg/(m <sup>2</sup> s)	137 ÷ 287
	Re	_	440 ÷ 1 025

# 4.5.6. Procedura analizy obrazów struktur przepływu

Podczas eksperymentów dokonywana jest akwizycja obrazów struktur przepływu. Do rejestracji zdjęć czarno-białych struktur przepływu dwufazowego w kanale, wykorzystywany jest aparat cyfrowy typu lustrzanka *Canon EOS* 550D z obiektywem *Canon Ultrasonic EFS*, o ogniskowej 17÷85 mm, z filtrem polaryzacyjnym *Marumi*. Oświetlenie tworzących się struktur podczas przepływu płynu przez kanał zapewniają dwa zespoły oświetleń halogenowych, o mocy 900 W każdy, wspólnie zapewniające dużą wartość strumienia świetlnego – ok. 15000 lumenów.

Zdjęcia struktur przepływu są poddawane cyfrowej obróbce w kilku programach graficzno-analitycznych. W programie Corel Photo-Paint XS dokonuje się binaryzacji wybranych wycinków obrazów, która wspomaga rozpoznawanie granicy między fazą ciekłą a fazą gazową. Pozwala to na wyznaczenie objętości poszczególnych faz, które realizowane jest w programie Techsystem Globe systemie analizy obrazu wykonującym analizę stereologiczną obrazu cyfrowego celem dokonania jego oceny ilościowej. Jego zasada działania jest podobna jak do innych programów komputerowej analizy obrazu, jak szeroko znany program: Aphelion, a także NIS 3 i NIS 4 (Nikon), Omnimet (Buehler), Visilog4, DP SOFT, CellSence Entry i CellSence Standard (Olympus). Analizowany obraz monochromatyczny, dla którego obszar w kolorze czarnym oznacza fazę ciekłą, a w kolorze białym - fazę gazową, po skalibrowaniu wymiaru skali, podawany jest procentowo lub powierzchniowo udział fazy ciekłej. Dla celów porównawczych zestawiono wyniki otrzymane przy wykorzystaniu programów Techsystem Globe oraz NIS 4, otrzymując zbliżone wartości stopnia zapełnienia [Piasecka, 2014a]. Wyniki końcowe przedstawiane są jak zależność stopnia zapełnienia w funkcji odległości od wlotu do kanału.

Z eksperymentu danej serii wybieranych jest kilka obrazów struktur przepływu, przy czym dla każdego obrazka, w zadanych przekrojach, wyznaczany jest stopień zapełnienia pary.

Przykładowy obraz wraz z zaznaczonymi przekrojami i wyjściowymi zbinaryzowanymi obrazami struktur przepływu pokazano na rysunku 4.10. Wycinki obrazów o stałych wymiarach 5 x 40 mm, położone są w odległościach 90 mm, 133 mm, 270 mm oraz 336 mm od wlotu do kanału.

Wyznaczenie stopnia zapełnienia pary  $\varphi_{exp}$  następuje zgodnie z przedstawionym wcześniej wzorem (4.12).



**Rys. 4.10.** Podstawowe rozmieszczenie przekrojów, dla których następuje wyznaczenie stopnia zapełnienia pary, pomiar nr 22 z serii 25

#### 4.5.7. Ocena dokładności pomiarów

Na ocenę dokładności pomiarów wykonywanych na opisanym stanowisku badawczym składa się oszacowanie dokładności: pomiarów temperatury powierzchni wykonanych metodą termografii ciekłokrystalicznej, gęstości strumienia ciepła oraz wyznaczenia stopnia zapełnienia.

Ocenę błędów przeprowadzono zgodnie z zasadami analizy dokładności pomiarów w badaniach eksperymentalnych, przedstawionej w [Holman, 1989]. Jako miarę wielkości błędów przyjęto błąd średni kwadratowy. Średnie błędy kwadratowe obliczono jako pierwiastki z sumy kwadratów iloczynów pochodnych cząstkowych funkcji względem danego parametru zewnętrznego, występującego w pomiarze bezpośrednim, przez błąd średni pomiaru danego parametru.

# A. Oszacowanie dokładności pomiarów temperatury powierzchni wykonanych metodą termografii ciekłokrystalicznej

Do pomiaru rozkładu temperatury powierzchni folii wykorzystano metodę termografii ciekłokrystalicznej oraz omówiony w punkcie 4.3.6 system akwizycji, przetwarzania obrazów i danych pomiarowych. Temperaturę w zadanym punkcie powierzchni grzejnej wyznacza się na podstawie zarejestrowanej barwy powierzchni.

Rysunek 4.11 pokazuje schemat blokowy błędów, generowanych w układzie eksperymentalnym, do określenia dokładności pomiaru temperatury powierzchni metodą termografii ciekłokrystalicznej.



**Rys. 4.11.** Schemat systemu akwizycji danych pomiarowych z zaznaczonymi miejscami generacji błędów

W [Piasecka i Maciejewska, 2012b; Piasecka, 2013b; Hożejowska i inni, 2014b] przedstawiono dokładne założenia i wyniki dotyczące zamieszczonej poniżej procedury wyznaczania błędu temperatury. Procedurę obliczeń poprowadzono podobnie jak dla eksperymentów przeprowadzanych na poprzednim stanowisku [Piasecka i Hożejowska, 2006; Piasecka i Poniewski, 2008; Piasecka 2009b, 2010c; Hożejowska i inni, 2009]. Przyjęto, podobnie jak w [Hay i Hollingsworth, 1998], że średni błąd temperatury dla pojedynczego punktu wyznaczony na podstawie barwy (*hue*) w wyniku eksperymentu kalibracji, wyniesie:

$$\sigma = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^{P} \sigma_p = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^{P} \sqrt{\left(\frac{\partial T(hue_i)}{\partial hue_i} \cdot \Delta hue\right)^2 + \left(2 \cdot SEE\right)^2 + \left(\Delta T_f\right)^2}, \quad (4.14)$$

gdzie:

- p punkt pomiarowy;
- P liczba punktów pomiarowych;
- Δhue błąd wyznaczenia barwy (hue) dla zapisywanego i przetwarzanego obrazu; przyjęto, że jest równy podwójnemu odchyleniu standardowemu, wyznaczonemu na podstawie danych dla przykładowego obrazu powierzchni podczas doświadczenia kalibracji;
- SEE oszacowanie błędu standardowego wpasowania krzywej kalibracyjnej, wyznaczonej przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów, zgodnie ze wzorem:

$$SEE = \sqrt{\frac{\frac{1}{P} \sum_{p=1}^{P} (T(hue_i) - T_i)^2}{P - m - n}},$$
(4.15)

gdzie:

m – stopień wielomianu przybliżającego krzywą kalibracyjną, m = 1.6;

n – stopień pochodnej, n = 1;

 $\Delta T_f$  – błąd bezwzględny pomiaru temperatury wody na wlocie i wylocie do kanału podczas eksperymentu kalibracji.

Na wyznaczenie błędu bezwzględnego  $\Delta T_f$  składają się błędy wynikające z przetwarzania sygnału przez karty akwizycji, wchodzące w skład wykorzystywanej do badań stacji akwizycji danych pomiarowych *DaqLab 2005*  $\Delta T_{card}$  oraz błąd czujników termoelementów  $\Delta T_{therm}$ . W błędzie bezwzględnym przetwarzania sygnału przez odpowiednie karty stacji akwizycji danych pomiarowych  $\Delta T_{card}$  należy uwzględnić błąd karty termoparowej *DBK-83* o 14 kanałach wejściowych dla termopar  $\Delta T_{card_{-1}}$  oraz błąd 16-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego  $\Delta T_{card_{-2}}$ . Całkowity błąd bezwzględny pomiaru temperatury termoelementem  $\Delta T_{therm}$  jest spowodowany błędem wzorcowania termoelementu  $\Delta T_{cal}$  i błędem pomiaru termoelementem, wynikającym ze współpracy z kartami pomiarowymi stacji akwizycji danych pomiarowych  $\Delta T_{sens}$ . Opierając się na zakresie pracy termoelementów (termopara typu K, zakres pomiaru do 1100°C) oraz na zakresie pomiaru karty termoparowej (od 0 do 100 mV), otrzymano zależność: 1 K odpowiada 90,91 µV.  $\Delta T_{temp}$ , zatem odpowiada błędowi pomiaru temperatury  $\Delta T_f = 0,77$  K. Przykładowe wyniki obliczeń analizy błędów przeprowadzone były na podstawie następujących danych: P = 115 punktów kalibracyjnych,  $\Delta hue = 1,45$ , SEE = 0,13 K i  $\Delta T_f = 0,77$  K. Po podstawieniu danych do wzoru (4.14) otrzymano wynik  $\sigma = 0,86$  K.

Wykres temperatury w funkcji barwy (*hue*) tzw. *krzywą kalibracyjną*, opracowaną na podstawie omówionych danych, pokazano na rysunku 4.12a. Na rysunku 4.12b przedstawiono wykres błędów pomiaru temperatury w funkcji barwy (*hue*).



**Rys. 4.12.***a)* Krzywa kalibracyjna, b) wykres błędów pomiarowych w funkcji barwy (hue) [Piasecka i Maciejewska, 2012b]

# B. Błąd pomiarowy gęstości strumienia ciepła

Do obliczenia błędów pomiarowych przyjęto eksperyment przy najniższej gęstości strumienia ciepła, dostarczanej do rozwiniętej powierzchni grzejnej  $q_w = 5,61 \text{ kW/m}^2$  (seria pomiarowa 38, tabela C.1, zał. C). Gęstość strumienia ciepła na powierzchni grzejnej wyznaczono z dostarczonej

Gęstość strumienia ciepła na powierzchni grzejnej wyznaczono z dostarczonej do niej mocy elektrycznej, na podstawie wzoru (4.3). Średni błąd kwadratowy gęstości strumienia ciepła wyniesie:

$$\Delta q_{w} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{w}}{\partial I} \cdot \Delta I\right)^{2} + \left(\frac{\partial q_{w}}{\partial \Delta U} \cdot \Delta(\Delta U)\right)^{2} + \left(\frac{\partial q_{w}}{\partial L_{F}} \cdot \Delta L_{F}\right)^{2} + \left(\frac{\partial q_{w}}{\partial W_{F}} \cdot \Delta W_{F}\right)^{2}}.$$
 (4.16)

Błędy bezwzględne poszczególnych wielkości we wzorze określono pośrednio lub bezpośrednio z dokładności użytych przyrządów pomiarowych. Wyniosły one:

 Błąd bezwzględny pomiaru natężenia prądu za pomocą bocznika – obarczony błędem wynikającym z klasy jego dokładności oraz błędem miernika (amperomierz cyfrowy).

$$\Delta I = \sqrt{\left(\Delta I_{bocznik}\right)^2 + \left(\Delta I_{miernik}\right)^2}.$$
(4.17)

Klasa dokładności użytego bocznika wynosi 0,5%, co przy jego maksymalnym zakresie 400 A daje  $\Delta I_{bocznik} = 2,0$  A.

Klasa dokładności użytego amperomierza cyfrowego podana została przez producenta, jako 0,1%, co przy jego maksymalnym zakresie daje  $\Delta I_{miernik} = 0,4$  A.

- 2. Błąd bezwzględny pomiaru spadku napięcia obarczony błędem wynikającym z klasy dokładności miernika (woltomierza cyfrowego). Klasa dokładności użytego miernika podana została przez producenta, jako 0,1%, co przy jego maksymalnym zakresie daje  $\Delta(\Delta U) = 0,1$  V.
- Błędy bezwzględne pomiaru długości i szerokości folii grzejnej określono na podstawie pomiarów suwmiarką i wyniosły one: ΔL<sub>F</sub>= 5·10<sup>-5</sup> m, ΔW<sub>F</sub>= 5·10<sup>-5</sup> m. Błąd Δq<sub>w</sub> po obliczeniach wynosił 388 W/m<sup>2</sup>. Błąd względny obliczono według wzoru:

$$\frac{\Delta q_w}{q_w} \cdot 100\%, \tag{4.18}$$

otrzymując wartość 6,92%.

#### C. Oszacowanie dokładności wyznaczenia stopnia zapełnienia

Algorytm wyznaczenia powierzchni pojedynczego pęcherzyka gazowego wraz z metodologią zamiany obrazu w skali szarości (8 bit) na obraz monochromatyczny (1 bit) przedstawiono w tabeli 4.4.

Z powodu niewielkiej głębokości kanału pominięto zakrzywienie pęcherzyków w kierunku normalnym do powierzchni folii grzejnej (głębokość kanału). W celu oszacowania błędu bezwzględnego pomiaru stopnia zapełnienia założono, że jest równy obszarowi (piksel), na który składa się 0,0064 mm<sup>2</sup>, co wynika z rozdzielczości obrazu uzyskanego z użytego aparatu cyfrowego [Piasecka i Maciejewska, 2013b; Piasecka, 2013b].

**TABELA 4.4.** Metodologia zamiany obrazu w skali szarości (8 bit) na obraz monochromatyczny (1 bit) [Piasecka, 2013b]


## 4.6. OPORY PRZEPŁYWU DWUFAZOWEGO – METODYKA BADAŃ

#### 4.6.1. Założenia ogólne

Zagadnienia spadku ciśnienia podczas przepływu dwufazowego przez minii mikrokanały oraz kanały o małych wymiarach zostały omówione m.in. w [Lazarek i Black, 1982; Brutin i Tadrist, 2004; Kandlikar, 2002a,b; Sobierska i inni, 2006; Wen i Kenning, 2004; Yan i Lin, 1998; Yu i inni, 2002; Dutkowski, 2009]. Podobnie jak w kanałach konwencjonalnych, do opisu spadku ciśnienia w minikanałach wykorzystywane są dwa podstawowe modele: homogeniczny i rozdzielony. Oba modele przyjęto jako podstawę obliczeń w celu porównania własnych wyników eksperymentalnych.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury stwierdzono, że na całkowity spadek ciśnienia w przepływie dwufazowym  $(\Delta p/\Delta L)_{TP}$  składają się następujące elementy: tarciowy spadek ciśnienia  $(\Delta p/\Delta L)_T$ , przyśpieszeniowy spadek ciśnienia  $(\Delta p/\Delta L)_A$  oraz hydrostatyczny (grawitacyjny) spadek ciśnienia  $(\Delta p/\Delta L)_H$ , zgodnie ze wzorem:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{TP} = \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_T \pm \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_A \pm \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_H.$$
(4.19)

Dominującym członem w podanej zależności jest tarciowy spadek ciśnienia. W większości obliczeń, które można odnaleźć w literaturze, uwzględniane są tarciowy i przyśpieszeniowy spadek ciśnienia, gdyż zasadniczo wpływają na ostateczną wartość spadku ciśnienia przepływu dwufazowego. Dla kanałów poziomych hydrostatyczny spadek ciśnienia pominięto, a dla kanału pionowego – uwzględniono w obliczeniach.

## 4.6.2. Model homogeniczny

W modelu homogenicznym rozważa się przepływ dwóch faz jako przepływ jednej fazy, charakteryzującej się umownymi, uśrednionymi własnościami obu faz. Założenia dotyczą: jednakowej prędkości przepływu dla cieczy i gazu, równowagi termodynamicznej faz i jednofazowego współczynnika tarcia do opisu dwufazowego przepływu. Metodę oparto na założeniu, że rzeczywisty przepływ dwufazowy można zastąpić przepływem pseudojednofazowym czynnika o właściwościach zastępczych, zależnych od zawartości fazy ciekłej i gazowej, czyli ciecz i gaz tworzą jednorodną mieszaninę tzw. homogeniczną. Sprowadzenie przepływu dwufazowego do pseudojednofazowego oznacza możliwość wyznaczenia tarciowego spadku ciśnienia z równania *Darcy'ego–Weisbacha*, w postaci:

$$\Delta p_T = f_h \cdot \frac{L_M}{d_h} \cdot \frac{\rho_h \cdot u_h^2}{2}.$$
(4.20)

Współczynnik strat tarcia  $f_h$  może być wyznaczony z równania *Hagena–Poiseuille'a* dla przepływu laminarnego, zgodnie ze wzorem:

$$f_h = \frac{64}{Re_h}.$$
(4.21)

Dla mieszaniny dwufazowej, traktowanej jako mieszanina homogeniczna, gęstość może być wyznaczona z zależności:

$$\frac{1}{\rho_h} = \frac{X_{th}(x)}{\rho_v} + \frac{1 - X_{th}(x)}{\rho_l}.$$
(4.22)

Występujący w równaniu (4.22) termodynamiczny równowagowy stopień suchości pary  $X_{th}$ , w warunkach nasycenia, może być wyznaczony z zależności [Sobierska i inni, 2006]:

$$X_{th} = \frac{1}{r} \cdot \left( \frac{q_w \cdot S_M \cdot x}{G \cdot A_M} + i_{l,in} - i_{l,sat} \right).$$
(4.23)

Zależność wynika z zasady zachowania energii oraz prawa zachowania masy, przy założeniu równomiernie działającego strumienia ciepła na powierzchni grzejnej [Sobierska i inni, 2006]. W obliczeniach założono liniową zmianę ciśnienia dla przepływu płynu w kanale oraz odpowiadającą mu liniową zmianę temperatury nasycenia czynnika w kanale. W przedstawianych wynikach obliczeń ujęto jedynie część serii pomiarowej, dla której płyn osiąga warunki nasycenia.

Średnią prędkość przepływu mieszaniny homogenicznej można wyznaczyć jako:

$$u_h = \frac{Q_m}{\rho_h \cdot A_M}.$$
(4.24)

Homogeniczną liczbę Reynoldsa  $Re_h$ , występującą w równaniu (4.21), niezbędną do określenia współczynnika oporu tarcia  $f_h$ , oblicza się z zależności:

$$Re_h = \frac{u_h \cdot \rho_h \cdot d_h}{\mu_h}.$$
(4.25)

gdzie:

 $\mu_h$  – zastępczy współczynnik lepkości dynamicznej mieszaniny homogenicznej; przyjęto, podobnie jak wg *Owensa* [Owens, 1961; Collier, 1981], że jest ona równa lepkości cieczy.

Z kolei przyśpieszeniowy spadek ciśnienia dla modelu homogenicznego przepływu dwufazowego oszacowano, podobnie jak w [Yan i Lin, 1998], następującą zależnością:

$$\Delta p_A = G^2 \cdot (v_l - v_v) \cdot \Delta X_{th}, \qquad (4.26)$$

gdzie:

 $v_l$  i  $v_v$  – objętości właściwe, odpowiednio dla cieczy i pary.

Dla kanału pionowego hydrostatyczny spadek ciśnienia był wyznaczany z następującego równania:

$$\Delta p_H = g \cdot \rho_h \cdot \sin \beta, \tag{4.27}$$

gdzie:

 $\beta$  – kąt nachylenia kanału do poziomu.

# 4.6.3. Model rozdzielony

W modelu rozdzielonym rozważa się przepływ mieszaniny dwufazowej jako oddzielne przepływy cieczy i pary. Metoda zwana jest również metodą współczynnika dwufazowego (ang: *two-phase multiplier method*). Jest szeroko wykorzystywana do wyznaczenia dwufazowego spadku ciśnienia z iloczynu jednofazowego, tarciowego spadku ciśnienia i współczynnika dwufazowego. Jednofazowy tarciowy spadek ciśnienia można oszacować z dość dużą dokładnością, przy wykorzystaniu wielu uznawanych powszechnie zależności. Wyznaczenie współczynnika dwufazowego staje się najważniejszym zagadnieniem, niezbędnym do wyznaczenia dwufazowego spadku ciśnienia w tej metodzie. W literaturze można odnaleźć wiele zależności empirycznych, opartych na wynikach badań eksperymentalnych, których celem jest wyznaczenie współczynnika dwufazowego w modelu rozdzielonym. Powszechnie stosowaną zależnością do opisu dwufazowego tarciowego spadku ciśnienia w modelu rozdzielonym jest zaproponowana przez *Lockharta* i *Martinelli'ego* [Lockhart i Martinelli, 1949]. W opisywanej zależności tarciowy spadek ciśnienia jest opisywany jako:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_T = \Phi_l^2 \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_l = \Phi_v^2 \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_v, \qquad (4.28)$$

przy czym poszczególne spadki ciśnienia można wyznaczyć w oparciu o podstawowe wzory:

$$\Delta p_l = f_l \cdot \frac{L_M}{d_h} \cdot \frac{\rho_l \cdot j_l^2}{2}, \qquad (4.29)$$

$$\Delta p_{\nu} = f_{\nu} \cdot \frac{L_M}{d_h} \cdot \frac{\rho_{\nu} \cdot j_{\nu}^2}{2}.$$
(4.30)

W modelu często zakłada się, że współczynniki oporów przepływów jednofazowych (cieczy i pary) są przyjmowane na podstawie uznanych powszechnie zależności. Zatem współczynnik  $f_l$  może zostać wyznaczany z zależności *Hagena– Poiseuille'a*, jeśli zakłada się przepływ laminarny cieczy. Dla turbulentnego przepływu pary można przyjąć zależność *Blasiusa* do określenia współczynnika  $f_y$ .

pływu pary można przyjąć zależność *Blasiusa* do określenia współczynnika  $f_{\nu}$ . Pozorne prędkości cieczy i pary, występujące w równaniach (4.31) i (4.32), definiowane są jako stosunek objętościowego natężenia przepływu do przekroju poprzecznego, który zajmuje każda faza. Przyjęto, że mogą być wyznaczone przy wykorzystaniu termodynamicznego stopnia suchości, zgodnie z następującymi zależnościami:

$$j_l = \frac{G \cdot \left(1 - X_{th}\right)}{\rho_l},\tag{4.31}$$

$$j_{\nu} = \frac{G \cdot X_{th}}{\rho_{\nu}}.$$
(4.32)

*Lockhart* i *Martinelli* [Lockhart i Martinelli, 1949] zaprezentowali zależność  $\Phi_l^2$  w funkcji stopnia suchości. *Chisholm* [Chisholm, 1967] zaproponował równanie łączące obie wielkości. Dwufazowy współczynnik  $\Phi^2$  jest wyznaczany na podstawie tarciowego spadku ciśnienia, osobno dla każdej fazy, zgodnie z zależnościami:

$$\Phi_l^2 = 1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2},$$
(4.33)

$$\Phi_{\nu}^{2} = 1 + C \cdot \chi + C \cdot \chi^{2}.$$
(4.34)

Występujący w równaniach (4.33) i (4.34) parametr *Lockharta–Martinelli'ego* jest definiowany wzorem:

$$\chi^{2} = \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{l} / \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{v}.$$
(4.35)

Stała *C* w równaniach (4.33) i (4.34) przyjmuje różne wartości w zależności od charakteru przepływu każdej z faz. W literaturze, na podstawie wielu prac można zauważyć, że metoda *Lockharta–Martinelli 'ego* daje dość dokładne wyniki w dużym spektrum badań. Jednakże, można odnaleźć wiele modyfikacji tej metody, zwykle dotyczących definicji stałej *C*. W tabeli 4.5 przedstawiono wartości stałej *C* w zależności od charakteru przepływu cieczy i pary. W obliczeniach przy założeniu laminarnego przepływu dla cieczy oraz przepływu turbulentnego dla pary przyjęto wartość współczynnika C = 12.

Re <sub>1</sub>	Re <sub>v</sub>	С
$\geq 2 000$	$\geq 2 000$	20
< 2 000	$\geq 2 \ 000$	12
$\geq$ 2 000	< 2 000	10
< 2 000	< 2 000	5

TABELA 4.5. Stałe Lockharta–Martinelli'ego w modelu rozdzielonym

W celu wyznaczenia przyśpieszeniowego spadku ciśnienia, podobnie jak w [Sobierska i inni, 2006], wykorzystano następującą zależność:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{A} = \frac{G^{2}}{\rho_{l}} \left[\frac{X_{th}^{2}}{\varphi_{theor}} \left(\frac{\rho_{l}}{\rho_{v}}\right) + \frac{\left(1 - X_{th}\right)^{2}}{1 - \varphi_{theor}} - 1\right].$$
(4.36)

We wzorze zastosowano termodynamiczny stopień suchości  $X_{th}$  wynikający z równania bilansu ciepła, który wcześniej zdefiniowano w równaniu (4.23).

Występujący w równaniu (4.36) stopień zapełnienia  $\varphi_{theor}$  obliczono ze wzoru:

$$\varphi_{theor} = 1 - \frac{1}{\Phi_l}.$$
(4.37)

W równaniu podstawiono  $\Phi_l$ , wyznaczony z równania (4.33).

Dla kanału pionowego hydrostatyczny spadek ciśnienia wyznaczono ze wzoru:

$$\Delta p_H = g \cdot \sin \beta \cdot \Delta L \Big[ \varphi_{theor} \cdot \rho_v + (1 - \varphi_{theor}) \rho_l \Big]. \tag{4.38}$$

#### **4.7. PODSUMOWANIE**

W rozdziale przedstawiono zagadnienia realizowane w badaniach eksperymentalnych dotyczących rozwoju wrzenia pęcherzykowego, dla laminarnego przepływu czynnika chłodniczego FC-72 w minikanale o przekroju prostokątnym ogrzewanym asymetrycznie, przy wykorzystaniu techniki termografii ciekłokrystalicznej do detekcji temperatury powierzchni grzejnej. Przedstawiono cel i zakres badań, budowę stanowiska pomiarowego i podstawowej jego części – modułu pomiarowego z minikanałem, o zmiennej orientacji przestrzennej. Scharakteryzowano właściwości powierzchni rozwiniętych stosowanych w badaniach. Omówiono metodykę badań eksperymentalnych wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie, poprzedzającą je procedurę kalibracji temperatury na podstawie obserwowanej barwy powierzchni grzejnej oraz wyszczególniono podstawowe wielkości charakteryzujące badania eksperymentalne. Przedstawiono metodykę badania oporów przepływu dwufazowego, w tym homogeniczny i rozdzielony model spadku ciśnienia przepływu dwufazowego.

Przybliżone w niniejszym rozdziale zagadnienia posłużą do analizy wyników badań eksperymentalnych, która jest tematem kolejnego rozdziału.

# **5** BADANIA EKSPERYMENTALNE – WYNIKI I ANALIZA

## 5.1. WPROWADZENIE

W rozdziale zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych i ich analize, dotycząca wymiany ciepła, spadku ciśnienia oraz struktur przepływu podczas wrzenia w przepływie czynnika chłodniczego w kanale, asymetrycznie ogrzewanym rozwinieta powierzchnia grzejna. Schemat rozpatrywanego zagadnienia przedstawia rysunek 5.1. W każdej serii pomiarowej ustalone sa: nateżenie przepływu cieczy (strumień masy), temperatura płynu oraz nadciśnienie na wlocie do kanału, a wyznaczane sa: ciśnienie i niedogrzanie cieczy do temperatury nasycenia na wlocie i wylocie z kanału oraz lokalne przegrzanie powierzchni grzejnej powyżej temperatury nasycenia. Podczas serii pomiarowej zwiększany, a następnie zmniejszany jest strumień ciepła dostarczany do folii grzejnej, przy czym natężenie prądu dostarczanego ze spawarki regulowano potencjometrem. Oprócz akwizycji barwy na gładkiej powierzchni folii (dzięki termografii ciekłokrystalicznej) odbywa się jednoczesna rejestracja obrazu struktur przepływu dwufazowego od strony rozwinietej powierzchni folii, stykającej się z płynem w kanale. Schemat przepływu płynu w kanale z zaznaczeniem stref: konwekcji jednofazowej, wrzenia przechłodzonego i rozwinietego wrzenia pęcherzykowego pokazano na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Schemat przepływu płynu w kanale

# 5.2. WYNIKI BADAŃ WYMIANY CIEPŁA

# 5.2.1. Uwagi ogólne

Analizę procesów wymiany ciepła przeprowadzono na podstawie:

- obrazów termograficznych i określonej na ich podstawie lokalnej temperatury powierzchni grzejnej,
- obrazów struktur przepływu,
- lokalnej temperatury płynu chłodniczego,
- lokalnej temperatury nasycenia,
- lokalnego współczynnika przejmowania ciepła.

Wszystkie pomiary zostały wykonane w stanie ustalonym.



**Rys. 5.2.***a)* Termograficzne obrazy powierzchni folii z ciekłymi kryształami, b) obrazy struktur przepływu, dane dla pomiarów nr 9, 12, 18, 23, 27 i 30 serii 25; fluorinert FC-72; kanał poziomy, położenie 0°, miniwglębienia na całej powierzchni folii, parametry eksperymentalne: G = 285 kg/(m<sup>2</sup>s), p<sub>in</sub> = 120 kPa,  $\Delta T_{sub} = 44 \text{ K}$ 



**Rys. 5.3.***a)* Zależność temperatury płynu, nasycenia, powierzchni grzejnej (a), oraz współczynnika przejmowania ciepła (b) w funkcji odległości od wlotu do kanału, dane dla pomiarów nr 9, 12, 18, 23, 27 i 30 serii 25, parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.2

Analizę przeprowadzono na podstawie wyników badań, przeprowadzonych z wykorzystaniem folii grzejnej z miniwgłębieniami na całej jej powierzchni, przy poziomym ustawieniu kanału 0° (płyn nad powierzchnią grzejną). Barwne obrazy gładkiej powierzchni folii z warstwą ciekłokrystaliczną podczas całej serii pomiarowej (seria 25, tabela C.1, zał. C) przedstawiono w rozdziale 4 na rysunku 4.9a. W celu poglądowego zestawienia danych, z całej serii wybrano

sześć pomiarów, których podstawowe wyniki pokazano na rysunkach 5.2 i 5.3 [Piasecka, 2013d]. Dla pomiarów nr 9, 12, 18, 23, 27 i 30 przedstawiono kolejno: barwne obrazy powierzchni folii z warstwą ciekłokrystaliczną (rys. 5.2a), obrazy struktur przepływu (rys. 5.2b), temperaturę płynu, temperaturę nasycenia, temperaturę powierzchni grzejnej (rys. 5.3a) oraz współczynnik przejmowania ciepła (rys. 5.3b) w funkcji odległości od wlotu do kanału. Pełne dane dla omawianej serii pomiarowej, obejmujące wymienione zależności, pokazano na rysunkach od D.1 do D.4 w załączniku D.

# 5.2.2. Badania wizualizacyjne

Dla wybranych sześciu pomiarów z serii 25, dla uzmiennianych strumieni ciepła doprowadzanego do powierzchni grzejnej, pokazano kolejno na rysunkach od 5.4 do 5.10:

- obrazy termograficzne gładkiej powierzchni folii, oznaczone jako a);
- obrazy struktur przepływu, obserwowane do strony rozwiniętej powierzchni folii, oznaczone jako b),
- lokalne temperatury powierzchni grzejnej funkcji w układzie 3D dla położonych centralnie wycinków folii (oznaczone jako c) otrzymane z rozkładu barwy na powierzchni dzięki zastosowaniu termografii ciekłokrystalicznej.

Analizowany obszar, jednakowy dla wszystkich analizowanych obrazów, pokazano na rysunku 5.4a.

W poprzednim rozdziale, w punkcie 4.5.3 omówiono sposób identyfikacji zjawisk towarzyszących rozwojowi wrzenia w kanale.

Pierwsza część eksperymentu dotyczy strefy konwekcji jednofazowej, którą kończy inicjacja wrzenia. W początkowej fazie zwiększania strumienia ciepła barwny obraz powierzchni z warstwą ciekłokrystaliczną wskazuje na występowanie tzw. frontu wrzenia. Jest on rozpoznawany jako występujące kolejno w kanale stopniowe pojawianie się kolejnych barw w sekwencji widma widzialnego (czerwień, żółty, zielony, niebieski i granatowy), następnie gwałtowne zmiany barwy na folii grzejnej następujące odwrotnie do sekwencji widma i dalej powrót do barwy czarnej (rys. 5.4a, dodatkowe powiększenie fragmentu obrazu). Na wykresach zależności temperatury powierzchni grzejnej w funkcji odległości od wlotu do kanału front wrzenia jest identyfikowany jako początkowy stopniowy wzrost, a następnie gwałtowny spadek temperatury (rys. 5.4c). Spontaniczna nukleacja powoduje uskok temperatury powierzchni grzejnej; szerzej zagadnienie to omówiono w punktach 5.2.5 i 5.2.6. Przyjęto, że inicjacja wrzenia (BI) rozpoczyna się w tych punktach kanału, dla których zarejestrowano najwyższą wartość temperatury powierzchni grzejnej, po której rozpoczyna się spadek temperatury.



**Rys. 5.4.** Dane dla pomiaru nr 9 serii 25: a) obraz termograficzny, b) obraz struktur przepływu, c) lokalne temperatury powierzchni grzejnej w układzie 3D; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.2

Wzrost dostarczanego strumienia ciepła powoduje wystąpienie strefy rozwoju wrzenia pęcherzykowego. Wówczas obserwowane jest przesuwanie się frontu wrzenia w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu, na co wskazuje położenie zależności temperatury powierzchni grzejnej w funkcji odległości od wlotu do kanału, przesuwające się w stronę wlotu do kanału dla kolejnych pomiarów (rys. 5.3a). Na obrazach struktur (rys. 5.4b [Piasecka, 2013d]) w okolicy frontu wrzenia widoczne są tworzące się drobne pęcherzyki pary. W analizowanym przypadku, gdy wykorzystywana jest folia rozwinieta na całej długości, z miniwgłębieniami o stosunkowo dużych wymiarach (w porównaniu do mikrowgłębień wytwarzanych na innych foliach), nie udało się zaobserwować miejsc, w których najwcześniej tworzą się pęcherzyki. Jednakże na podstawie analizy wyników badań z wykorzystaniem powierzchni rozwiniętej z mikrowgłębieniami i dla folii gładkiej, można zauważyć, że pierwsze pecherzyki pary tworzą się w pobliżu bocznych ścian kanału, by następnie podczas zwiększania strumienia ciepła, pojawić się regularnie na całej linii frontu wrzenia. Obrazy potwierdzające takie spostrzeżenia pokazano na rysunku 5.5 [Piasecka, 2013d].



**Rys. 5.5.** Obrazy pokazujące miejsca generowania pierwszych pęcherzyków pary: a),c),e) obraz termograficzny; b),d),f) odpowiadający mu obraz struktur przepływu

Pomiary nr 12, 18 i 23 odpowiadają części eksperymentu dotyczącego rozwoju wrzenia pęcherzykowego, przy czym pomiar nr 23 odpowiada maksymalnej wartości strumienia ciepła, doprowadzonego do powierzchni grzejnej w analizowanej serii pomiarowej. Dane dotyczące pomiarów nr 12, 18 i 23 pokazano kolejno na rysunkach 5.6, 5.7 i 5.8 [Piasecka, 2013d].



**Rys. 5.6.** Dane dla pomiaru nr 12 serii 25: a) obraz termograficzny, b) obraz struktur przepływu, c) lokalne temperatury powierzchni grzejnej w układzie 3D; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.2



**Rys. 5.7.** Dane dla pomiaru nr 18 serii 25: a) obraz termograficzny, b) obraz struktur przepływu, c) lokalne temperatury powierzchni grzejnej w układzie 3D; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.2



**Rys. 5.8.** Dane dla pomiaru nr 23 serii 25: a) obraz termograficzny, b) obraz struktur przepływu, c) lokalne temperatury powierzchni grzejnej w układzie 3D; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.2

Dalsze zwiększanie strumienia ciepła powoduje, że po przekroczeniu temperatury powierzchni grzejnej powyżej dolnej granicy pasma aktywnego ciekłych kryształów, znów możliwa jest detekcja temperatury folii. Początkowo barwa na powierzchni jest słabo widoczna, jednak podczas zwiększania strumienia ciepła, barwa staje się intensywna i obejmuje całą szerokość folii (rys. 5.6a). Na rysunku 5.6c można zaobserwować regularny wzrost temperatury powierzchni grzejnej wraz z odległością od wlotu do kanału (z wyłączeniem obszaru tuż przy wlocie do kanału, gdzie występuje zanikający front wrzenia). W obszarze wylotowym płynu z kanału występuje niewielkie obniżenie temperatury folii, widoczne na rysunkach 5.6c, 5.7c, 5.8c oraz na wykresach dla całej serii pomiarowej (rys. D.1, zał. D), a spowodowane zetknięciem się grzejnika z chłodniejszą częścią materiału modułu pomiarowego. Na obrazach struktur przepływu obserwowane są powiększające się pęcherzyki pary, łączące się w większe aglomeraty. Tendencje pęcherzyków do łączenia się w większe struktury charakterystyczne jest przede wszystkim dla badań wykonanych przy ustawieniu poziomym kanału, położenie 180°. Zastosowanie rozwiniętej powierzchni grzejnej przyczynia się do tego, że pęcherzyki tworzące się w mieszaninie ciekło-parowej stają się bardziej rozdrobnione, w porównaniu do obserwowanych struktur w badaniach z folią gładką [Piasecka, 2013d].

Duże rozdrobnienie pęcherzyków, utrzymujące się nawet przy stosunkowo dużych strumieniach ciepła dostarczanych do powierzchni grzejnej, jest obserwowane w badaniach z ustawieniem pionowym kanału, położenie 90°. Dla wszystkich analizowanych ustawień modułu (poziome 0°, pionowe 90°, poziome 180°) zaobserwowano następujące struktury: pęcherzykową, pęcherzykowokorkową, korkową i korkowo-mgłową. Niektóre struktury wystąpiły jedynie dla konkretnych ustawień kanału, przykładowo: struktura mgłowa wystąpiła tylko dla poziomego położenia modułu 180°. W zależności od ustawienia modułu obserwowane są różne dominujące struktury przepływu. Zarówno obserwowany stopień rozdrobnienia pęcherzyków i ich kształt (struktura pęcherzykowa), jak i kształt tworzących się struktur korkowych (struktura pęcherzykowo-korkowa, korkowa), różni się zasadniczo w zależności od kąta ustawienia kanału w stosunku do poziomu. Zagadnienie zostanie szczegółowo omówione w kolejnych punktach rozdziału (punkty 5.2.7 i 5.4.4).

Dalsze doprowadzanie ciepła nie pozwala już na detekcję temperatury powierzchni (temperatury poza górną granicą pasma aktywnego zastosowanych ciekłych kryształów), a nawet może prowadzić do wystąpienia pierwszego kryzysu wrzenia i zniszczenia elementów modułu pomiarowego. Podczas tego zjawiska, które miało miejsce dwukrotnie, nastąpiło nieodwracalne zniszczenie warstwy ciekłokrystalicznej, któremu towarzyszył nagły wzrost temperatury czynnika chłodniczego w kanale. Obniżeniu temperatury elementów modułu pomiarowego towarzyszyło pęknięcie szyby stykającej się z folią grzejną. W drugim etapie eksperymentu, podczas zmniejszania strumienia ciepła dostarczanego do folii grzejnej, obserwowana jest stopniowa zmiana barwy powierzchni, następująca w kierunku odwrotnym do sekwencji widma, najpierw w części wylotowej z kanału (pomiary od nr 24, rys. 4.9a). Rozpoczyna się wówczas **strefa wygaszania wrzenia**. Na rysunku D.1 w załączniku D opisanej sytuacji odpowiada malejąca zależność temperatury powierzchni grzejnej wraz z odległością od wlotu, dla pomiarów od nr 24 do końca serii. Wraz ze zmniejszaniem strumienia ciepła wygaszanie wrzenia następuje najwcześniej na początku kanału. Pomiary nr 27 i 30, dla których obrazy i wykres lokalnych wartości temperatury folii pokazano na rysunkach 5.9 i 5.10 [Piasecka, 2013d], odpowiadają omawianej części eksperymentu dot. wygaszania wrzenia pęcherzykowego. Podczas ostatnich pomiarów serii następuje powrót do wymiany ciepła na drodze konwekcji wymuszonej.

Analiza struktur przepływu dwufazowego, pokazanych na rysunkach 5.9b i 5.10b, wskazuje, że połączone wcześniej większe aglomeraty pary stopniowo powracają do pierwotnego rozdrobnienia i pojedynczych pęcherzyków pary w obszarach, gdzie wrzenie uległo "wygaszeniu".



**Rys. 5.9.** Dane dla pomiaru nr 27 serii 25: a) obraz termograficzny, b) obraz struktur przepływu, c) lokalne temperatury powierzchni grzejnej w układzie 3D; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.2



**Rys. 5.10.** Dane dla pomiaru nr 30 serii 25: a) obraz termograficzny, b) obraz struktur przepływu, c) lokalne temperatury powierzchni grzejnej w układzie 3D; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.2

# 5.2.3. Wpływ temperatury czynnika roboczego na wymianę ciepła

W warunkach początkowych eksperymentu do kanału doprowadzana jest ciecz o temperaturze poniżej temperatury nasycenia, zwana przechłodzoną. Parametrem, który świadczy o przechłodzeniu cieczy jest jej niedogrzanie do temperatury nasycenia  $\Delta T_{sub}$ , definiowane jako różnica temperatury saturacji i temperatury płynu, wyznaczana na podstawie pomiarów temperatury cieczy i ciśnienia, zwykle na wlocie do kanału.

Zależność średniej temperatury płynu w rdzeniu przepływu w funkcji odległości od wlotu do kanału, dla wybranych strumieni ciepła dostarczonych do powierzchni grzejnej, pokazano na rysunku 5.3a, a dla całej analizowanej serii pomiarowej na rysunku D.2 w załączniku D. Zakłada się liniową zależność temperatury płynu, na podstawie mierzonych temperatur czynnika chłodniczego, dokonywanych na wlocie i wylocie do/z kanału. W pierwszych analizach zjawisk, w obliczeniach koncentrujących się na obszarze inicjacji wrzenia, średnia temperatura płynu wyznaczana była na podstawie bilansu entalpii, nawet poza obszarem konwekcji i inicjacji wrzenia [Piasecka i inni, 2004].

Przechłodzona ciecz w kanale ogrzewa się wzdłuż drogi przepływu zarówno w warstwie przyściennej, jak i w rdzeniu. Dla pierwszych pomiarów serii, podczas zwiększania strumienia, w całym kanale ma miejsce wrzenie przechłodzone, gdyż średnia temperatura płynu w rdzeniu przepływu jest niższa od temperatury nasycenia. Obrazuje to relacja zależności średniej temperatury płynu i temperatury nasycenia dla wybranych pomiarów przykładowego eksperymentu, przedstawionych na rysunku 5.3a. Wówczas w warstwie przyściennej, przy powierzchni grzejnej, ciecz ulega przegrzaniu, natomiast w rdzeniu przepływu i przy powierzchni szyby pozostaje niedogrzana. Oznacza to występowanie dużego gradientu temperatury płynu (rzędu kilkudziesięciu stopni) na niewielkiej głębokości kanału. Wraz z dalszym wzrostem temperatury powierzchni grzejnej, następującym wraz z dostarczanym do niej strumieniem ciepła, średnia temperatura cieczy w rdzeniu przepływu rośnie stopniowo, gdyż ciecz ogrzewa się wzdłuż przepływu względem powierzchni grzejnej. Niedogrzanie temperatury płynu do temperatury nasycenia na wlocie zwykle posiada wartości rzędu kilkudziesięciu stopni, w analizowanej serii nr 25 wartość  $\Delta T_{sub} = 44$  K. Temperatura płynu, rejestrowana na wylocie z kanału, rośnie coraz szybciej dla kolejnych pomiarów serii z rozwojem wrzenia, wraz ze wzrostem strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej (patrz rys. 5.3a).

# 5.2.4. Wpływ przegrzania powierzchni grzejnej oraz ciśnienia nasycenia na wymianę ciepła

Zależność temperatury nasycenia płynu w funkcji odległości od wlotu do kanału, dla wybranych strumieni ciepła dostarczonych do powierzchni grzejnej, pokazano na rysunku 5.3a, a dla całej analizowanej serii pomiarowej - na rysunku D.3 w załączniku D. Temperatura nasycenia jest określana na podstawie wartości ciśnienia bezwzględnego i w analizowanej serii wynosi 335÷342 K. Jak wspomniano, założono liniowy rozkład ciśnienia w kanale, uzyskiwany na podstawie wartości pomiaru nadciśnienia, mierzonego na wlocie i wylocie do/z kanału. W związku z niewielkim spadkiem ciśnienia na długości kanału (rzędu kilku-kilkudziesięciu hPa), który związany jest głównie z oporami tarciowymi, obserwuje się malejący charakter zależności temperatury nasycenia wraz ze wzrostem odległości od wlotu do kanału. Gdy w kanale występuje rozwój wrzenia, podczas zwiększania strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej, towarzyszą mu: nagły wzrost i skoki ciśnienia, wahania przepływu i fluktuacje oporów przepływu. Wszystkie te zjawiska świadczą o zwiększaniu ilości fazy parowej we wrzącej mieszaninie cieczowo-gazowej i powodują duże wahania rejestrowanego ciśnienia na wlocie i wylocie z kanału.

Analizując przebieg zależności podanych na rysunku D.3 w załączniku D dla pomiarów od nr 3 do 23 (podczas zwiększania strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej) oraz pomiarów od nr 24 do 27 (podczas zmniejszania strumienia), można zauważyć, że nie wszystkie zależności układają się względem siebie równolegle. Zatem wzrost ciśnienia w kanale odbywa się nierównomiernie, prawdopodobnie występują fluktuacje ciśnienia, których nie sposób zaobserwować przy punktowym pomiarze ciśnienia na wlocie i wylocie kanału. Jednakże, ciśnienie rejestrowane podczas zmniejszania strumienia ciepła dla pomiarów od nr 28, już nie wykazuje takich wahań. Na rysunku D.3 w załączniku D analizując zależności dla ostatnich pomiarów można zaobserwować równoległe linie o bardzo podobnym kącie nachylenia do osi odciętych.



**Rys. 5.11.** Zależność przegrzania powierzchni grzejnej w funkcji odległości od wlotu do kanału, seria 25: a) pomiary nr 8 i 9 oraz od nr 12 do 20, b) pomiary od nr 21 do 30; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.2

Przegrzanie powierzchni grzejnej  $\Delta T_{sat}$  jest niezbędne do aktywizacji zarodków pary i inicjacji wrzenia, przy czym lokalnie uzyskiwane jest w obszarze inicjacji wrzenia dla ustabilizowanego frontu wrzenia (pomiary 8 i 9, rys. 4.9a), a następnie w dalszej odległości od wlotu do kanału, wraz z rozwojem wrzenia. Przegrzanie powierzchni jest funkcją prędkości przepływu, ciśnienia i niedogrzania cieczy na wlocie. W obszarze inicjacji wrzenia przegrzanie powierzchni grzejnej wystąpiło dla pomiarów 8 i 9. Zależność przegrzania powierzchni w funkcji odległości od wlotu do kanału pokazano na rysunku 5.11. Przebieg wspomnianej zależności ma charakter zbliżony do przebiegu rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej, czyli jego maksimum osiągnięte jest dla punktu, w którym nastąpiła inicjacja wrzenia, a której towarzyszy spadek temperatury powierzchni. W warunkach rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego przegrzanie powierzchni rośnie wraz z odległością od wlotu do kanału. Z przebiegów zależności średniej temperatury płynu i temperatury nasycenia, zestawionych poglądowo dla wybranych pomiarów (rys. 5.2a) można zauważyć, że temperatura nasycenia zmienia się nieznacznie (charakter funkcji malejącej), natomiast temperatura powierzchni grzejnej zmienia się znacząco (charakter funkcji silnie rosnącej), szczególnie w warunkach rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego. Zatem, gdy silnie rośnie temperatura powierzchni grzejnej, a nieznacznie temperatura nasycenia, przegrzanie powierzchni najpierw rośnie łagodnie, następnie występuje jego dynamiczny wzrost, aby w okolicy wylotu z kanału osiągnąć wartości najwyższe. Na obniżenie wartości przegrzania tuż przy wylocie z kanału wpływa spadek temperatury powierzchni grzejnej występujący wskutek zetknięcia się z chłodniejszą częścią modułu pomiarowego. Wykresy potwierdzające wymienione zależności dla omawianej serii pomiarowej, pomiary od nr 11 do 30, pokazano na rysunku 5.11.

## 5.2.5. Współczynnik przejmowania ciepła podczas rozwoju wrzenia

Lokalne współczynniki przejmowania ciepła w jednym z przybliżeń jednowymiarowych, wyznacza się zgodnie ze wzorem (4.1) dla wrzenia przechłodzonego. Wówczas w równaniu występuje różnica temperatury powierzchni grzejnej i średniej temperatury czynnika chłodniczego  $(T_F - T_j)$ . W obliczeniach dla wrzenia nasyconego, gdy temperatura powierzchni grzejnej jest wyższa od temperatury saturacji, we wzorze na lokalny współczynnik przejmowania ciepła uwzględnia się przegrzanie powierzchni grzejnej  $(T_F - T_{sat})$ , zgodnie ze wzorem (4.2).

Zależność współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału dla wybranych pomiarów analizowanej serii pomiarowej pokazano na rysunku 5.3b, a dla całej serii pomiarowej – na rysunku D.4 w załączniku D. Wyniki lokalnych współczynników przejmowania ciepła różnią się zasadniczo, w zależności od obszaru, w którym są wyznaczane.

Na podstawie analizy i relacji temperatury powierzchni grzejnej i temperatury nasycenia wzdłuż przepływu stwierdzono, że podczas pomiarów od nr 1 do 13 w kanale ma miejsce wrzenie przechłodzone. Dane dla kolejnych pomiarów wskazują na występowanie wrzenia nasyconego. Najniższe wartości współczynnika przejmowania ciepła otrzymywane są dla konwekcji jednofazowej, która występuje podczas pierwszych pomiarów rozpoczynających serię. Zgodnie z prawem Newtona, przy dostarczanym do powierzchni grzejnej stałym strumieniu ciepła, gdy występuje silny wzrost temperatury powierzchni grzejnej, a temperatura cieczy rośnie znacznie słabiej, współczynnik przejmowania ciepła wykazuje charakter malejący. Podczas inicjacji wrzenia w kanale obserwuje się nagły wzrost współczynnika przejmowania ciepła. Przy nagłym spadku temperatury powierzchni grzejnej podczas histerezy nukleacji (zerowego kryzysu wrzenia), gdy temperatura płynu w rdzeniu przepływu nadal rośnie słabo, współczynnik przejmowania ciepła wykazuje charakter rosnący. Inicjacji wrzenia towarzyszy zatem silny wzrost współczynnika przejmowania ciepła (obserwowany dla pomiarów od nr 1 do 12). Dla obszaru wrzenia nasyconego otrzymuje się wysokie wartości współczynnika przejmowania ciepła, jednak wraz z oddaleniem od wlotu do kanału jego wartości maleją. Mieszanina cieczy i pary, przepływająca wzdłuż powierzchni grzejnej, posiada coraz mniejszą zawartość cieczy, a przy dominującej zawartości fazy parowej wymiana ciepła jest znacznie mniej intensywna. Podczas wrzenia rozwiniętego, współczynnik przejmowania ciepła osiąga coraz niższe wartości w końcowej części kanału (na wylocie). Podczas zmniejszania strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej, któremu towarzyszy zmiana mechanizmów wymiany ciepła z wrzenia do konwekcji jednofazowej, wartości współczynnika przejmowania ciepła znów przyjmują niskie wartości, zbliżone do początkowych w serii pomiarowej.

Przedstawiona na rysunku 5.12 zależność współczynnika przejmowania ciepła od gęstości strumienia,  $\alpha = \alpha(q_w)$ , potwierdza opisane wyżej mechanizmy transportu ciepła.

Płaski przebieg krzywej na odcinku **A-BI** oraz niskie wartości współczynnika przejmowania ciepła wskazują, że w tym obszarze wymiana ciepła odbywa się na drodze konwekcji. Główny opór cieplny stanowi laminarna warstwa przyścienna przy powierzchni grzejnej, w której transport ciepła realizowany jest na drodze przewodzenia. Odcinek **BI-C**<sub>1</sub>, wskazuje na gwałtowny przyrost współczynnika przejmowania ciepła, który jest skutkiem spontanicznej nukleacji pęcherzyków pary. Jak podano wcześniej, spełniają one rolę wewnętrznych upustów ciepła, turbulizują termiczną warstwę przyścienną, powodując zmniejszenie jej oporu cieplnego. Zmiana wartości współczynnika przejmowania ciepła od  $\alpha_{BI}$  do  $\alpha_{CI}$ , odpowiada, obserwowanemu na obrazach rozkładu temperatury powierzchni grzejnej, *frontowi wrzenia* (przeskok zaznaczony na rys. 5.12b linią przerywaną). Na odcinku **C**<sub>1</sub>-**C**<sub>2</sub> krzywej, wraz ze wzrostem gęstości strumienia ciepła, obserwowany jest stopniowy wzrost wartości współczynnika przejmowania ciepła obserwowana jest na odcinku **C**<sub>2</sub>-**C**<sub>3</sub> i towarzyszy ona przejściu wrzenia przechłodzonego we wrzenie nasycone (przeskok zaznaczony na rys. 5.12a linią przerywaną). Na odcinku **C**<sub>3</sub>-**C**<sub>4</sub>-**D** krzywej, wraz ze wzrostem gęstości strumienia ciepła, obserwowany jest silny spadek wartości współczynnika przejmowania ciepła, postępujący wraz ze wzrostem udziału fazy parowej w mieszaninie. Zmniejszaniu gęstości strumienia ciepła odpowiada niewielka zmiana wartości współczynnika przejmowania ciepła postępująca wzdłuż tej samej krzywej **D-C**<sub>4</sub>. Dalszemu zmniejszaniu strumienia ciepła towarzyszy zanik przegrzania powierzchni grzejnej, a zatem wygaszenie procesu wrzenia i powrót do konwekcji, któremu towarzyszy zasadnicze zmniejszenie wartości współczynnika przejmowania ciepła. Współczynnik uzyskuje wartości zbliżone do wstępnie wyznaczonych dla konwekcji, przy czym zmiana współczynnika następuje wzdłuż odcinka  $C_2$ - $C_1$ . Dalsza obserwacja przebiegu zależności jest niemożliwa, gdyż nie jest możliwy pomiar temperatury powierzchni za pomocą termografii ciekłokrystalicznej (temperatury poza zakresem pasma aktywnego ciekłych kryształów).



**Rys. 5.12.** Zależność współczynnika przejmowania ciepła funkcji gęstości strumienia ciepła dla punktu w odległości 0,254 m od wlotu do kanału: a) cały zakres danych, b) powiększony fragment wykresu w zakresie inicjacji wrzenia, seria 25; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.2

## 5.2.6. Krzywe wrzenia

Krzywe wrzenia dla kanałów konwencjonalnych sporządza się tradycyjnie w układzie: gęstość strumienia ciepła w funkcji przegrzania powierzchni grzejnej. Dla wrzenia w przepływie krzywe są konstruowane dla wybranego punktu w kanale, na podstawie danych uzyskanych podczas zwiększania i zmniejszania strumienia ciepła doprowadzanego do powierzchni grzejnej.

Przeprowadzone eksperymenty charakteryzuje występowanie dużego (rzędu kilkudziesięciu stopni) niedogrzania cieczy do temperatury nasycenia na włocie do kanału. Przy zwiększaniu strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej (w granicach  $20 \div 35 \text{ kW/m}^2$ ) pojawia się na wylocie z kanału wrzenie rozwinięte, jednak w części wlotowej nadal często ma jeszcze miejsce wrzenie przechłodzone. Temperatura przegrzanej warstwy przyściennej jest znacznie wyższa od temperatury cieczy w rdzeniu, ale średnia temperatura płynu jest niższa od temperatury saturacji. Stosowanie zatem różnicy temperatury  $(T_F - T_{sat})$  prowadziłoby do nieprawdziwego wniosku o braku przegrzania powierzchni w stosunku do średniej temperatury płynu. W rozważanym przypadku, pęcherzyk pary, generowany na powierzchni grzejnej, kondensuje jednocześnie intensywnie w rdzeniu przepływu, na skutek niskiej temperatury płynu. Staje się on zatem bardzo aktywnym upustem ciepła, co powoduje znaczący spadek temperatury powierzchni grzejnej, poniżej lokalnej temperatury nasycenia płynu. Dla takich przypadków, krzywa sporządzona w klasycznym układzie  $q_w = f(\Delta T_{sat})$  nie oddaje charakteru procesów wymiany ciepła. Z tego powodu zdecydowano, aby większość krzywych wrzenia konstruować w postaci zależności gęstości strumienia ciepła w funkcji  $\Delta T_f$ , czyli różnicy temperatury powierzchni grzejnej i średniej temperatury płynu w kanale  $(T_F - T_f)$ , co jest powszechne w literaturze dla zagadnień wrzenia podczas przepływu w kanałach o małych wymiarach.

Typową krzywą wrzenia sporządzoną dla wybranego przekroju pokazano na rysunku 5.13a, a następnie przeanalizowano warunki wymiany ciepła podczas przepływu płynu w kanale. Dane eksperymentalne aproksymowano liniowo, co zaznaczono na wykresach linią ciągłą. Celem podkreślenia ciągłości pomiarów, linią przerywaną łączono punkty charakterystyczne dla uskoku temperatury, właściwe wystąpieniu zjawiska zerowego kryzysu wrzenia.

Początkowo niedogrzana ciecz wpływa do kanału, którego jedna powierzchnia jest równomiernie ogrzewana. Podczas całej serii na stałym poziomie utrzymywany jest przepływ laminarny płynu (maksymalna liczba Reynoldsa – około 1000). Dla stałej gęstości strumienia ciepła (punkt **A** – punkt **BI**) wymiana ciepła, pomiędzy folią grzejną i cieczą, odbywa się na drodze jednofazowej konwekcji wymuszonej. Jak wspomniano, w warstwie przyściennej przy folii, ciecz ulega przegrzaniu, natomiast w rdzeniu przepływu i przy powierzchni szyby pozostaje niedogrzana. Należy nadmienić, że przebieg odcinka **A-BI** krzywej wrzenia często następuje dla wzrastającego strumienia ciepła, jak wynika to z rysunków D.7 i D.8a-c w załączniku D.



**Rys. 5.13.***a)* Krzywa wrzenia o typowym przebiegu, sporządzona w odległości 0,183 m od wlotu do kanału, b) zależność ciśnienia na wlocie w funkcji gęstości strumienia ciepła; seria 25; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.2

Zwiększanie gestości strumienia ciepła powoduje aktywizację zarodków pary na powierzchni grzejnej kanału. Inicjacja wrzenia następuje spontanicznie w punkcie BI (początek wrzenia pecherzykowego). Na rysunku 5.13a dane przedstawiono w układzie jednowymiarowym, sporządzanym w osi kanału, jednak analizując rozkład temperatury powierzchni grzejnej w układzie trójwymiarowym z uwzględnieniem zmian następujących na całej szerokości folii takich punktów jest wiele i położone są na linii frontu wrzenia. Spontaniczna nukleacja powoduje uskok temperatury powierzchni grzejnej, dla zwiększającej się gęstości strumienia ciepła, widoczny jako przeskok od punktu BI do punktu C. Inicjacji wrzenia towarzyszą silne fluktuacje ciśnienia, które prezentują dane na rysunku 5.13b (zaznaczono punkty dotyczące obszaru inicjącji wrzenia). Dalszy wzrost strumienia ciepła prowadzi do rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego – odcinek C-D. Skokowe obniżenie temperatury powierzchni grzejnej spowodowane jest przez pęcherzyki pary, powstające spontanicznie w warstwie przyściennej, które spełniają rolę wewnętrznych upustów ciepła, absorbujących znaczna cześć energii przekazywanej do cieczy [Bilicki, 1997; Bohdal, 2001a,b; Piasecka i Poniewski, 2004a,b,c; Piasecka i inni, 2004; Piasecka, 2010a, 2012a,b,c 2013a,c; Piasecka i Maciejewska, 2012b, 2013b]. Z kolei zmniejszanie strumienia ciepła powoduje podobny przebieg krzywych wrzenia – odcinek **D-C**, następujące w kierunku przeciwnym.

Wzdłuż linii C-D zmienia się charakter wrzenia i wrzenie przechłodzone stopniowo przechodzi w rozwinięte wrzenie pęcherzykowe, a ciecz osiąga temperaturę nasycenia. Wzrost gęstości strumienia ciepła powoduje zwiększenie zawartości fazy parowej w mieszaninie dwufazowej, co skutkuje wzrostem i kolejnymi silnymi fluktuacjami ciśnienia (rys. 5.13b). Objętość właściwa pary jest o trzy rzedy większa od objętości właściwej cieczy, co daje duży przyrost ciśnienia. Prawdopodobnie wzrostowi zawartości fazy parowej w mieszaninie towarzyszy zmiana charakteru przepływu płynu w kanale, z laminarnego w turbulentny. Zjawisko histerezy ujawnia się przy zmniejszaniu strumienia ciepła, odcinek D-C, aż do wygaszenia procesu wrzenia poniżej punktu C (obszar niewidoczny w eksperymencie, poza zakresem czułości zastosowanych ciekłych kryształów). Oznacza to, że dezaktywacja ośrodków nukleacji następuje w sposób ciągły, w funkcji malejącego przegrzania powierzchni. Stopniowe obniżanie gęstości strumienia ciepła (wzdłuż linii D-C), powoduje, że proces wrzenia zanika najpierw na początku kanału i "wygaszanie" wrzenia przesuwa się w kierunku zgodnym z przepływem cieczy. Obrazuje to zakończenie procesu wrzenia i powrót do jednofazowej, konwekcyjnej wymiany ciepła na całej ogrzewanej długości kanału.



**Rys. 5.14.** Krzywa wrzenia o nietypowym przebiegu, sporządzona dla punktu w odległości 0,095 m od włotu do kanału, seria 24, fluorinert FC-72, kanał pionowy, położenie 90°, miniwglębienia na całej powierzchni folii, parametry eksperymentalne:  $G = 286 \text{ kg/(m^2s)}$ ,  $p_{in} = 122 \text{ kPa}$ ,  $\Delta T_{sub} = 43 \text{ K}$ 

Przedstawioną na rysunku 5.14 krzywą wrzenia sporządzono dla ustawionego pionowo kanału (położenie 90°), przy zbliżonych parametrach eksperymentalnych do wyników eksperymentu omówionego powyżej (ustawienie poziome, położenie 0°). Wykazuje ona odmienny przebieg w obszarze rozwiniętego wrzenia pęcherzy-kowego, w porównaniu do wcześniej pokazanego na rysunku 5.13a. Część krzywej, odpowiadająca zmniejszaniu strumienia ciepła, nie pokrywa się z odcinkiem podczas jego zwiększania, a *histereza nukleacji* ma kilkustopniowy *krokowy* prze-

bieg. Zaobserwowane zjawisko odpowiada *histerezie II rodzaju*, charakterystycznej dla wrzenia pęcherzykowego w dużej objętości, dla pokryć kapilarnoporowatych, metalowych włóknistych, uzyskiwanych techniką natrysku plazmowego. Podobny przebieg histerezy uwidocznił się w badaniach wrzenia w dużej objętości, wykonanych dla mikropowierzchni Gewa-T, High-Flux oraz pokryć porowatych z miedzianych proszków spiekanych [Poniewski i Thome, 2008]. Oba zjawiska – *histerezy II rodzaju* i *krokowej histerezy nukleacji* – występują we wrzeniu w dużej objętości dla cieczy o małym kącie zwilżania, jak czynniki chłodnicze. W obu przypadkach, dla wrzenia pęcherzykowego, wzrost przegrzania powierzchni grzejnej podczas zwiększania strumienia ciepła realizowany jest przy mniejszych gęstościach strumienia ciepła – odcinek C-D, niż przy jego zmniejszaniu – odcinek D-E. Nietypowe krzywe wrzenia o krokowym przebiegu otrzymywano zwykle dla wrzenia przechłodzonego.

Wyniki badań własnych potwierdzają wyniki innych badaczy. W pracach [Chin, 1997; Dutkowski, 2011; Baldassari i inni, 2012] można odnaleźć krzywe wrzenia o przebiegu nietypowym, z kilkustopniową *histerezą nukleacji*.

Przykładowe krzywe wrzenia z wybranych serii pomiarowych, przy zastosowaniu analizowanych rozwiniętych powierzchni grzejnych, otrzymane przy różnych ustawieniach kanału, pokazano na rysunkach D.5÷D.8a-e w załączniku D. Krzywe wrzenia o typowym przebiegu można zaobserwować na rysunkach D.5 i D.6.

Na rysunku D.6 przedstawiono krzywe wrzenia jako zależność gęstości strumienia ciepła w funkcji różnicy temperatury powierzchni grzejnej i średniej temperatury płynu (rys. D.6a,c,e) oraz w funkcji różnicy temperatury powierzchni grzejnej i temperatury nasycenia (rys. D.6b,d,f). Sporządzono je dla przekroju położonego blisko wylotu z kanału, gdzie osiągane jest wrzenie nasycone. Krzywe wrzenia o nietypowym przebiegu zamieszczono m.in. na rysunkach D.7 i D.8. Dwie krzywe, pokazane na rysunkach D.8f,g, sporządzono dla pionowo ustawionego kanału z folią dwustronnie gładką.

Analizując przebieg krzywych wrzenia otrzymanych dla eksperymentów wykonanych przy zbliżonych parametrach cieplno-przepływowych, z wykorzystaniem gładkiej i jednostronnie rozwiniętej powierzchni grzejnej, stwierdzono, że inicjacja i rozwój wrzenia przy zastosowaniu powierzchni rozwiniętej następuje przy zdecydowanie niższych (do 30%) strumieniach ciepła dostarczanych do powierzchni grzejnej, w porównaniu do wyników dla folii gładkiej [Piasecka, 2013a,c,d].

## 5.2.7. Mapy i struktury przepływu dwufazowego

W rozdziale 4 (punkt 4.5.6) przedstawiono procedurę opracowania obrazów struktur przepływu dwufazowego. Do analizy przyjęto wybrane pomiary następujących serii pomiarowych (tabela C.1, zał. C):

 a) dla kanału ustawionego poziomo (położenie 0°) i pionowo (położenie 90°), przy zastosowaniu powierzchni rozwiniętej na całej powierzchni folii, z miniwgłębieniami wytworzonymi metodą elektroerozji – serie 24 i 25; b) dla kanału ustawionego poziomo (położenie 180°), przy zastosowaniu powierzchni rozwiniętej na całej powierzchni folii, z mikrowgłębieniami uzyskanymi teksturowaniem laserowym – seria 38.

Pomiary stopnia zapełnienia prowadzone są dla czterech przekrojów (patrz: rys. 4.10). Powiększone obrazy wycinków wraz z przekrojami zbinaryzowanymi (obrazy czarno-białe) przyjętymi do analizy w programie *Techsystem Globe*, dla wybranych pomiarów (podczas zwiększania strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej) pokazano na następujących rysunkach [Piasecka, 2013d]:

- a) rysunek 5.15 dane dla kanału poziomego, położenie 0°, seria 25;
- b) rysunek 5.16 dane dla kanału pionowego, położenie 90°, seria 24;
- c) rysunek 5.17 dane dla kanału poziomego, położenie 180°, seria 38.



\* temperatura nieznana - poza pasmem aktywnym ciekłych kryształów

**Rys. 5.15.** Zbinaryzowane obrazy wybranych przekrojów struktur przepływu dwufazowego, czarny kolor odpowiada fazie ciekłej, biały – parze; fluorinert FC-72, kanał poziomy, położenie 0°, miniwglębienia na całej powierzchni folii, obrazy dla pomiarów nr: 7, 12, 18, 23, seria 25, parametry eksperymentalne:  $G = 285 \text{ kg/(m}^2 s)$ ,  $p_{in} = 120 \text{ kPa}$ ,  $\Delta T_{sub} = 44 \text{ K}$ 



\* temperatura nieznana - poza pasmem aktywnym ciekłych kryształów

**Rys. 5.16.** Zbinaryzowane obrazy wybranych przekrojów struktur przepływu dwufazowego, czarny kolor odpowiada fazie ciekłej, biały – parze; fluorinert FC-72, kanał pionowy, położenie 90°, miniwgłębienia na całej powierzchni folii, obrazy dla pomiarów nr: 6, 10, 12, 16, 18, 22, 24, 28, 30, 33, seria 24; parametry eksperymentalne:  $G = 286 \text{ kg/(m}^2 \text{s})$ ,  $p_{in} = 122 \text{ kPa}$ ,  $\Delta T_{sub} = 43 \text{ K}$ 



**Rys. 5.17.** Zbinaryzowane obrazy wybranych przekrojów struktur przepływu dwufazowego, czarny kolor odpowiada fazie ciekłej, biały – parze; fluorinert FC-72, kanał poziomy, położenie 180°, mikrowglębienia na całej powierzchni folii, obrazy dla pomiarów nr: 4, 10, 16, 22, 28, 34, seria 38; parametry eksperymentalne:  $G = 137 \text{ kg/(m^2s)}, p_{in} = 120 \text{ kPa}, \Delta T_{sub} = 37 \text{ K}$ 

Obrazy rozkładu temperatury powierzchni grzejnej oraz obrazy struktur przepływu dwufazowego dla serii 25 pokazano w rozdziale 4 (rys. 4.9a,b), dane dla serii 24 – na rysunku D.9 oraz dla serii 38 – na rysunku D.10, w załączniku D. Obrazy wymienionych pomiarów serii (obrazy termograficzne gładkiej strony folii grzejnej, odpowiadające im obrazy struktur przepływu w skali szarości oraz powiększone wycinki wybranych przekrojów: termografu oraz obrazu struktur w skali szarości i czarno-białym – zbinaryzowanym) dla wymienionych serii pokazano na rysunkach D11, D.12 i D.13.

Zależność stopnia zapełnienia i stopnia suchości w funkcji odległości od wlotu do kanału, dla wybranych pomiarów serii, przyjętych do analizy, dla pomiarów nr: 6, 10, 12, 16, 18, 22, 24, 28, 30, 33, seria 24 [Piasecka, 2013d], pokazano na następujących rysunkach:

- a) rysunek 5.18 dane dla kanału pionowego, położenie 90°, seria 24;
- b) rysunek 5.19 dane dla kanału poziomego, położenie 180°, seria 38;
- c) rysunek D.14, załącznik D dane dla kanału poziomego, położenie 0°, seria 25.

Analizując przebieg wykresów stwierdzono, że wyniki otrzymane dla kanału poziomego, położenie 0°, są zbliżone do danych dla kanału pionowego, natomiast różnią się zasadniczo od danych uzyskanych dla kanału poziomego, położenie 180°, osiągających znacznie wyższe wartości, na wylocie z kanału – maksymalne (~100%). Tak duże rozbieżności wynikają z charakteru zarejestrowanych struktur przepływu, różniących się zasadniczo dla tych położeń kanału.



**Rys. 5.18.** Zależność: a) stopnia zapełnienia, b) stopnia suchości w funkcji odległości; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.16



**Rys. 5.19.** Zależność: a) stopnia zapełnienia, b) stopnia suchości w funkcji odległości od wlotu do kanału, dla pomiarów nr: 4, 10, 16, 22, 28, 34, seria 38; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.17

Należy wspomnieć, że w procedurze obliczeniowej eksperymentalnie wyznaczanego stopnia suchości, przyjmuje się dane dotyczące powierzchni zajmowanej przez każdą z faz (ciecz i parę). Z powodu niewielkiej głębokości kanału pominięto zakrzywienie pęcherzyków w kierunku normalnym do powierzchni folii grzejnej, czyli dla głębokości kanału (zagadnienie omówiono w punkcie C, rozdz. 4). Tak wyznaczany – z powierzchni przekroju – stopień zapełnienia może się różnić od wyznaczanego objętościowo [Thome, 2004].

Rysunek 5.20 [Piasecka, 2013d] prezentuje zaobserwowane rodzaje struktur przepływu dwufazowego, przy czym na rysunkach 5.20a,b,c,d zaznaczono zmierzone wymiary charakterystycznych struktur. Dla struktur pokazanych na rysunkach 5.20e,f nie był możliwy pomiar charakterystycznych wymiarów, ze względu na słabo rozpoznawalną granicę pomiędzy strukturami.



**Rys. 5.20.** Zaobserwowane rodzaje struktur przepływu: a) pęcherzykowy, b) pęcherzykowokorkowy, c) korkowy, d),e) korkowo-mgłowy, f) mgłowy

W wyniku analizy obrazów struktur przepływu wyróżniono następujące ich rodzaje:

- a) pęcherzykowy obserwowane są drobne pęcherzyki pary, niewielkich rozmiarów, posiadające kształt kulisty, w przekroju o średnicy do ok. 5 mm, rysunek 5.20a;
- b) pęcherzykowo-korkowy niewielkie pęcherzyki łączą się w większe, nierównomierne aglomeraty (długości rzędu kilkunastu mm), pomiędzy nimi występują drobne kuliste pęcherzyki pary struktury pęcherzykowej, rysunek 5.20b;
- c) korkowy powstałe aglomeraty łączą się w większe nieregularne struktury, które zajmują dużą szerokość kanału (do ok. 3/4 szerokości kanału – 30 mm), rysunek 5.20c;
- korkowo-mgłowy duże aglomeraty w większości połączone ze sobą, zajmujące niemal całą szerokość kanału; zaobserwowano dwa rodzaje tej struktury, rysunek 5.20d,e:
  - struktura na rysunku 5.20d dostrzegalne są pęcherzyki pary o bardzo małych wymiarach i nieregularnych kształtach lub drobinki cieczy w mgle;
  - struktura na rysunku 5.20e obserwuje się przesuwające się "korki parowe", wśród których nie dostrzega się drobnych pęcherzyków;
- e) mgłowy obserwowane drobinki cieczy w postaci mgły w parze, rysunek 5.20f.

Dla poziomego ustawienia kanału, położenie 0° i pionowego ustawienia kanału, położenie 90°, obserwowane są następujące struktury przepływu: pęcherzykowy, pęcherzykowo-korkowy, korkowy i korkowo-mgłowy. Dla poziomego ustawienia kanału, położenie 180°, oprócz wymienionych struktur, zaobserwowano ponadto strukturę mgłową. Struktura korkowo-mgłowa wykazuje odmienny wygląd i charakter w zależności od ustawienia kanału.

Na rysunkach 5.20d,e pokazano dwa charakterystyczne zdjęcia tej struktury, przy czym rysunek 5.20d przedstawia typowy wygląd struktury dla ustawienia poziomego kanału, a 5.20e – dla ustawienia pionowego. Wpływ orientacji przestrzennej kanału oraz zastosowanych powierzchni grzejnych na powstające struktury przepływu dwufazowego omówiono szczegółowo w punkcie 5.4.4 pracy.

Na kolejnych trzech rysunkach (rys. 5.21÷5.23) [Piasecka, 2013d], pokazano kolejno mapy struktur przepływu oraz zależności stopnia zapełnienia od stopnia suchości, uzyskanych dla wybranych serii eksperymentalnych z ustawieniem:

- a) poziomym kanału, położenie 0°, serie: 21, 25, 39 rysunek 5.21;
- b) pionowym kanału, położenie 90°, serie: 13, 23, 24, 26 rysunek 5.22;
- c) poziomym kanału, położenie 180°, serie: 14, 38 rysunek 5.23.



**Rys. 5.21.***a)* Mapa struktur przepływu: zależność pozornej prędkości cieczy w funkcji pozornej prędkości pary, b) zależność stopnia zapełnienia w funkcji stopnia suchości; kanał ustawiony poziomo, położenie 0°, serie: 21, 25, 39; parametry eksperymentalne serii podano poniżej w tekście rozdziału



**Rys. 5.22.***a)* Mapa struktur przepływu: zależność pozornej prędkości cieczy w funkcji pozornej prędkości pary, b) zależność stopnia zapełnienia w funkcji stopnia suchości; kanał ustawiony pionowo, położenie 90°, serie: 13, 23, 24, 26; parametry eksperymentalne serii podano poniżej w tekście rozdziału



**Rys. 5.23.***a)* Mapa struktur przepływu: zależność pozornej prędkości cieczy w funkcji pozornej prędkości pary, b) zależność stopnia zapełnienia w funkcji stopnia suchości; kanał ustawiony poziomo, położenie 180°, serie: 14, 38; parametry eksperymentalne serii podano poniżej w tekście rozdziału

W załączniku D przedstawiono obrazy rozkładu temperatury powierzchni grzejnej, obrazy struktur przepływu dwufazowego oraz powiększone obrazy wycinków wraz z przekrojami zbinaryzowanymi (obrazy czarno-białe) przyjętymi do analizy w programie *Techsystem Globe*, dla wybranych pomiarów podczas zwiększania strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej dla wymienionych, przyjętych do analizy serii pomiarowych, których danych nie przedstawiono wcześniej w pracy. Kolejno są to:

a) seria 21 – rysunki D.15 i D.16, fluorinert FC-72, kanał poziomy, położenie 0°, mikrowgłębienia na całej powierzchni folii, teksturowanie laserowe 1, parametry eksperymentalne:  $G = 286 \text{ kg/(m}^2\text{s}), p_{in} = 116,5 \text{ kPa}, \Delta T_{sub} = 42 \text{ K};$ 

- b) seria 39 rysunki D.17 i D.18, fluorinert FC-72, kanał poziomy, położenie 0°, mikrowgłębienia na całej powierzchni folii, teksturowanie laserowe 1, parametry eksperymentalne:  $G = 138 \text{ kg/(m^2s)}, p_{in} = 120 \text{ kPa}, \Delta T_{sub} = 40 \text{ K};$
- c) seria 13 rysunki D.19 i D.20, fluorinert FC-72, kanał poziomy, położenie 0°, mikrowgłębienia na wycinku powierzchni folii, teksturowanie laserowe 1, parametry eksperymentalne:  $G = 240 \text{ kg/(m^2s)}, p_{in} = 124 \text{ kPa}, \Delta T_{sub} = 48 \text{ K};$
- d) seria 23 rysunek D.21, fluorinert FC-72, kanał pionowy, położenie 90°, miniwgłębienia na całej powierzchni folii, teksturowanie elektroerozyjne, parametry eksperymentalne:  $G = 286 \text{ kg/(m^2s)}, p_{in} = 122,5 \text{ kPa}, \Delta T_{sub} = 42 \text{ K};$
- e) seria 26 rysunki D.22 i D.23, fluorinert FC-72, kanał pionowy, położenie 90°, mikrowgłębienia na wycinku powierzchni folii, teksturowanie laserowe 3, parametry eksperymentalne:  $G = 237 \text{ kg/(m^2s)}$ ,  $p_{in} = 132 \text{ kPa}$ ,  $\Delta T_{sub} = 45 \text{ K}$ ;
- f) seria 14 rysunki D.24 i D.25, fluorinert FC-72, kanał poziomy, położenie 180°, mikrowgłębienia na wycinku powierzchni folii, teksturowanie laserowe 1, parametry eksperymentalne:  $G = 240 \text{ kg/(m}^2\text{s}), p_{in} = 122 \text{ kPa}, \Delta T_{sub} = 47 \text{ K}.$

Parametry eksperymentalne dla serii 25 podano w opisie rysunku 5.15, serii 24 – w opisie rysunku 5.16 i serii 38 – w opisie rysunku 5.17.

Na rysunku 5.24 pokazano zależność strumienia masy w funkcji stopnia suchości, otrzymanego na podstawie eksperymentalnie wyznaczonego stopnia zapełnienia dla kanału ustawionego pionowo oraz poziomo, położenia 0° i 180°.



**Rys. 5.24.** Zależność strumienia masy w funkcji stopnia suchości otrzymanego na podstawie eksperymentalnie wyznaczonego stopnia zapełnienia; dane dla kanału ustawionego pionowo 90° (seria 24) oraz poziomo 0° (seria 25) i 180° (seria 38) [Piasecka, 2013d]; parametry eksperymentalne serii podano powyżej w tekście rozdziału
Na rysunku 5.24 zaznaczono występowanie poszczególnych struktur, nie stosując rozdziału ze względu na orientację przestrzenną kanału. Analizowane dane pochodzą z następujących serii pomiarowych: przy ustawieniu poziomym, położenie 0° i pionowym, położenie 90° modułu, z wykorzystaniem folii rozwiniętej z miniwgłębieniami wykonanymi metodą elektroerozji (serie 24 i 25) oraz przy ustawieniu poziomym, położenie 180° modułu, z wykorzystaniem folii rozwiniętej z mikrowgłębieniami, wykonanymi teksturowaniem laserowym (seria 38).

### 5.3. WYNIKI BADAŃ OPORU PRZEPŁYWU DWUFAZOWEGO

### 5.3.1. Wyniki badań oporu przepływu dla kanału pionowego

Analizę przeprowadzono na podstawie wybranej serii pomiarowej z wykorzystaniem rozwiniętej powierzchni folii grzejnej z mikrowgłębieniami wykonanymi na zadanym odcinku techniką laserową – teksturowanie 3, podczas gdy moduł pomiarowy ustawiony był pionowo (seria 26). Na rysunku 5.25 [Piasecka, 2014c] przedstawiono zależność całkowitego spadku ciśnienia na długość kanału w funkcji gęstości strumienia ciepła. Dane te pokazano, aby podkreślić występujące podczas pomiarów fluktuacje ciśnienia.



**Rys. 5.25.** Zależność całkowitego spadku ciśnienia, zmierzonego podczas eksperymentu, w funkcji gęstości strumienia ciepła, kanał ustawiony pionowo; seria 26

Na podstawie wyznaczonego eksperymentalnie stopnia zapełnienia obliczono stopień suchości  $X_{exp}$ , korzystając z zależności (4.13). W miejsce termodynamicznego stopnia suchości  $X_{th}$  w równaniach (4.22), (4.26), (4.31), (4.32) i (4.36) podstawiono stopnie suchości  $X_{exp}$ , a w równaniach (4.36) i (4.38) – również otrzymany eksperymentalnie stopień zapełnienia  $\varphi_{exp}$ , zgodnie z równaniem (4.12). Z całej serii 26, do rozważań wybrano pomiary w warunkach nasycenia. Obliczenia wykonano dla pomiarów nr 12, 15, 18 i 20. Zmierzony podczas badań spadek ciśnienia porównano z wyznaczonym teoretycznie przy wykorzystaniu modelu homogenicznego i rozdzielonego (omówione w punkcie 4.6 rozdziału 4). Rezultaty z eksperymentu i teoretycznych obliczeń przedstawiono na rysunku 5.26 [Piasecka, 2014c].



**Rys. 5.26.** Porównanie wyznaczonego eksperymentalnie całkowitego spadku ciśnienia na długości kanału z danymi otrzymanymi przy wykorzystaniu modeli teoretycznych (homogenicznego i rozdzielonego), kanał ustawiony pionowo, położenie 90°, seria 26, fluorinert FC-72, mikrowgłębienia na wycinku powierzchni folii, teksturowanie laserowe 3; parametry eksperymentalne:  $G = 237 \text{ kg/(m}^2\text{s})$ ,  $p_{in} = 132 \text{ kPa}$ ,  $\Delta T_{sub} = 45 \text{ K}$ 

Eksperymentalny oraz przewidywany teoretycznie przy wykorzystaniu modelu homogenicznego i rozdzielonego całkowity spadek ciśnienia na długości kanału w funkcji termodynamicznego stopnia suchości na wylocie z kanału pokazano na rysunku 5.27 [Piasecka, 2014c]. W obliczeniach spadku ciśnienia dwufazowego, zdefiniowanego równaniem (4.19), uwzględniono tarciowy oraz przyśpieszeniowy spadek ciśnienia. Dane otrzymane z modelu homogenicznego okazały się zdecydowanie wyższe niż otrzymane z modelu rozdzielonego. Należy podkreślić, że obliczenia przeprowadzono w oparciu o termodynamiczny równowagowy stopień suchości.



**Rys. 5.27.** Eksperymentalny oraz przewidywany teoretycznie całkowity spadek ciśnienia na długości kanału w funkcji termodynamicznego stopnia suchości na wylocie z kanału; kanał ustawiony pionowo, seria 26, parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.26

Na rysunku 5.28 przedstawiono zależność otrzymanego eksperymentalnie oraz wyznaczonego teoretycznie całkowitego spadku ciśnienia na długości kanału w funkcji stopnia suchości  $X_{exp}$  (wyznaczonego na drodze eksperymentalnej) [Piasecka, 2014c].



**Rys. 5.28.** Eksperymentalny oraz przewidywany teoretycznie całkowity spadek ciśnienia na długości kanału w funkcji stopnia suchości wyznaczonego na drodze eksperymentalnej, kanał ustawiony pionowo, seria 26; parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.26

Analizując wykres zależności pokazanych na rysunku 5.28 – uzyskanych eksperymentalnie i przewidywanych teoretycznie spadków ciśnienia w funkcji wyznaczonego na drodze eksperymentalnej stopnia suchości – można stwierdzić, że obliczenia z obu modeli teoretycznych, jak i dane eksperymentalne wykazują podobny przebieg. Wskazuje to na prawidłową procedurę obliczeniową i właściwe przeprowadzenie analizy obrazu struktur przepływu dwufazowego. W kolejnym punkcie porównano wyniki dla znacznie wyższych niż tu analizowane wartości eksperymentalnego stopnia suchości, który otrzymano dla jednego z położeń poziomych kanału.

## 5.3.2. Wyniki porównawczych badań oporu przepływu dla kanału pionowego i poziomych

Dane do analizy pochodzą z trzech wyselekcjonowanych serii pomiarowych przy różnym ustawieniu kanału:

a) przy ustawieniu poziomym 0° i pionowym 90° modułu, z wykorzystaniem folii rozwiniętej z miniwgłębieniami na całej powierzchni, wykonanymi metodą elektroerozji (seria 25 – pomiary 12, 18 i 23, parametry eksperymental-ne podano w opisie rys. 5.15; seria 24 – pomiary 10, 12, 16, 18, 22, 24, 28, 30 i 33, parametry eksperymentalne podano w opisie rys. 5.16);

b) przy ustawieniu poziomym 180° modułu, z wykorzystaniem folii rozwiniętej z mikrowgłębieniami na całej powierzchni, wykonanymi techniką laserową – teksturowanie 1 (seria 38 – pomiary 10, 16, 22, 28 i 34, fluorinert FC-72, parametry eksperymentalne podano w opisie rys. 5.17).

Do analizy przyjęto wymienione pomiary dla wrzenia nasyconego poszczególnych serii. W obliczeniach spadku ciśnienia dwufazowego uwzględniono wszystkie składniki równania (4.19), tj. tarciowy, przyśpieszeniowy oraz hydrostatyczny spadek ciśnienia. Otrzymany z eksperymentu spadek ciśnienia odniesiony do długości kanału porównano z wyznaczonym teoretycznie przy wykorzystaniu modelu homogenicznego i rozdzielonego. Obliczenia poprowadzono analogicznie jak dla kanału pionowego, podstawiając eksperymentalny stopień suchości w równaniach (4.22), (4.26), (4.31), (4.32) i (4.36) oraz otrzymany eksperymentalnie stopień zapełnienia w równaniach (4.36) i (4.38). Rezultaty z eksperymentu i teoretycznych obliczeń przedstawiono na rysunku 5.29.

Stwierdzono, że najwyższy spadek ciśnienia zarejestrowano dla pionowego ustawienia minikanału, 90°; dla poziomej orientacji kanału wystąpił znacznie niższy spadek ciśnienia, przy czym był on nieco wyższy dla ustawienia 180° w porównaniu do zarejestrowanego dla 0°, wyniki potwierdzają dane pokazane na rysunku 5.29 [Piasecka, 2013d].



**Rys. 5.29.** Porównanie wyznaczonego eksperymentalnie całkowitego spadku ciśnienia na długości kanału z danymi otrzymanymi przy wykorzystaniu modeli teoretycznych, dane dla kanału ustawionego pionowo, położenie 90° oraz poziomo, położenia 0° i 180°, parametry eksperymentalne podano w tekście

Stwierdzono, że jedynie dla kanału pionowego, położenie 90°, większość teoretycznie przewidywanych wyników mieści się w przedziale  $\pm 30\%$ . Około 1/3 danych otrzymanych przy ustawieniu poziomym kanału, położenie 180°, znajduje się poza przedziałem  $\pm 30\%$ . Analizując dane otrzymane z obliczeń teoretycznych dla kanału ustawionego poziomo, położenie 0° (wszystkie dane poza przedziałem  $\pm 30\%$ ), zaobserwowano znacznie wyższe przewidywane teoretycznie wartości całkowitego spadku ciśnienia w porównaniu do uzyskanych z eksperymentu.

Eksperymentalny oraz przewidywany teoretycznie całkowity spadek ciśnienia odniesiony do długości kanału w funkcji termodynamicznego stopnia suchości na wylocie z kanału, dla trzech analizowanych położeń kanału, pokazano na ry-sunku 5.30.





**Rys. 5.30.** Eksperymentalny oraz przewidywany teoretycznie całkowity spadek ciśnienia na długości kanału w funkcji termodynamicznego stopnia suchości na wylocie z kanału, dane dla kanału ustawionego: a) poziomo, położenie 0°, b) pionowo, położenie 90°, c) poziomo, położenie 180°; parametry eksperymentalne podano w tekście

Stwierdzono, że wyniki uzyskane z modeli teoretycznych osiągnęły zbliżone wartości dla kanału pionowego i poziomego, położenie 0°, przy czym dla kanału pionowego wyniki z eksperymentu różniły sie od nich nieznacznie. Niższe od wymienionych okazały się wyniki z eksperymentu, uzyskane dla kanału poziomego, położenie 0° oraz wartości uzyskane zarówno eksperymentalnie, jak i teoretycznie dla kanału poziomego, położenie 180°.

Otrzymany z eksperymentu oraz przewidywany teoretycznie całkowity spadek ciśnienia odniesiony do długości kanału w funkcji stopnia suchości, otrzymany na podstawie eksperymentalnie wyznaczonego stopnia zapełnienia, przedstawia rysunek 5.31 [Piasecka, 2013d].

Rysunek 5.31a dotyczy danych otrzymanych dla kanału ustawionego poziomo, położenie 0°, rysunek 5.31b – dla kanału ustawionego pionowo, a rysunek 5.31c – dla kanału ustawionego poziomo, położenie 180°.

Wartości stopnia suchości otrzymane na podstawie eksperymentalnie wyznaczonego stopnia zapełnienia dla danych kanału poziomego (położenie 0°) oraz pionowego (położenie 90°) są bardzo niewielkie, w stosunku do wyznaczonych termodynamicznych stopni suchości. Jedynie dla kanału poziomego (położenie 180°) uzyskane stopnie zapełnienia pochodzą z zakresu  $0 < X_{exp} < 1$ .



**Rys. 5.31.** Zależność całkowitego spadku ciśnienia na długości kanalu: eksperymentalnego i teoretycznego w funkcji stopnia suchości otrzymanego na podstawie eksperymentalnie wyznaczonego stopnia zapełnienia, dane dla kanału ustawionego pionowo oraz poziomo (położenia 0°i 180°); parametry eksperymentalne podano w tekście

Analizując dane stwierdzono, że otrzymane z zastosowania obu modeli teoretycznych wartości gradientu spadku ciśnienia przyjmują zbliżone wartości dla kanału pionowego i poziomego, położenie 0°. Całkowity spadek ciśnienia wyznaczony z modelu homogenicznego okazał się wyższy od otrzymanego z modelu rozdzielonego dla wszystkich analizowanych położeń, jednak największe różnice wartości wystąpiły dla kanału poziomego, położenie 180°.

# 5.4. WPŁYW RODZAJU POWIERZCHNI ROZWINIĘTEJ I POŁOŻENIA KANAŁU NA ROZWÓJ WRZENIA I OPORY PRZEPŁYWU

## 5.4.1. Wpływ rodzaju powierzchni rozwiniętej i położenia kanału na współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nasyconego

Analizując wyniki eksperymentów z wykorzystaniem czterech testowanych laserowych teksturowań na zadanym odcinku folii grzejnej stwierdzono, że najwyższe współczynniki przejmowania ciepła uzyskano dla teksturowania 1. Do dalszych rozważań zatem przyjęto eksperymenty z wykorzystaniem powierzchni teksturowanych laserowo 1 oraz uzyskanych na drodze elektroerozji, wytworzone na powierzchni folii grzejnej.



**Rys. 5.32.** Zależność współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, otrzymane przy zastosowaniu różnych powierzchni rozwiniętych i powierzchni gładkiej, dla zbliżonych parametrów cieplno-przepływowych

Na rysunku 5.32 zestawiono lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła, otrzymane dla zbliżonych parametrów eksperymentalnych badań (kanał o jednakowym przekroju ustawiony pionowo, położenie 90°, fluorinert FC-72, zbliżone wartości strumienia masy, ciśnienia na wlocie do kanału oraz gęstości

strumienia ciepła), w których zastosowano gładką powierzchnię grzejną oraz powierzchnie rozwinięte. Do analizy przejęto dane dotyczące obszaru wrzenia nasyconego. Zastosowanie powierzchni rozwiniętej dało wyższe wartości współczynnika przejmowania ciepła, od kilku do kilkudziesięciu procent (niemal dwukrotne dla najwyższych wartości współczynnika), w stosunku do powierzchni gładkiej. Analizując wyniki stwierdzono, że powierzchnie grzejne teksturowane laserowo, z mikrowgłębieniami rozmieszczonymi równomiernie, pozwoliły na uzyskanie wyższych wartości współczynnika przejmowania ciepła niż powierzchnie z rozmieszczonymi w sposób nieregularny mikrowgłębieniami. Zastosowanie powierzchni rozwiniętej na wycinku folii dało mniejszy wzrost współczynnika, w porównaniu do wykorzystania w badaniach teksturowania na całej powierzchni grzejnej.

Na możliwość uzyskiwania wyższych wartości współczynnika przejmowania ciepła przy wykorzystaniu powierzchni z mikrowgłębieniami, w porównaniu do powierzchni z miniwgłębieniami, wskazują dane dotyczące obszaru wrzenia nasyconego zestawione na rysunku 5.33. Dotyczą one poziomo ustawionego kanału, położenie 0°, uzyskano je przy zbliżonych parametrach badań eksperymentalnych.



**Rys. 5.33.** Zależność współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, otrzymane przy zastosowaniu powierzchni z mikrowglębieniami rozmieszczonymi regularnie oraz i miniwglębieniami rozmieszczonymi nieregularnie, dla zbliżonych parametrów cieplno-przepływowych

Wpływ orientacji kanału ustawianego pod różnym kątem do poziomu na wartość współczynnika przejmowania ciepła analizowano na podstawie danych pokazanych na rysunkach od D.26 do D.30 w załączniku D. Na wykresach przedstawiono dane z serii pomiarowych, w których stosowano rozwiniętą na całej powierzchni, metodą teksturowania laserowego 1 folię grzejną, przy czym moduł ustawiony w pięciu położeniach: 0°, 45°, 90°, 135° oraz 180°. Badania prowadzono przy zachowaniu zbliżonych parametrów cieplno-przepływowych, porównywano dane podczas rozwoju wrzenia. W celu poglądowym na rysunku 5.34 zestawiono zależność współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, otrzymane przy zastosowaniu powierzchni z mikrowgłębieniami rozmieszczonymi regularnie, przy jednakowej gęstości strumienia ciepła, dla trzech położeń kanału: 0°, 90° i 180°.



**Rys. 5.34.** Zależność współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, otrzymane przy zastosowaniu powierzchni z mikrowglębieniami, dla trzech położeń kanału: 0°, 90° i 180° przy jednakowej gęstości strumienia ciepła

Po analizie wymienionych danych stwierdzono, że najwyższe wartości współczynnika przejmowania ciepła zaobserwowano przy ustawieniu pionowym kanału 90° (seria 32, rys. 5.34 oraz rys. D.28), nieco niższe dla ustawień skośnych 135° (seria 36, rys. D.29) oraz 45° (seria 35, rys. D.27), a następnie dla ustawienia poziomego, położenie 0° (seria 34, rys. 5.34 oraz rys. D.30). Najniższe wartości lokalnego współczynnika przejmowania ciepła zaobserwowano dla ustawienia poziomego, położenie 180° (seria 33, rys. 5.34 oraz rys. D.26).

#### 5.4.2. Wpływ orientacji kanału na przebieg krzywych wrzenia

Do przeprowadzenia analizy wybrano serie pomiarowe z wykorzystaniem powierzchni teksturowanej laserowo 1. Dla każdej serii wykreślono po trzy krzywe wrzenia w układzie gęstość strumienia ciepła w funkcji różnicy temperatury powierzchni grzejnej i temperatury średniej płynu, w stałych odległościach od wlotu do kanału: 0,059 m; 0,103 m oraz 0,139 m. Obserwacja przebiegu eksperymentalnej krzywej wrzenia jest uzależniona od danych o temperaturze powierzchni. Krzywe wrzenia sporządza się w określonym przekroju kanału. Jeżeli w części eksperymentu nie jest możliwa detekcja temperatury na powierzchni, wówczas nie jest możliwe wykreślenie pełnej krzywej wrzenia, a jedynie jej fragment.



**Rys. 5.35.** Krzywe wrzenia dla serii 32, przy zastosowaniu powierzchni teksturowanej laserowo na całej długości, dla stałych odległości od wlotu: 0,059 m, 0,103 m i 0,139 m; kanał pionowy, położenie 90°; parametry eksperymentalne:  $G = 211 \text{ kg/(m^2s)}, p_{in} = 125 \text{ kPa}, \Delta T_{sub} = 42 \text{ K}$ 

Analizując przebiegi krzywych wrzenia, pokazane na rysunku 5.35 oraz na rysunku D.31 w załączniku D, zauważono, że przy pionowym ustawieniu kanału oraz położeniu poziomym 180° (płyn poniżej powierzchni grzejnej) wynikowy strumień ciepła dostarczany do powierzchni grzejnej okazał się znacznie wyższy, w porównaniu do wartości strumienia, zarejestrowanego dla kanału ustawionego pod kątem 45° do poziomu lub kanału poziomego, położenie 0° (płyn powyżej powierzchni grzejnej). Pozostałe wnioski są niejednoznaczne.

## 5.4.3. Wpływ rodzaju powierzchni rozwiniętej i położenia kanału na wyznaczone eksperymentalnie opory przepływu

Wyniki badań oporu przepływu dwufazowego w kanale przedstawiono w punkcie 5.3. W tej części monografii skoncentrowano się na analizie wpływu rodzaju powierzchni grzejnej i orientacji kanału na wyznaczony eksperymentalnie spadek ciśnienia, przeprowadzonej na podstawie zależności pokazanych na rysunkach 5.25, 5.36 oraz w dodatkowych seriach pomiarowych (rys. D.32, zał. D). Spadek ciśnienia w funkcji gęstości strumienia ciepła doprowadzonego do powierzchni grzejnej przedstawiono na rysunku 5.36 dla serii badań wykonanych z zastosowaniem powierzchni grzejnej teksturowanej laserowo 1, przy ustawieniu pionowym (seria 32) i poziomym kanału, położenie 180° (seria 33). Analizę przeprowadzono ponadto w oparciu o dodatkowe zależności uzyskane dla różnej orientacji przestrzennej modułu pomiarowego (sześć serii pomiarowych: 34, 35, 36, 37, 38 i 39), pokazanych na rysunku D.32 w załączniku D.



**Rys. 5.36.** Zależność eksperymentalnie wyznaczonego spadku ciśnienia w funkcji gęstości strumienia ciepła, mikrowgłębienia na całej powierzchni folii, dla serii: a) seria 32, kanał pionowy, położenie 90°,  $G = 211 \text{ kg/(m}^2 \text{s})$ ,  $p_{in} = 125 \text{ kPa oraz b}$  seria 33, kanał poziomy, położenie 180°,  $G = 213 \text{ kg/(m}^2 \text{s})$ ,  $p_{in} = 115 \text{ kPa}$ 

Analizując wyniki z serii przy wyższym strumieniu masy można wysnuć następujące spostrzeżenia:

- a) najwyższe opory przepływu odnotowano przy ustawieniu pionowym kanału, położenie 90° oraz położenia skośnego 135°, a nieco niższe dla położenia skośnego 45°; przy takim ustawieniu eksperyment prowadzono przy najwyższych strumieniach ciepła doprowadzanych do powierzchni grzejnej;
- b) najniższe opory przepływu odnotowano przy ustawieniu poziomym kanału: położenie 0° oraz położenie 180°. Dla położenia 180° (gdy powierzchnia grzejna znajdowała się nad płynem w kanale) inicjacja i rozwój wrzenia następował przy najwyższych strumieniach ciepła, doprowadzanych do powierzchni grzejnej.

Dane otrzymane przy niższym strumieniu masy wskazują, że opory przepływu zmieniają się w niewielkim stopniu wraz z ustawieniem kanału.

Nie zaobserwowano zdecydowanego wpływu zastosowanej powierzchni grzejnej na eksperymentalnie mierzony spadek ciśnienia, prawdopodobnym powodem jest fakt, że zastosowane powierzchnie grzejne nie wykazują dużych różnic rozwinięcia.

# 5.4.4. Wpływ rodzaju powierzchni rozwiniętej i położenia kanału na struktury przepływu dwufazowego

Największy wpływ na rodzaj powstających struktur przepływu dwufazowego wywiera orientacja przestrzenna kanału. W tabeli 5.1 przedstawiono reprezentatywne obrazy struktur przepływu dla wszystkich analizowanych ustawień kanału wraz z ich opisem [Piasecka, 2013d].

W każdym przypadku występowały następujące struktury przepływu: pęcherzykowa, pęcherzykowo-korkowa, korkowa i korkowo-mgłowa (omówione w punkcie 5.2.7). Struktura mgłowa występowała jedynie w eksperymentach, w których kanał ustawiony był poziomo w ten sposób, że płyn przepływał pod powierzchnią grzejną (kanał poziomy, położenie 180°). Struktura korkowomgłowa, w zależności od ustawienia kanału, wykazywała różny kształt powstających struktur. Pokazana na rysunku 5.20e i w środkowej kolumnie w tabeli 5.1 struktura jest charakterystyczna dla pionowego kanału, położenie 90°. Wówczas obserwowane są przesuwające się warstwy "korków parowych". Obraz struktury korkowo-mgłowej, obserwowany dla położeń poziomych kanału, pokazano na rysunku 5.20d i w kolumnach skrajnych tabeli 5.1. Granica między strukturami korkowymi jest wyraźnie dostrzegalna, występują pomiędzy nimi wyraźnie rozpoznawalne drobne pęcherzyki pary lub drobinki cieczy w mgle, a czasami tuż na powierzchni styku powierzchni grzejnej z bocznymi ściankami kanału występuje cienka warstwa cieczy (charakterystyczna dla struktury pierścieniowej, jednak typowego wyglądu struktury pierścieniowej nie zaobserwowano w badaniach).

Poziome ustawienie ka <b>położenie 0°</b> seria 25 $G=285 \text{ kg/(m}^2\text{s})$ $p_{in}=120 \text{ kPa}$ $q_w=30,37 \text{ kW/m}^2$	nału, Pionowe ustawie położenie seria 3 G=137 kg/u p <sub>in</sub> =116 k q <sub>w</sub> =16,26 k	nie kanału, 9 <b>0°</b> ? m <sup>2</sup> s) Pa V/m <sup>2</sup>	Poziome ustawienie kanału, <b>położenie 180°</b> seria 38 $G=137 \text{ kg/(m}^2\text{s})$ $p_{in}=120 \text{ kPa}$ $q_w=9,96 \text{ kW/m}^2$		
korkowo-mgłowa: słabo rozpoznawalna granica między fazą ciekłą i gazową, miejscami rozpoznane większe aglomeraty	korkowo-mgłowa: dość słabo rozpoznawalna granica między faza ciekłą i gazową, aglomeraty o niewielkich rozmiarach, przy samym wylocie	14	<b>mgłowa:</b> obserwowane drobinki cieczy w postaci mgły w parze		
korkowa: dominujące większe struktury o nierównomiernych kształtach	z kanad twoizące si tzw. korki parowe, przesuwające się równolegle względer siebie		<b>korkowo-mgłowa:</b> dobrze rozpoznawalna		
pęcherzykowo- korkowa:	korkowa: nieco większe struktury o stosunkowo równomiernych kształtach		granica między fazą ciekłą i gazową, aglomeraty bardzo dużych rozmiarach, miejscami występują drobne pęcherzyki		
w większe aglomeraty o nierównomiernych kształtach wśród których obserwowane są mniejsze pęcherzyki	pęcherzykowo- korkowa: małe pęcherzyki łączą się w nieco większe aglomeraty zwykle nadal kuliste		korkowa: dużo większe struktury o równomiernych kształtach, obejmujące często całą szerokość kanału	1.55 50 00 000	
<b>pęcherzykowa:</b> niewielkie drobne pęcherzyki, początkowo kuliste, pierścieniowe	<b>pęcherzykowa:</b> małe pęcherzyki kuliste, rozdrobnione dominująca struktur		pęcherzykowo- korkowa: małe pęcherzyki szybko łączą się w większe aglomeraty, zwykle kuliste pęcherzykowa: małe i większe pęcherzyki kuliste	·	

**TABELA 5.1.** Charakterystyka struktur przepływu dwufazowego dla położeń 0°, 90° i 180° kanału

Wpływ na charakter i wygląd struktur przepływu wywiera również rozwinięcie powierzchni grzejnej, zawsze powodując duże rozdrobnienie pęcherzyków pary. W porównaniu do struktur obserwowanych w eksperymentach z wykorzystaniem gładkiej folii grzejnej, uzyskiwane w niniejszych badaniach pęcherzyki są znacznie bardziej rozdrobnione.



**Rys. 5.37.** Obrazy struktur przepływu zarejestrowane dla wybranych serii pomiarowych z wykorzystaniem: a),b) folii z mikrowgłębieniami, c),d) folii z miniwgłębieniami; a),c) ustawienie poziome (położenie 0 ), b),d) ustawienie pionowe (położenie 90 )

Na rysunku 5.37 przedstawiono obrazy struktur przepływu, zarejestrowane dla dwóch serii pomiarowych o zbliżonych parametrach cieplno-przepływowych, w których wykorzystano kanał ustawiony w jednakowym położeniu: poziomo (położenie 0°) i pionowo (położenie 90°) [Piasecka, 2013d].

Obrazy na rysunku 5.37 oznaczone jako a) i b) otrzymano podczas eksperymentów, gdy powierzchnię grzejną stanowiła folia z mikrowgłębieniami, a jako c) i d) – folia z miniwgłębieniami. Stwierdzono, że uformowane struktury przepływu wykazują zbliżony kształt dla obu rodzajów zastosowanego rozwinięcia powierzchni folii, jednakże bardziej rozdrobnione struktury występują podczas eksperymentów z wykorzystaniem folii z miniwgłębieniami.

# 5.5. WPŁYW WYBRANYCH PARAMETRÓW CIEPLNO-PRZEPŁYWOWYCH I GEOMETRYCZNYCH NA ROZWÓJ WRZENIA

### 5.5.1. Wpływ ciśnienia wlotowego na rozwój wrzenia

Analizę przeprowadzono na podstawie serii pomiarowych z FC-72 jako czynnikiem roboczym oraz R-11 i R-123, wykorzystywanych w badaniach realizowanych na stanowiskach starszej konstrukcji, dla kanału o głębokości 0,7÷1,5 mm, przy zastosowaniu powierzchni grzejnej gładkiej i rozwiniętej. Na każdy analizowany zespół serii składają się eksperymenty wykonane przy różnych ciśnieniach na wlocie do kanału, jednakowym strumieniu masy w kanale i tej samej orientacji przestrzennej kanału. Na podstawie analizy wyników badań doświadczalnych stwierdzono, że przy jednakowym strumieniu masy i ciśnieniu w kanale, zadawana zmiana wielkości niedogrzania cieczy do temperatury nasycenia na wlocie ( $\Delta T_{sub} = 28\div67$ , fluorinert FC-72) nie wpływała znacząco na proces rozwoju wrzenia w kanale.

W analizie wykorzystano dane uzyskane dla folii gładkiej, otrzymane na drodze eksperymentów wykonanych na stanowisku poprzedniej konstrukcji. Badania te były prowadzone w znacznie większym zakresie zmian ciśnienia w instalacji przepływowej i strumienia masy przepływu płynu chłodniczego (w badaniach wykorzystano płyny chłodnicze: R-11, R-123 i FC-72), w porównaniu do opisywanych badań z wykorzystaniem powierzchni rozwiniętej.

Analiza danych doprowadziła do następujących spostrzeżeń:

- a) wraz ze wzrostem ciśnienia na wlocie do kanału:
  - wzrasta uskok temperatury powierzchni grzejnej, towarzyszący histerezie nukleacji, przy czym wzrost ciśnienia w kanale nie powoduje, aby przesuwający się front wrzenia obserwowany był na zmiennej długości kanału [Piasecka i Poniewski, 2004c], spostrzeżenie ilustrują dane pokazane na rysunku 5.38, będące wynikiem eksperymentów realizowanych z wykorzystaniem starszej konstrukcji modułu, dla pionowego minikanału;
  - wzrasta odległość wystąpienia *frontu wrzenia* od wlotu do kanału, przy czym spostrzeżenia potwierdzają dane pokazane na rysunku 5.38;
- b) nieznacznie wzrasta współczynnik przejmowania ciepła w obszarze inicjacji wrzenia oraz w obszarze rozwoju wrzenia pęcherzykowego w kanale; nieco wyższe wartości eksperymentalnego spadku ciśnienia występują przy wyższych ciśnieniach na wlocie do kanału;
- c) ciśnienie nie wywiera wpływu na tworzące się struktury przepływu dwufazowego.



**Rys. 5.38.** Zależność współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, otrzymana dla różnych ciśnień na wlocie do kanału, przy jednakowej gęstości strumienia ciepła, dane eksperymentalne: R-123,  $H_M = 1$  mm, moduł starszej konstrukcji, folia gładka,  $G = 350 \text{ kg/(m}^2 \text{s})$ ,  $q_w \cong 13,6 \text{ kW/m}^2$ 

### 5.5.2. Wpływ strumienia masy na rozwój wrzenia

Analizę przeprowadzono dla serii pomiarowych, scharakteryzowanych ogólnie w poprzednim punkcie. Na każdy analizowany zespół serii składają się eksperymenty wykonane przy różnych strumieniach masy, zbliżonym ciśnieniu na wlocie do kanału i jednakowej orientacji przestrzennej kanału.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych stwierdzono, że

- a) wraz ze wzrostem strumienia masy płynu w kanale:
  - wzrasta odległość wystąpienia *frontu wrzenia* od wlotu do kanału, wzrasta uskok temperatury powierzchni grzejnej, towarzyszący *histerezie nukleacji*; *front wrzenia* widoczny jest na dłuższym odcinku kanału [Piasecka i Poniewski, 2004c], spostrzeżenie ilustrują dane pokazane na rysunku 5.39, które są wynikiem eksperymentów realizowanych z wykorzystaniem starszej konstrukcji modułu; stwierdzono ponadto, że nieznacznie wzrasta współczynnik przejmowania ciepła w obszarze inicjacji wrzenia;
  - nie zaobserwowano zdecydowanego wpływu strumienia masy na lokalny współczynnika przejmowania ciepła w obszarze rozwoju wrzenia, co potwierdza zbliżony przebieg zależności współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, pokazanych na rysunku 5.40, otrzymane przy zastosowaniu powierzchni z mikrowgłębieniami, dla różnych strumieni masy i przy jednakowej gęstości strumienia ciepła;
- b) wielkość strumienia masy czynnika w kanale nie wywiera znaczącego wpływu na tworzące się struktury przepływu dwufazowego; jednakże pęcherzyki pary, generowane podczas inicjacji wrzenia łączą się w większe aglomeraty szybciej przy niższych strumieniach masy.



**Rys. 5.39.** Zależność współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, otrzymana dla różnych strumieni masy, przy jednakowej gęstości strumienia ciepła, dane eksperymentalne: R-123,  $H_M = 1$  mm, moduł starszej konstrukcji, folia gładka,  $p_{in} = 320$  kPa,  $q_w \approx 11.3$  kW/m<sup>2</sup>



**Rys. 5.40.** Zależność współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, otrzymane przy zastosowaniu powierzchni z mikrowgłębieniami, dla różnych strumieni masy, przy jednakowej gęstości strumienia ciepła  $q_w \cong 12,5 \text{ kW/m}^2$ 

### 5.5.3. Wpływ głębokości i szerokości kanału na rozwój wrzenia

Analizę przeprowadzono na podstawie serii wykonanej przy zbliżonym ciśnieniu na wlocie do kanału i jednakowym strumieniu masy czynnika wrzącego w kanale (fluorinert FC-72), dla kanału ustawionego pionowo, położenie 90°.

Na podstawie analizy wyników serii pomiarowych z wykorzystaniem kanału o różnej niż 1 mm głębokości (0,7 mm i 1,5 mm – seria od 58 do 63, tabela C.1, zał. C) zauważono, że wraz ze wzrostem głębokości kanału (i średnicy hydraulicznej kanału), inicjacja wrzenia zaczyna się w coraz większej odległości od wlotu do kanału, natomiast wartości współczynnika przejmowania wrzenia odpowiadające inicjacji wrzenia okazują się nieco niższe. Wyniki potwierdziły podobne spostrzeżenia z eksperymentów wykonanych na poprzedniej konstrukcji stanowiska.

Zestawienie danych otrzymanych dla serii pomiarowych z minikanałem o szerokości 60 mm – seria od 1 do 12, tabela C.1, załącznik C, wraz z pozostałymi danymi wykonanych dla szerokości kanału równej 40 mm, potwierdziło tezę, że zmiana szerokości kanału nie wpływa na przebieg rozwoju wrzenia. Przy większej szerokości kanału tj. 60 mm, *front wrzenia* posiadał taki sam charakter, a rozwój wrzenia następował w podobny sposób, jak dla eksperymentów z wykorzystaniem kanału szerokości 40 mm. Jednak folia wykazywała tendencje do zmiany geometrii (tzw. wybrzuszanie powierzchni w kierunku osi kanału), co prowadziło do niedogodności pomiaru pola temperatury folii metodą termografii ciekłokrystalicznej oraz większe trudności techniczne podczas montażu modułu, związane przede wszystkim z uszczelnianiem jego elementów.

## 5.5.4. Wpływ rodzaju płynu chłodniczego na rozwój wrzenia

Omawiane w pracy pomiary wykonano stosując czynniki chłodnicze FC-72 i Novec 7100. Poprzednie badania autorki dotyczyły czynników R-11 i R-123 [Piasecka i inni, 2004, 2006, 2009a,b; Piasecka i Poniewski, 2004a,b,c]. Na podstawie analizy porównawczej wszystkich zgromadzonych danych eksperymentalnych stwierdzono, że rodzaj zastosowanego płynu chłodniczego nie wpływa jakościowo na przebieg inicjacji i rozwoju wrzenia w kanałach. Dla wszystkich płynów chłodniczych zaobserwowano w eksperymentach występowanie *histerezy nukleacji*, towarzyszącej inicjacji wrzenia w kanale, a rozwój wrzenia przebiegał w podobny sposób. Typowy i nietypowy przebieg krzywych wrzenia otrzymano niezależnie od rodzaju czynnika chłodniczego wykorzystanego w badaniach.

# 5.6. ANALIZA PORÓWNAWCZA WYNIKÓW BADAŃ WŁASNYCH I INNYCH AUTORÓW

### 5.6.1. Uwagi wstępne

Mając na uwadze zakres problemów omawianych w niniejszym opracowaniu, które dotyczy wrzenia podczas przepływu czynnika chłodniczego poprzez ogrzewany asymetrycznie minikanał o przekroju prostokątnym, istotne jest zweryfikowanie przedstawionych wyników badań własnych, poprzez zastosowanie korelacji istniejących w literaturze przedmiotu. W przypadku, gdyby nie istniały w literaturze opracowania opisujące podobny układ badawczy, wskazane jest zaproponowanie własnych zależności do opisu wymiany ciepła. Jest to szczególnie ważne w sytuacji, gdy istniejące korelacje nie pozwalają na opis wymiany ciepła dla testowanego układu, z wystarczającą dokładnością.

Niestety w literaturze nie odnaleziono korelacji, które dotyczyły układu testowego z minikanałem ogrzewanym asymetrycznie (jedna powierzchni grzejna), o różnej orientacji przestrzennej, o przekroju prostokątnym i podanych zakresach głębokości, szerokości i długości kanału, jak stosowane w badaniach. Należy mieć na względzie, że korelacja powinna dotyczyć wrzenia czynnika FC-72 w minikanale o powierzchni grzejnej o niewielkich parametrach rozwinięcia. Jak wskazano w rozdziale 2, niewiele można odnaleźć w literaturze opracowań, które dotyczą wymiany ciepła w przepływie przy zastosowaniu powierzchni rozwiniętej, a szczególnie jest to trudne w przypadku ograniczenia zagadnienia do minikanałów i procesu wrzenia.

# 5.6.2. Wyniki badań własnych a korelacje wymiany ciepła podczas wrzenia

Do analizy wyników własnych badań wybrano różnorodne korelacje, które stosowane były dla czynników chłodniczych, dla diabatycznych układów z gładkimi powierzchniami grzejnymi, opisane w tabeli 5.2. Wszystkie korelacje, oprócz jednej, przeznaczone były do opisu wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie. Wspomniana korelacja – *Coopera*, sporządzona została dla wrzenia w objętości. Większość korelacji była sprawdzana dla zagadnień wymiany ciepła podczas wrzenia w minikanałach, aczkolwiek niektóre podawane były przez autorów do stosowania w kanałach o wymiarach konwencjonalnych. Te ostatnie wybrano kierując się faktem, iż są one szeroko stosowane przez wielu badaczy dla opisu wrzenia w przepływie z dobrym skutkiem, potwierdzającym ich przydatność dla niektórych układów z minikanałami.

	wrzenia
1	poaczas
	a
	ciept
	vymianę
-	си и
	ując)
	isido
	2
	osc
	alezn
	й Ч
	ranyc
1	ianu
•	nıe
•	ым
t	Lesta
	N
ı	'n
	4
	短

	Uwagi		<ul> <li>wykorzystywane w korelacjach dla wrzenia w przepływie</li> <li>niektórzy badacze otrzymuja</li> </ul>	dobrą zgodność korelacji z danymi dla wrzenia w przepływie	cjonalnych	<ul> <li>– kłasyczna korelacja, wielu badaczy otrzymuje dobrą</li> </ul>	zgodność korelacji z danymi dla wrzenia w przepływie w mini- i	mikrokanałach $-d_i = 6.17 \div 25.4 \text{ mm}$	- czynniki: R-11, R-12, R-22,	K-11.5, cykloneksan, woda – testowana dla danych z zakresu:	0,1  MPa, $67,8 < G < 1383,4$ kg/(m <sup>2</sup> s)	$44 < q_w < 789 \text{ kW/m}^2$ 0 < X < 0,7	<ul> <li>ilość punktów do sporządzenia korelacji – 780, większość danych dla kanałów kołowych</li> </ul>
branych zależności opisujących wymianę ciepła podczas wrzenia	Korelacja	dotyczy wrzenia w dużej objętości	$\alpha_{nb} = 55 \cdot p_r^{0,12-0,2\log Ra} \cdot \left(-\log p_r\right)^{-0,55} \cdot M^{-0,5} \cdot q_w^{0,67} $ (5.1)	śnienie zredukowane asa molowa czynnika rropowatość powierzchni	otyczy wrzenia nasyconego w przepływie, kanałów o wymiarach konwei	$\alpha_{TP} = \max(E, S) \cdot \alpha_l \tag{5.2}$	ależność Dittusa-Boeltera, opisana równaniem (2.7)	$E = 230 \cdot Bo^{0,5}  \text{dla}  Bo > 3 \cdot 10^{-5} \tag{5.3}$	$E = 1 + 46 \cdot Bo^{0,5} \text{ dla } Bo < 3 \cdot 10^{-5} \tag{5.4}$	dla $N > 1$ $S = 1, 8/N$ (5.5)	dla $0, 1 < N \le 1$ $S = 1, 8/N^{0,8}$ (5.6)	$E = F \cdot Bo^{0,5} \cdot \exp\left(2, 74 \cdot N^{-0,15}\right) $ (5.7)	4,7 dla $Bo \ge 0,0011$ lub $F = 15,43$ dla $Bo < 0,0011$ $^{\prime}_{Co}$ dla pionowej rury oraz dla poziomej rury, gdy $Fr_{l} \ge 0,04$
TABELA 5.2. Zestawienie w	Autorzy		Cooper [Cooper, 1984]	$\begin{array}{c} P_r & - \\ M & - \\ Ra & - \end{array}$		Shah [Shah, 1982]	$\alpha_l - \alpha_l$						F = N

jak wyżej			modyfikacja korelacji <i>Chena</i> – R-11, R-12, R-22, R-113, R-114, glikol etylenowy – sugerowana postać korelacji dla kanałów kołowych pionowych i poziomych – <i>d<sub>i</sub></i> = 2,95 ÷ 32 mm
(5.8)	(5.9)	(5.10)	(5.11) (5.12) (5.13) (5.14)
$N = 0,38 \cdot Fr_l^{-0,3} \cdot N_{Co}$ dla poziomej rury, gdy $Fr_l < 0,04$	$N_{Co} = \left(\frac{1-X}{X}\right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5}.$	W zależności <i>Dittusa-Boeltera</i> liczba <i>Re</i> definiowana: $Re_l = \frac{G \cdot (1 - X) \cdot d_h}{\mu_l}.$	$\alpha_{TP} = E \cdot \alpha_l + S \cdot \alpha_{nb}$ $\alpha_l - \text{zależność Dittusa-Boeltera, opisana równaniem (2.7)$ $\alpha_{nb} - \text{zależność Coopera, opisana równaniem (5.1)}$ $E = 1 + 24000 \cdot Bo^{1,16} + 1, 37 \cdot (1/\chi_{tt})^{0,86}$ $S = (1 + 1, 15 \cdot 10^{-6} \cdot E^2 \cdot Re_l^{1,17})^{-1}$ $\chi_{tt} - \text{sugerowane, aby wyznaczać ze wzoru:}$ $\chi_{tt} = \left(\frac{1 - X}{X}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_v}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,5}$
jak wyżej			<i>Gungor</i> i <i>Winterton</i> [Gungor i Winterton, 1986]

jak wyżej	<ul> <li>modyfikacja korelacji <i>Chena</i></li> <li>oraz korelacji własnej <i>Gungora</i></li> <li>i <i>Wintertona</i> (1986)</li> <li>pozostałe uwagi jak podane dla korelacji <i>Gungora</i> i <i>Wintertona</i> [Gungor i Winterton, 1986]</li> </ul>										
	(5.15)	(5.16)		(5.17)		(5.18)		(5.19)	(5.20)	(5.21)	(5.22)
dla rury poziomej i $Fr_l < 0,05$ :	$E$ należy podzielić przez $E_2 = Fr_l^{(0,1-2Fr_l)}$	$S$ należy podzielić przez $S_2 = \sqrt{Fr_1}$	zależność dla wrzenia przechłodzonego:	$q = \alpha_{l} \left( T_{w} - T_{f} \right) + S \cdot \alpha_{nb} \left( T_{w} - T_{sat} \right)$	$T_w$ – temperatura powierzchni grzejnej	$\alpha_{TP} = \left(S \cdot S_2 + F \cdot F_2\right) \cdot \alpha_{lo}$	$\alpha_l$ – zależność Dittusa-Boeltera, opisana równaniem (2.7)	$S = 1 + 3000 Bo^{0,86}$	$F = 1, 12[X / (1 - X)]^{0,75} \cdot (\rho_l / \rho_v)^{0,41}$	$S_2 = \begin{cases} Fr_1^{(0,1-2F\eta)} & \text{dla poziomych i } Fr < 0,05 \\ 1 & \text{pozostałe} \end{cases}$	$F_2 = \begin{cases} Fr_1^{1/2} & \text{dla poziomych i } Fr < 0,05 \\ 1 & \text{pozostate} \end{cases}$
jak wyżej						Gungor i Winterton	[Gungor i Winterton	1987]			

E

<ul> <li>korelacja w postaci funkcji potęgowych</li> <li>pozostałe uwagi jak podane dla korelacji <i>Gungora i Wintertona</i> [Gungor i Winterton, 1986]</li> </ul>	dnicach hydraulicznych	- dla dominującego obszaru wrzenia pęcherzykowego, - kanał kołowy, pionowy $d_h = 3, 15 \text{ mm}$ - czynnik roboczy: R-113 - testowana dla danych z zakresu: 125 < $G < 750 \text{ kg}(\text{m}^2\text{s})$ 14 < $q_w < 380 \text{ kW/m}^2$ 0 < $X < 0,8$ - ilość punktów do sporządzenia korelacji - 738	<ul> <li>poziome minikanały kołowe</li> <li><i>d<sub>h</sub></i> = 2,46 mm; 2,92 mm</li> <li>czynnik: R-12</li> </ul>
(5.23) (5.24) (5.25)	nałych śre	(5.26)	(5.27)
$\alpha_{TP}{}^{2} = (F \cdot \alpha_{I})^{2} + (S \cdot \alpha_{nb})^{2}$ $\alpha_{I} - \text{zależność Dittusa-Boeltera, opisana równaniem (2.7)$ $\alpha_{nb} - \text{zależność Coopera, opisana równaniem (5.1)}$ $F = \left[1 + X \cdot Pr_{I} \cdot \left(\frac{\rho_{I}}{\rho_{v}} - 1\right)\right]^{0,35}$ $S = \left(1 + 0,055 \cdot F^{0,1} \cdot \text{Re}_{lo}^{0,16}\right)^{-1}$	otyczy wrzenia nasyconego w przepływie, minikanałów lub kanałów o i	$\alpha_{TP} = \left(30 \cdot Re_l^{0,857} \cdot Bo^{0,714}\right) \cdot \left(\frac{\lambda_l}{d_h}\right)$	$\alpha_{TP} = 840000 \cdot \left( Bo^2 \cdot We_l \right)^{0,3} \cdot \left( \rho_l \mid \rho_v \right)^{-0,4}$
Liu i Winterton [Liu i Winterton, 1991]	ġ	<i>Lazarek i Black</i> [Lazarek i Black, 1982]	<i>Tran</i> i inni [Tran i inni, 1996]

<ul> <li>modyfikacja równania <i>Lazarka</i></li> <li>i <i>Blacka</i>; wprowadzenie stopnia suchości do równania (5.26)</li> <li>d<sub>n</sub> = 1,36 ÷ 3,69 mm,</li> <li>czynnik: R-141b</li> </ul>	<ul> <li>obowiązuje dla wrzenia nasyconego</li> </ul>	
(5.28)	$\left( \frac{7}{3} n \right) \cdot \alpha_l$	(5.30)
$\alpha_{TP} = \alpha_l \cdot (1 - X)^{-0,143}$ $\alpha_l - z$ ależność <i>Lazarka</i> i <i>Blacka</i> , opisana równaniem (5.11)	$\alpha_{TP} = \left(C_1 \cdot Co^{C_2} \cdot (25 \cdot Fr_l)^{C_5} + C_3 \cdot Bo^{C_4} \cdot (25 \cdot Fr_l)^{C_6} \cdot I\right)$ dla $Co < 0,65$ : $C_1 = 1,136$ ; $C_2 = -0,9$ ; $C_3 = 667,2$ ; $C_4 = 0,7$ ; $C_5 = 0,3$ ; dla $Co > 0,65$ : $C_1 = 0,6683$ ; $C_2 = -0,2$ ; $C_3 = 1058$ ; $C_4 = 0,7$ ; $C_5 = 0,3$ ; dla $Fr_r > 0.04$ oraz dla rurek pionowych $C_5 = 0$ .	$\alpha_{l} = 4,364d_{h} / \lambda_{l}$ $Co = N_{co} - \text{wzór} (5.9), \text{ jak dla korelacji Shaha}$ $F_{\eta} - \text{ parametr zależny od czynnika:}$ $F_{\eta} = 1,3 \text{ dla wody}, F_{\eta} = 1,1 \text{ dla } \text{R}-152a, F_{\eta} = 1,24 \text{ dla } \text{R}-114,$ $F_{\eta} = 3,5 \text{ dla neonu, } F_{\eta} = 4,7 \text{ dla azotu}$
<i>Kew</i> i <i>Cornwell</i> [Kew i Cornwell, 1997]	Kandlikar, [Kandlikar, 1990]	

<ul> <li>obowiązuje dla wrzenia nasyconego, dla wszystkich rodzajów przepływów</li> </ul>	– w tabelı podano postac dla mikrokanałów, dla której pomija się liczbę $Fr$ (zakłada się, że $Fr =$ 1)	$- \frac{1}{d_h} = 0, 4 \pm 2, 97 \text{ mm}$ - czynniki: R-11, R-12, R-113, R-123, R-124, R-134a, R-141b,	FC-84 - testowana dla danych z zakresu: $50 < G < 1600 \text{ kg/(m^2s)}$	$2 < q_w < 600 \text{ kW/m}^2$			
(5.31)	$F_{Fl} \cdot \alpha_l$ (5.32)	$r_{Fl} \cdot \alpha_l$ (5.33)	(5.34)	(5.35)		(5.36)	tsa-
$\alpha_{TP} = \max \begin{cases} \alpha_{TP,nb} \\ \alpha_{TP,cb} \end{cases}$	$\alpha_{TP,nb} = 0,6683 \cdot Co^{-0,2} \cdot (1-X)^{0,8} \cdot \alpha_l + 1058 \cdot Bo^{0,7} \cdot (1-X)^{0,8} \cdot$	$\alpha_{TP,cb} = 1,136 \cdot Co^{-0,9} \cdot (1-X)^{0,8} \cdot \alpha_l + 667, 2 \cdot Bo^{0,7} \cdot (1-X)^{0,8} \cdot I$	$lpha_{l} = rac{(f/2) \cdot Re_{l} \cdot Pr_{l} \cdot (\lambda_{l} / d_{h})}{1 + 12, 7(f/2)^{1/2} \cdot (Pr_{l}^{2/3} - 1)}  ext{ dla } 10^{4} \leq Re_{l} \leq 5 \cdot 10^{6}$	$\alpha_{l} = \frac{(f/2) \cdot (Re_{l} - 1000) \cdot Pr_{l} \cdot (\lambda_{l} / d_{h})}{1 + 12, 7(f/2)^{1/2} \cdot (Pr_{l}^{2/3} - 1)}  \text{dla } 3000 \le Re_{l} \le 10^{4}$	parametr $f$ wyznacza się z zależności:	$f = (1,58 \ln Re_l - 3,28)^{-2}$	parametr $F_{Fl}$ podany w zależności od płynu, w zakresie 1+3,3 w zakresie ruchu laminarnego $\alpha_l$ można wyznaczać z zależności <i>Ditti Boeltera</i> , opisanej równaniem (2.7)
Kandlikar i Steinke [Kandlikar	1 Steinke, 2002]						

- $d_h = 0,75 \text{ mm}$ - dla 5 kanałów o przekroju prostokątnym, poziomych - czynnik: FC-84 - badania dotyczące danych z zakresu: $557 < G < 1600 \text{ kg/m}^2$ $1 < q_w < 59,9 \text{ kW/m}^2$ $2,7 \cdot 10^{-4} \leq Bo \leq 8,9 \cdot 10^{-4}$ $0,03 \leq X \leq 0,55$	- 11 równoległych kanałów o przekroju prostokątnym (3,38 mm x 1,47 mm) - $d_h = 2,01$ mm - czynnik: R-134a - testowane dla danych z zakresu: 90 < G < 295 kg/(m <sup>2</sup> s) $6 < q_w < 31,6$ kW/m <sup>2</sup> $Bo > 4,3 \cdot 10^{-4}$	<ul> <li>korelacja dla R-11, R-12 i R-22</li> <li>dane pochodzące od różnych autorów</li> </ul>
(5.37)	(5.38) (5.39)	
$\alpha_{TP} = \left[ 1 + 6Bo^{1/16} - 5, 3(1 - 855Bo) X^{0,65} \right] \cdot \alpha_l$ $\alpha_l - zależność Dittusa-Boeltera, opisana równaniem (2.7)$	$\alpha_{TP} = 28q_w^{2/3} \cdot G^{-0,26} \cdot X^{-0,1}  \text{dla } X < 0,43$ $\alpha_{TP} = 28q_w^{2/3} \cdot G^{-0,64} \cdot X^{-2,08}  \text{dla } X > 0,43$	podana w rozdziale 2, opisana wzorami (2.23) i (2.29)
<i>Warrier</i> i inni, [Warrier i inni, 2002]	Agostini i Bontemps [Agostini i Bontemps, 2005]	<i>Mikielewicz</i> i inni [Mikielewicz i inni, 2007]

- korelacja oparta na korelacji Lazarka i Blacka, z wprowadzeniem do równania liczby <i>Webera</i> - $d_h = 0.21 \pm 6.5$ mm - czynniki: R-11, R-12, R-123, R-134a, R-141b, R-22, R-404a, R-407c, R-410a, CO <sub>2</sub> , woda - testowana dla danych z zakresu: 12 < $Re_i < 43.600$ 30 < $Re_v < 340.000$ 44 < $G < 1.500$ kg/(m <sup>2</sup> s) 5 < qw < 109 kW/m <sup>2</sup> - ilość punktów do sporządzenia korelacji - 2.505	- korelacja oparta na korelacji <i>Chena</i> - kanały o przekroju prostokątnym, poziome - $d_{h} = 0, 16 \div 2, 92 \text{ mm}$ - $0, 3 < \text{Co} < 4$ - czynniki: 12 czynników chłodniczych, azot, woda - testowana dla danych z zakresu: 20 < $G < 3000 \text{ kg/(m^{2}s)}$ $4 < q_{w} < 1150 \text{ kW/m}^{2}$ $0 \leq X \leq 1$ - ilość punktów do sporządzenia korelacji - 3 899
$\alpha_{TP} = \frac{6Re_l^{1,05} \cdot Bo^{0,54}}{We_l^{0,191} \cdot (\rho_l / \rho_v)^{0,142}} \cdot \frac{\lambda_l}{d_h} $ (5.40)	$\alpha_{TP} = S\alpha_{nb} + F\alpha_{SP} $ (5.41) S = 1 - X (5.42) $\alpha_{SP} = \alpha_{v} + (1 - X)\alpha_{l} $ (5.43) - dla przepływu turbulentnego $\alpha_{v}$ i $\alpha_{l}$ , z równania <i>Dittusa-Boeltera</i> (2.7) - dla przepływu laminarnego: $\alpha_{v/l} = \frac{\lambda_{v/l}}{d_{h}} \cdot \left[ 3,66 + \frac{0,0668Re_{v/l}Pr_{v/l} \cdot d_{h}/L}{1+0,04(Re_{v/l}Pr_{v/l} \cdot d_{h}/L)^{2/3}} \right] $ (5.44) L - dtugość kanału
<i>Sun</i> i <i>Mishima</i> [Sun i Mishima, 2009]	<i>Bertsch</i> i inni, [Bertsch i inni, 2009]

jak wyżej			- dla kanałów pojedynczych i multikanałów $d_h = 0, 16+3, 1 \text{ mm}$	<ul> <li>większość danych z zakresu: Re &lt; 2 000</li> </ul>	<ul> <li>– czynniki: płyny chłodnicze, alkohol etylowy, propan, woda, CO.</li> </ul>	<ul> <li>– ilość punktów do sporządzenia korelacji – 3 744</li> </ul>	- kanaly o przekroju kołowym $d_h = 0,45 \pm 2,30 \text{ mm}$ - czynniki: R-134a, R-404a - testowana dla danych z zakresu: $300 < G < 1400 \text{ kg/(m}^2\text{s})$ $0 < q_w < 90 000 \text{ kW/m}^2$ $0 \le X \le 0,2 \text{ (R-404a)}$ $0 \le X \le 0,4 \text{ (R-134a)}$ 550 < Re < 20 000 $5 \cdot 10^5 < Bo < 7 \cdot 10^4$ 0.26 < Co < 1,76	<ul> <li>ilość punktów do sporządzenia korelacji – ponad 1 700</li> </ul>
	(5.46)		(5.47)					
liczba Re definiowana jest dla każdej fazy oddzielnie:	$Re_v = \frac{G_{TP} \cdot d_h}{\mu_v}$ lub $Re_l = \frac{G_{TP} \cdot d_h}{\mu_l}$	$Pr_l-$ we wzorze właściwości cieczy, $Pr_v-$ we wzorze właściwości pary	$\alpha_{TP} = 334Bo^{0,3} \left( Bd \cdot Re_l^{0,36} \right)^{0,4} \cdot \left( \frac{\lambda_l}{d_h} \right)$				podana w rozdziale 2, opisana wzorem (2.30)	
jak wyżej			<i>Li</i> i <i>Wu</i> [Li i Wu, 2010]				<i>Dutkowski</i> [Dutkowski, 2011]	

\_

Szeroko znana korelacja *Chena*, składająca się z dwóch członów – konwekcyjnego i odparowania, nie została uwzględniona w rozważaniach. Zdecydowano się przetestować korelacje *Gungora i Wintertona* [Gungor i Winterton, 1986, 1987], oparte na korelacji *Chena*. Korelacja *Gungora i Wintertona* [Gungor i Winterton, 1986], podobnie jak korelacja *Chena*, zawiera parametr *Lockharta-Martinelli'ego*  $\chi_{tt}$ , dla przepływu turbulentnego cieczy i pary. Niniejsze wyniki dotyczą przepływu laminarnego cieczy, a dla takiego przypadku raczej nie ma uzasadnienia, aby stosować wyżej wymienione korelacje. Kolejna korelacja *Gungora i Wintertona* [Gungor i Winterton, 1987] nie zawiera parametru  $\chi_{tt}$ , a współczynnik przy członie konwekcyjnym, oparty jest na liczbie wrzenia *Bo*. Dlatego zdecydowano, aby tę korelację (z opartych na korelacji *Chena*) wybrać do prezentacji własnych danych.

Aby porównać eksperymentalny współczynnik przejmowania ciepła z wynikami obliczeń według korelacji zaproponowanych przez innych autorów, wybrano serie pomiarowe dla różnych ustawień kanału. Dane z eksperymentów pokazano na rysunkach 5.41÷5.43, w postaci zależności eksperymentalnego współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału.

Do obliczeń wykorzystano wyniki otrzymane dla wrzenia nasyconego, rozwiniętego, pochodzące z następujących serii pomiarowych (wcześniej wyselekcjonowanych do analizy oporów przepływu dwufazowego):

- a) przy ustawieniu poziomym kanału, położenie 0°, seria 25, z wykorzystaniem folii rozwiniętej z miniwgłębieniami na całej powierzchni, obliczenia dla pomiarów od nr 24 do 35 – rysunek 5.41;
- b) przy ustawieniu pionowym kanału, położenie 90°, seria 24, z wykorzystaniem folii rozwiniętej z miniwgłębieniami na całej powierzchni, obliczenia dla pomiarów od nr 15 do 23 – rysunek 5.42;
- c) przy ustawieniu poziomym kanału, położenie 180°, seria 38 z wykorzystaniem folii rozwiniętej z mikrowgłębieniami na całej powierzchni (teksturowanie 1), obliczenia dla pomiarów od nr 10 do 20 – rysunek 5.43.

Lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła (rys. 5.41÷5.43) odpowiadają stopniom suchości z zakresu  $0,3 \le X \le 0,52$ . Ich prezentacja pozwala na poglądową ilustrację wartości współczynników, które posłużyły jako dane wyjściowe do analizy porównawczej wyników własnych z korelacjami wybranych autorów.

Do analizy wybrano wartości współczynników przejmowania ciepła, uzyskane dla przekroju kanału w odległości 0,3 m od wlotu, dla trzech wymienionych eksperymentów. Na rysunkach 5.41÷5.43, zaznaczono tę odległość (i przekrój) czerwoną linią przerywaną, przy czym zakres odległości od wlotu do kanału ograniczono do 0,25÷0,35 m, aby wyeksponować wartości, będące celem analizy.



**Rys. 5.41.** Zależności współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału dla wybranego zakresu odległości dla pomiarów od nr 15 do 23, seria 25, fluorinert FC-72, kanał poziomy, położenie 0°, miniwglębienia na całej powierzchni folii, parametry eksperymentalne:  $G = 285 \text{ kg/(m}^2 \text{s})$ ,  $p_{in} = 120 \text{ kPa}$ ,  $\Delta T_{sub} = 44 \text{ K}$ ,  $X = 0,39\div0,52$ 



**Rys. 5.42.** Zależności współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od włotu do kanału dla wybranego zakresu odległości dla pomiarów od nr 24 do 35, seria 24, fluorinert FC-72, kanał pionowy, położenie 90°, miniwgłębienia na całej powierzchni folii, parametry eksperymentalne:  $G = 286 \text{ kg/(m}^2 \text{s}), p_{in} = 122 \text{ kPa}, \Delta T_{sub} = 43 \text{ K}, X = 0,35 \div 0,49$ 



**Rys. 5.43.** Zależności współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału dla wybranego zakresu odległości dla pomiarów od nr 10 do 20, seria 38, fluorinert FC-72, kanał poziomy, położenie 180°, mikrowgłębienia na całej powierzchni folii, parametry eksperymentalne:  $G = 137 \text{ kg/(m^2s)}$ ,  $p_{in} = 120 \text{ kPa}$ ,  $\Delta T_{sub} = 37 \text{ K}$ ,  $X = 0,30\div0,49$ 

Na rysunkach 5.44÷5.46 przedstawiono porównanie eksperymentalnego współczynnika przejmowania ciepła z wynikami obliczeń według korelacji wymienionych w tabeli 5.2, z pewnymi wyjątkami. Z korelacji zaproponowanych przez *Kandlikara*, do obliczeń wybrano korelację *Kandlikara* i *Steinke*. Ponieważ autorzy korelacji nie podali współczynnika  $F_{Fl}$  dla fluorinertu FC-72, do obliczeń należało założyć wartość tego współczynnika. Dla FC-72, który jest związkiem fluoropochodnym węglowodoru, przyjęto średnią arytmetyczną z trzech współczynników, podanych przez *Kandlikara* dla chlorofluorowęglowodorów: R-11 i R-113 oraz dla R-12, czyli  $F_{Fl} = 1,7$ . Jak wspomniano, z korelacji przedstawionych przez *Gungora* i *Wintertona*, do opisu własnych danych wybrano tę, która nie wymaga podstawienia  $\chi_{tt}$ , tzn. korelację zaproponowaną w [Gungor i Winterton, 1987].

Rysunek 5.44 zawiera porównanie eksperymentalnego i teoretycznego współczynnika przejmowania ciepła dla kanału poziomego, położenie 0°, rysunek 5.45 – dla kanału pionowego, położenie 90°, a rysunek 5.46 – dla kanału poziomego, położenie 180°.



**Rys. 5.44.** Porównanie eksperymentalnego współczynnika przejmowania ciepła z wartościami teoretycznymi, kanał poziomy, położenie 0°, seria 24, pomiary od nr 15 do 23, parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.41



**Rys. 5.45.** Porównanie eksperymentalnego współczynnika przejmowania ciepła z wartościami teoretycznymi, kanał pionowy, położenie 90°, seria 25, pomiary od nr 24 do 35, parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.42



**Rys. 5.46.** Porównanie eksperymentalnego współczynnika przejmowania ciepła z wartościami teoretycznymi, kanał poziomy, położenie 180°, seria 38, pomiary od nr 10 do 20, parametry eksperymentalne jak dla rysunku 5.43

Zestawienie błędu obliczenia współczynników przejmowania ciepła według korelacji wybranych z literatury przedstawiono w tabeli 5.3. Do oszacowania błędów wykorzystano średni błąd względny, obliczony zgodnie ze wzorem:

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^{N} \left| \frac{\alpha(x)_{theor} - \alpha(x)_{exp}}{\alpha(x)_{exp}} \right|$$
(5.48)
Tabela 5.3 pokazuje zarówno średnie błędy względne, wyznaczone osobno dla każdego z analizowanych położeń kanału oraz zbiorczo (wspólnie dla danych pomiarowych wszystkich orientacji przestrzennych).

**TABELA 5.3.** Zestawienie blędu obliczenia współczynników przejmowania ciepła według korelacji wybranych z literatury

	Średni błąd względny [%]							
Korelacja	Kanał poziomy, położenie 0°	Kanał pionowy, położenie 90°	Kanał poziomy, położenie 180°	Wszystkie orientacje kanału				
dotyczy wrzenia w dużej objętości								
Cooper	57,93	71,22	25,76	51,85				
dotyczy wrzenia nasyconego w przepływie, kanałów o wymiarach konwencjonalnych								
Shah	17,20	32,91	93,51	49,32				
Lazarek i Black	28,32	50,99	49,69	44,17				
Gungor i Winterton, 1987	136,95	70,85	358,04	188,16				
Liu i Winterton	65,41	16,06	216,72	98,92				
dotyczy wrzenia nasyconego w przepływie, minikanałów lub kanałów o małych średnicach hydraulicznych								
<i>Tran</i> i inni	20,03	42,87	158,80	76,30				
Kandlikar i Steinke	26,89	21,67	162,42	71,52				
Warrier i inni	40,82	59,58	37,03	46,55				
Agostini i Bontemps	89,16	29,36	464,72	195,84				
<i>Mikielewicz</i> i inni	15,52	34,35	102,22	49,07				
Sun i Mishima	47,77	64,73	39,18	51,18				
Bertsch i inni	24,87	47,45	119,53	65,88				
Kew i Cornwell	22,42	45,86	59,02	43,80				
Li i Wu	98,25	30,55	641,46	259,88				
Dutkowski	34,43	32,32	59,92	43,34				

Na podstawie danych przedstawionych na rysunkach 5.44÷5.46 oraz podanych w tabeli 5.3, zaobserwowano następujące zależności:

- Dla kanału poziomego, położenie 0° (rys. 5.44), największą zgodność własnych danych zaobserwowano przy zastosowaniu korelacji *Mikielewicza* i innych (średni błąd względny 15,5%, korelacja z poprawką dla minikanałów) oraz *Shaha* (średni błąd względny 17%, korelacja dla kanałów o wymiarach konwencjonalnych). Uznawaną zgodność, większość punktów w granicy błędu ±30%, zapewniło wykorzystanie do obliczeń korelacji *Trana* i innych, *Kewa* i *Cornwella, Bertscha* i innych, *Kandlikara* i *Steinke, Lazarka* i *Blacka* oraz *Dutkowskiego*, gdyż otrzymano średni błąd względny maksymalnie 35%. Wszystkie wymienione korelacje dotyczyły minikanałów lub małych średnic kanału. Największe różnice pomiędzy własnymi danymi, a otrzymanymi z korelacji innych badaczy, otrzymano w obliczeniach zgodnych z równaniami dla kanałów o wymiarach konwencjonalnych – *Gungora* i *Wintertona* oraz *Li* i *Wu* (średnie błędy względne wyższe niż 90%).
- 2. Dla kanału pionowego, położenie 90° (rys. 5.45) uzyskano najlepszą zgodność wyników przy zastosowaniu korelacji dla kanałów o wymiarach konwencjonalnych *Liu* i *Wintertona*. Wszystkie dane, obliczone zgodnie z podaną zależnością, mieściły się w granicy błędów ±30%, a średni błąd względny wyniósł 16%. W wyniku wprowadzenia własnych danych do obliczeń z zastosowaniem korelacji: *Kandlikara* i *Steinke*, *Agostiniego* i *Bontempsa*, *Li* i *Wu*, *Dutkowskiego*, *Shaha* oraz *Mikielewicza*, otrzymano średnie błędy względne niższe niż 35%. Wymienione korelacje, oprócz korelacji *Shaha*, dotyczą minikanałów lub kanałów o małej średnicy. Najsłabszą zgodność wyników własnych z korelacjami innych otrzymano przy zastosowaniu korelacji *Warriera* i innych oraz korelacji *Coopera* (dedykowana dla wrzenia w dużej objętości), gdyż średnie błędy względne okazały się wyższe niż 60%. Zauważono, że dla kanału pionowego otrzymano najwyższe wartości współczynników przejmowania ciepła, choć niewiele wyższe od wyników dla kanału poziomego, położenie 0°.
- 3. Dla kanału poziomego, położenie 180°, otrzymano znacznie niższe współczynniki przejmowania ciepła z własnych badań, w porównaniu do pozostałych rozważanych orientacji kanału. Wartości eksperymentalnego współczynnika wynoszą maksymalnie 1200 W/(m<sup>2</sup>K) i zbliżone są do wartości otrzymywanych dla konwekcji wymuszonej i inicjacji wrzenia. Eksperymentalny stopień zapełnienia dla danych dla przekroju w odległości ok. 0,3 m od wlotu, jest bliski 1 (patrz rys. 5.19b). Oznacza to dominujący udział pary w mieszaninie przepływającej przez minikanał, co powoduje, że zmienia się charakter procesu wymiany ciepła. Najlepszą zgodność dla takich warunków wrzenia w kanale przyniosło zastosowanie korelacji dla wrzenia w dużej objętości korelacji *Coopera* (średni błąd względny 26%), gdyż jedynie dla tego równania otrzymano punkty na wykresie w granicy błędów +30%. Średnie błędy względne nie wyższe niż 40%, uzyskano przy zastosowaniu korelacji *Warriera* i innych oraz *Suna* i *Mis*-

*hima* (korelacje dla minikanałów). Zgodność pozostałych korelacji z własnymi danymi dla analizowanego ustawienia kanału okazała się bardzo słaba. Wykorzystanie własnych danych do obliczeń zgodnie z korelacjami *Li* i *Wu*, *Agostiniego* i *Bontempsa* oraz *Gungora* i *Wintertona* przyniosło bardzo wysokie średnie błędy względne, rzędu kilkuset procent.

Analizując wartości średnich błędów względnych, zestawione w tabeli 5.3, stwierdzono, że ocena przydatności korelacji, oparta jedynie na wartościach uśrednionych błędu względnego – wspólnego dla wszystkich orientacji przestrzennych kanału, często prowadzić może do mylnych wniosków. Niektóre korelacje z bardzo dobrym przybliżeniem pozwalają prognozować wartości współczynnika, ale tylko dla określonego położenia kanału. Kilka korelacji można stosować zarówno dla minikanału pionowego, położenie 90°, jak i dla kanału poziomego, położenie 0°.

Warte podkreślenia jest, że dla położenia poziomego, 0° i pionowego, 90°, można stosować korelację *Shaha*, *Kandlikara* i *Steinke*, *Mikielewicza* i innych oraz *Dutkowskiego*, gdyż średnie błędy względne nie są wyższe niż 35% (uznawana granica błędów). Z kolei dla poziomego kanału, położenie 180°, jedyną korelacją, przy zastosowaniu której uzyskano stosunkowo niskie średnie błędy względne (równe 26%), jest korelacja *Coopera*. Wprowadzając własne dane, uzyskane dla wszystkich analizowanych położeń do korelacji *Kewa* i *Cornwela*, *Dutkowskiego*, *Lazarka* i *Blacka* oraz *Warriera* i innych, otrzymano średnie błędy względne nie wyższe niż 45%. Należałoby mieć jednak na względzie, że wykorzystując te korelacje do obliczeń otrzymano znacznie wyższą wartość średniego błędu względnego, dla co najmniej jednego z rozpatrywanych położeń (co najmniej 50%).

Podsumowując analizę stwierdzono, że przy wykorzystaniu znanych korelacji nie jest możliwe dokładne prognozowanie wartości współczynników przejmowania ciepła podczas rozwiniętego wrzenia w przepływie dla różnych orientacji przestrzennych minikanału o zadanej geometrii. W korelacji należałoby wprowadzić różne wartości współczynników korekcyjnych, zależnych od położenia kanału. Najlepszą zgodność danych eksperymentalnych z prognozowanymi na podstawie wybranych korelacji teoretycznych, otrzymano dla kanału pionowego, położenie 90°, gdyż wyniki ponad połowy analizowanych korelacji mieszczą się w granicy błędów ±50. Nieco niższą zgodność uzyskano dla kanału poziomego, położenie 0°, a najniższą – dla kanału poziomego, położenie 180°, dla której zastosowanie większości korelacji powoduje błędy od ponad 50% aż do kilkuset procent. W przypadku tej orientacji kanału uznawaną zgodność wyników eksperymentalnych uzyskano jedynie przy zastosowaniu korelacji *Coopera* – przeznaczonej dla wrzenia w dużej objętości.

Należy podkreślić, że własne wyniki eksperymentalne dotyczyły wrzenia podczas przepływu w kanale o rozwiniętej powierzchni grzejnej, a korelacje przedstawione w tabeli 5.2 dotyczą powierzchni gładkich.

Uniwersalne równanie korelacyjne do stosowania dla wrzenia w przepływie powinno również uwzględniać parametr rozwinięcia powierzchni. Może mieć to szczególnie duże znaczenia dla powierzchni grzejnych porowatych (rozwinięcia powierzchni rzędu kilkudziesięciu procent).

# 5.6.3. Współczynniki przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie i objętości na powierzchni rozwiniętej

Celem analizy jest porównanie wpływu rozwiniętych powierzchni o zbliżonych parametrach geometrycznych rozwinięcia na intensyfikację wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie i w dużej objętości. Przeanalizowano wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na dwóch oddzielnych stanowiskach badawczych. W konstrukcji obu modułów testowych stanowisk wykorzystano powierzchnie grzejne rozwinięte w podobny sposób. Jeden z modułów został omówiony w niniejszej pracy i wykorzystywany w badaniach wrzenia podczas przepływu. W celu porównania wyników badań minikanał o głębokości 1 mm i szerokości 40 mm ustawiono poziomo, w położeniu 0°. W takim ustawieniu czynnik chłodniczy przepływał nad powierzchnią grzejną. Drugi moduł, pokazany na rysunku 5.47, używany jest w badaniach wymiany ciepła podczas wrzenia w dużej objętości [Pastuszko, 2008; 2010; 2012b]. Moduł ten składa się z cylindrycznego naczynia ze szkła żaroodpornego (3), wypełnionego cieczą wrzącą i umieszczonego nad badanymi (wymiennymi) próbkami o powierzchni rozwiniętej (4). Próbki lutowane są do miedzianego walca grzejnego (6) o średnicy 45 mm i długości 170 mm. Wewnątrz walca znajduje się grzejnik patronowy o mocy 1 kW, średnicy 19 mm i długości 130 mm. Walec jest otoczony warstwą izolacyjną o średnicy 200 mm. Na potrzeby wizualizacji zewnętrznej stosowano naczynie w postaci czterech płaskich płytek szklanych, połączonych silikonem. Odzysk odparowanej cieczy jest zapewniony dzięki skraplaczowi (14), połączonemu z górną pokrywą. Wi-zualizację wrzenia umożliwia szybka kamera cyfrowa (400÷1000 klatek/s) z oprzyrządowaniem i układem oświetlenia (światłowody halogenowe oraz LED). Główne elementy aparatury pomiarowej wykorzystywanej w badaniach to: autotransformator, regulator mikroprocesorowy, watomierz, multimetr oraz system akwizycji danych (FLUKE).

Na rysunku 5.48 przedstawiono charakterystykę zewnętrznych powierzchni rozwiniętych dwóch próbek (oznaczone jako (4) na rys. 5.47), wytworzonych w procesie elektroerozji, zastosowanych w badaniach wrzenia w dużej objętości [Pastuszko i Piasecka, 2012]. Powierzchnie z miniwgłębieniami wytworzono na miedzianej płytce przy ustawionej różnej biegunowości elektrod elektropisaka. Biegunowość ta decyduje o zachodzeniu obróbki ubytkowej lub przyrostowej. Pierwsza powierzchnia (próbka 1) charakteryzuje się wysokimi strukturami "kraterów" rzędu 15 µm (rys. 5.48a-c), w porównaniu do drugiej (próbka 2), której większość "kraterów" nie osiąga wysokości 10 µm, ale maksymalne struktury są wyższe od zarejestrowanych dla próbki 2, rzędu 25 µm (rys. 5.48d-f). Do wyznaczenia stopnia rozwinięcia badanych powierzchni wykorzystano wzór podany w dalszej części pracy (5.58), dla powierzchni folii  $A_f = 10\ 000\ \mu\text{m}^2$ , otrzy-mując dane:

- próbka 1 (dane na rys. 5.48a-c):  $A_s = 0,093, H = 14 \text{ } \mu\text{m}, \epsilon = 81 \text{ } \mu\text{m}, n = 2,$ otrzymano wynik  $\Gamma = 0,248;$
- próbka 2 (dane na rys. 5.48d-f):  $A_s = 0,126, H = 25 \text{ } \mu\text{m}, \epsilon = 64 \text{ } \mu\text{m}, n = 1,$ otrzymano wynik  $\Gamma = 0,181.$



**Rys. 5.47.** Moduł podstawowy stanowiska: 1 – pokrywa górna, 2 – ciecz wrząca, 3 – naczynie szklane, 4 – wymienna próbka z górną powierzchnią rozwiniętą, 5 – przekładka teflonowa, 6 – walec grzejny, 7 – izolacja, 8 – grzejnik patronowy, 9 – izolacja dolna, 10 – podstawa teflonowa, 11 – termopary, 12 – szybka kamera cyfrowa, 13 – oświetlacz halogenowy/LED, 14 – skraplacz



W celu porównawczym intensyfikacji wymiany ciepła przy wrzeniu w warunkach wrzenia w dużej objętości i w przepływie, na rysunku 5.49 zestawiono wyniki badań wymiany ciepła czynnika FC-72, przy zastosowaniu powierzchni grzejnych o podobnym stopniu rozwinięcia. Są to zależności współczynnika przejmowania ciepła w funkcji gęstości strumienia ciepła (podczas zwiększania strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnych) w warunkach wrzenia w dużej objętości oraz sporządzonych dla badań wrzenia podczas przepływu, dla czterech przekrojów, w następujących odległościach od wlotu do kanału: 0,219 m, 0,236 m, 0,254 m i 0,280 m. Dane dla wrzenia w przepływie dotyczą serii 25, w którym jako powierzchnię grzejną zastosowano folię z mikrowgłębieniami wytworzonymi metodą elektroerozji na całej powierzchni. Na rysunku 4.8 w rozdziale 4 przedstawiono charakterystykę wykorzystanej w badaniach rozwiniętej folii grzejnej z miniwgłębieniami uzyskanymi w procesie elektroerozji. Podczas badań serii 25 moduł z kanałem ustawiony był poziomo, położenie 0° (wybrano ustawienie kanału z powierzchnią grzejną jak najbliższe ustawieniu próbki w badaniach wrzenia w dużej objętości). Parametry geometryczne miniwgłębień na folii nieco zbliżone są do uzyskanych dla próbki 2 stosowanej w badaniach wrzenia w dużej objętości, choć najwyższe kratery mają dużo niższą wysokość (do 7 µm) w stosunku do wysokości kraterów próbki 2 (ponad 25 µm).



**Rys. 5.49.** Zależność współczynnika przejmowania ciepła w funkcji gęstości strumienia ciepła, uzyskana z badań dla wrzenia FC-72 podczas przepływu przez minikanał oraz badań wrzenia w dużej objętości; zastosowano rozwiniętą powierzchnię grzejną z miniwglębieniami

Do przeprowadzenia badań wrzenia w dużej objętości próbowano wytworzyć bardzo zbliżoną powierzchnię próbki do folii używanej w badaniach wrzenia w przepływie. Niestety próby nałożenia folii z miniwgłębieniami na powierzchnię miedzianej próbki nie udało się zakończyć z sukcesem. Zgrzanie folii z próbką w piecu próżniowym przebiegło pomyślnie, jednak podczas montażu folii do próbki nastąpiło częściowe odklejenie folii. Należy mieć zatem na względzie, że chociaż obie próbki zostały poddane jednakowo poprowadzonemu procesowi elektroerozji, to w badaniach wrzenia w dużej objętości zastosowano powierzchnię z miniwgłębieniami wytworzonymi na powierzchni miedzianej, a w badaniach wrzenia w przepływie miniwgłębienia wytworzono na folii z superstopu *Haynes-230*. Oba materiały charakteryzują różne własności elektryczne i cieplne (w tym współczynnik przewodzenia ciepła), które wywierają duży wpływ na wyniki końcowe.

Porównując wyniki otrzymane dla wrzenia w dużej objętości i wrzenia podczas przepływu w kanale, stwierdzono, że w warunkach inicjacji wrzenia kilkukrotnie wyższe współczynniki przejmowania ciepła uzyskiwane są dla wrzenia w dużej objętości. Przedstawione wstępne porównanie danych dla wrzenia w dużej objętości i wrzenia w przepływie należy traktować jako szacunkowe, gdyż oba wrzenia charakteryzują inne mechanizmy, które są szczególnie skomplikowane dla wrzenia w przepływie. Podczas rozwoju wrzenia w trakcie przepływu w kanałach, osiągane współczynniki przejmowania ciepła różnią się zasadniczo w zależności od rozpatrywanego położenia i strefy rozwoju wrzenia wzdłuż przepływu w kanale. W niniejszym rozdziale na rysunku 5.3b pokazano typową zależność lokalnego współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, kilka kolejnych zależności przedstawiono w załączniku D na rysunkach D.4 oraz od D.26 do D.30. W obszarze wrzenia przechłodzonego współczynniki osiągają niewielkie wartości, a następnie (gdy jest możliwy pomiar temperatury powierzchni grzejnej przy wykorzystaniu termografii ciekłokrystalicznej) obserwowane są wysokie wartości współczynnika, malejące wraz ze zwiększającym się udziałem pary w przepływającej mieszaninie cieczowo-parowej. Analizując przebieg krzywej zależności współczynnika przejmowania ciepła w funkcji gęstości strumienia ciepła dla wrzenia w przepływie sporządzonej w odległości 0,219 m i 0,254 m od wlotu (obszar wrzenia nasyconego) pokazanych na rysunku 5.49, można zaobserwować, że dla początkowej strefy wrzenia rozwiniętego, o stosunkowo małym udziale pary, współczynniki przejmowania ciepła są kilkakrotnie wyższe w porównaniu z otrzymanymi dla wrzenia w dużej objętości. Jednak już dla zależności sporządzonej w odległości 0,280 m od wlotu, gdzie udział pary w mieszaninie jest już znaczący, wartości współczynnika przejmowania ciepła okazują się znacznie niższe, nadal jednak wyższe w porównaniu do danych dla wrzenia w dużej objętości dla próbki 2. Należy mieć na uwadze, że wrzenie w dużej objętości zachodziło przy ciśnieniu atmosferycznym, natomiast przedstawiane wyniki dla wrzenia w przepływie uzyskano na niewielkim nadciśnieniu. Poza tym wpływ na wyniki współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie, oprócz ciśnienia, wywierają też inne parametry cieplno-przepływowe, takie jak wielkość strumienia masy czynnika, niedogrzanie do temperatury nasycenia na wlocie do kanału czy lokalne przegrzanie powierzchni grzejnej. Wpływ rozwiniętych powierzchni grzejnych w warunkach wrzenia w dużej objętości i wrzenia w przepływie w kanałach należałoby poddać dokładnej analizie w szeroko zakrojonych badaniach, dla wrzenia podczas przepływu w kanałach przy zmiennych warunkach cieplno-przepływowych, ciśnieniu atmosferycznym, i w obu badaniach powinno się stosować jednakowy materiał powierzchni grzejnej. Badania powinno się rozszerzyć na inne czynniki wrzące.

W wyniku analizy danych otrzymanych z badań dla wrzenia w dużej objętości, a omówionych w [Pastuszko i Piasecka, 2012] (badania dotyczyły nie tylko FC-72, ale również wody), stwierdzono, że wrzenie w dużej objętości występujące na powierzchniach wytworzonych w procesie elektroerozji, wymaga właściwego doboru parametrów geometrycznych dla poszczególnych cieczy wrzących. Mniejsze wymiary wgłębień są odpowiednie dla cieczy o niższym napięciu powierzchniowym (FC-72) i strumieni ciepła powyżej 25 kW.

## 5.7. PROPOZYCJA WŁASNEGO RÓWNANIA KRYTERIALNEGO

Równania, opisujące proces wymiany ciepła w przepływie przez kanały o wymiarach konwencjonalnych, nie są wystarczająco dokładne dla opisu zjawisk w kanałach, których wymiar jest zbliżony lub mniejszy od średnicy pęcherzyka pary. Istniejące w literaturze modele procesów wrzenia są przybliżeniami rzeczywistych warunków, ze względu na niepełną znajomość mechanizmów transportu ciepła i masy. Stąd proponowane zależności do obliczenia współczynnika przejmowania ciepła mają często empiryczny charakter i oparte są na teorii podobieństwa.

Przy opracowywaniu wyników własnych badań eksperymentalnych zastosowano następujące liczby podobieństwa:

- liczba Nusselta, uzyskana z eksperymentu, zgodnie z zależnością:

$$Nu_{exp}(x) = \frac{\alpha_{exp}(x) \cdot d_h}{\lambda_l}, \qquad (5.49)$$

gdzie:

 $\alpha_{exp}(x)$  – współczynnik przejmowania ciepła wyznaczony z równań (4.1) lub (4.2);

 liczba *Reynoldsa Re*, obliczana jako *Re<sub>l</sub>* w przypadku zależności dla inicjacji wrzenia, natomiast dla wrzenia rozwiniętego Re obliczana jest ze wzoru:

$$Re = \frac{G(1-X) \cdot d_h}{\mu_l},\tag{5.50}$$

przy czym stopień zapełnienia wyznaczono zgodnie z zależnością:

$$X(x) = \frac{1}{r} \cdot \left( \frac{q_w \cdot S_M \cdot x}{G \cdot A_M} \right); \tag{5.51}$$

- liczba Prandtla Pr, definiowana jako:

$$Pr = \frac{\mu_l \cdot c_{pl}}{\lambda_l}; \qquad (5.52)$$

- liczba wrzenia Bo, wyznaczana ze wzoru:

$$Bo = \frac{q_w}{G \cdot r};\tag{5.53}$$

- liczba Webera We, obliczana z następującej zależności:

$$We = \frac{u^2 \cdot \rho_l \cdot d_h}{\sigma_l}.$$
(5.54)

Parametry cieplno-fizyczne czynników chłodniczych określono: FC-72 i R-11 – na podstawie programu REFPROP oraz zaczerpniętych z literatury zależności wielomianowych, R-123 – przy wykorzystaniu zależności wielomianowych, zbudowanych na podstawie danych z [McLinden, 1995].

Na podstawie przeprowadzonej analizy wymiarowej otrzymano równanie kryterialne w postaci:

$$Nu_{prop} = C \cdot (Re \cdot Bo \cdot Pr)^{m_1} \cdot We^{m_2}.$$
(5.55)

Do równania (5.55) wprowadzono parametr rozwinięcia powierzchni grzejnej, jak również liczbę *Pecleta*, będącą iloczynem liczb *Reynoldsa* i *Prandtla*, zgodnie z zależnością:

$$Pe = Re \cdot Pr, \tag{5.56}$$

otrzymując postać:

$$Nu_{prop} = C \cdot \Gamma \cdot (Pe \cdot Bo)^{m_1} \cdot We^{m_2}.$$
(5.57)

Wartości stałej C oraz współczynników  $m_1$  i  $m_2$  obliczono stosując analizę regresji wielu zmiennych.

## 5.7.1. Zdefiniowanie parametru rozwinięcia powierzchni

Zdefiniowano parametr, który uwzględnia stopień rozwinięcia powierzchni  $\Gamma$ , zgodnie ze wzorem:

$$\Gamma = \frac{(1+A_s) \cdot H \cdot n \cdot \varepsilon}{A_f},$$
(5.58)

gdzie:

- $A_s$  udział wgłębień w analizowanym wycinku powierzchni rozwiniętej;
- H suma wysokości wgłębień na przyjętej do analizy długości powierzchni rozwiniętej, μm;
- $\varepsilon$  średnica lub najdłuższy wymiar wgłębienia na przyjętej do analizy długości powierzchni rozwiniętej, µm (najdłuższy jest równy wymiarowi analizowanego odcinka);
- n ilość wgłębień o najwyższych wymiarach, na przyjętej do analizy długości powierzchni rozwiniętej;
- $A_f$  powierzchnia rozwinięta,  $\mu m^2$ .

Powierzchnie z mikrowgłębieniami, wykonane laserowym teksturowaniem, omówiono szczegółowo w rozdziale 4, punkt 4.4.1. Mikrowgłębienia zostały rozmieszczone w odległości co 100  $\mu$ m, w obu osiach. Całkowita wysokość struktury mikrowgłębienia (teksturowanie 1) wraz z kraterem wynosi 10  $\mu$ m (tabela 4.1). W pracy [Piasecka i Maciejewska, 2012b] na postawie analizy powierzchni oszacowano, iż rozwinięcie powierzchni grzejnej z mikrowgłębieniami wynosi 6,28%. Dla celów obliczeniowych przyjęto model pojedynczego mikrowgłębienia, pokazany na rysunku 5.50.



Rys. 5.50. Matematyczny model pojedynczego mikrowgłębienia

Powierzchnie z miniwgłębieniami, otrzymane na drodze elektroerozji, omówiono szczegółowo w rozdziale 4, punkt 4.4.2. Głębokość struktury kraterowej zwykle jest niższa od 1 μm, a otrzymane miniwgłębienia są rozłożone nieregularnie na powierzchni. Na rysunku 5.51 przedstawiono zdjęcie i przekrój przez powiększoną próbkę powierzchni z miniwgłębieniami (rzeczywiste wymiary wycinka), analizowaną mikroskopem *Nikon Eclipse MA 200* wraz z cyfrową kamerą *Nikon DS-Fi1* i analizatorem powierzchni *NIS 3* (rozdzielczość 0,34 μm/pixel).



**Rys. 5.51.** Dane do analizy rozwinięcia powierzchni z miniwglębieniami: a) zdjęcie przykładowego wycinka powierzchni w rzeczywistej skali, b) obraz zbinaryzowany, c) przekrój przez przykładowy wycinek powierzchni (powiększony)

Zbinaryzowano obraz, aby rozpoznać granice pomiędzy strukturami powierzchni rozwiniętej, a następnie przeprowadzono analizę ilościową rozwinięcia powierzchni w programie *Techsystem Globe* (procedurę omówiono szczegółowo w punkcie 4.5.6 rozdziału 4). Otrzymano następujące wyniki analizy powierzchni z miniwgłębieniami, o wymiarach 100 µm x 100 µm:

- a) łączna powierzchnia miniwgłębień 130 622,27 μm<sup>2</sup>;
- b) udział procentowy miniwgłębień w analizowanym wycinku powierzchni rozwiniętej 27,49%.

Do wyznaczenia stopnia rozwinięcia badanych powierzchni podstawiono do wzoru:

- a) powierzchnię z mikrowgłębieniami:
  - $A_s = 0,0628, H = 10 \ \mu\text{m}, \varepsilon = 30 \ \mu\text{m}, n = 1, \text{ otrzymano wynik } \Gamma = 0,032;$
- b) powierzchnię z miniwgłębieniami:  $A_s = 0,2749, H = 2,2 \ \mu m, \ \varepsilon = 100 \ \mu m, \ n = 1, \text{ otrzymano wynik } \Gamma = 0,028.$

## 5.7.2. Równanie kryterialne dla wrzenia nasyconego

Dla wrzenia nasyconego otrzymano następującą postać równania (5.57), z uwzględnieniem parametru rozwinięcia powierzchni:

$$Nu_{prop\_sat} = 22,5 \cdot \Gamma \cdot (Pe \cdot Bo)^{0,64} \cdot We^{0,46}.$$
 (5.59)

Do zależności na liczbę *Pecleta* wprowadzono liczbę *Prandtla* dla fazy ciekłej oraz liczbę *Reynoldsa*, wyznaczaną zgodnie z równaniem (5.50). Tabela 5.4 zawiera podstawowe dane statystyczne dla rozważanego równania. Podano w niej standardowe wartości błędu  $\delta$  liczby *Nusselta* wyznaczonej z zależności (5.59). Przedstawiono również wartości współczynnika determinacji  $R^2$ , będące miarą dokładności dopasowania prostej regresji (w układzie logarytmicznym) oraz błąd standardowy  $\delta$ . W celu oszacowania wartości parametrów regresji uwzględniono 4 961 wyników pomiarów eksperymentalnych. Przedstawiona korelacja dotyczy badań wrzenia nasyconego FC-72 podczas przepływu przez minikanał o głębokości 1 mm, ogrzewany asymetrycznie, z rozwiniętą powierzchnią grzejną o niskim stopniu rozwinięcia (ok. 0,03). Dane dotyczą trzech orientacji przestrzennych kanału: pionowej (położenie 90°) oraz poziomych (położenie 0° i 180°). Planowane jest zweryfikowanie poprawności korelacji (5.59) dla wyższych stopni rozwinięcia powierzchni.

Liczbę  $Nu_{prop\_sat}$ , wyznaczoną ze wzoru (5.59) porównano z wyznaczoną eksperymentalnie  $Nu_{exp\_sat}$ , a rezultaty pokazano na rysunku 5.52. Wyniki otrzymane z analizowanego równania, z tolerancją ±35%, są zgodne z wynikami pomiarów dla 91% danych.

δ	$R^2$	Stała lub liczba podobieństwa	Współczynnik lub wykładnik	Wartość współ- czynnika lub wykładnika	Błąd oszaco- wania (błąd standardowy)	Współczynnik korelacji (Pearsona)
0,09	0,91	_	С	22,5	0,006	_
		Pe Bo	$m_1$	0,64	0,013	0,83
		We	<i>m</i> <sub>2</sub>	0,46	0,009	0,80

 TABELA 5.4. Dane statystyczne równania (5.59)



**Rys. 5.52.** Równanie (5.59) dla wrzenia nasyconego podczas przepływu FC-72 przez minikanał o głębokości 1 mm, z rozwiniętą powierzchnią grzejną o niskim stopniu rozwinięcia (ok. 0,03); dla danych uzyskanych przy trzech orientacjach przestrzennych kanału zastosowano różne znaczniki (opis w legendzie)

Równanie (5.59) sprawdzono w zakresie parametrów:

- $444 \le Re_l \le 1 130 (299 \le Re \le 866);$
- $5,13 \cdot 10^{-4} \le Bo \le 1,35 \cdot 10^{-3};$
- − 9,08 ≤  $Pr_l$  ≤ 11,60;
- $-1,23 \le We \le 6,25;$
- $-1,83 < (Pe \cdot Bo) < 10,3;$
- 0,14 < X < 0,48;
- dla powierzchni o stopniu rozwinięcia w zakresie  $0,028 < \Gamma < 0,032$ .

Wartości eksperymentalnie uzyskanej liczby *Nusselta* mieszczą się w zakresie  $28,68 \le Nu_{exp\_sat} \le 327,14$ .

#### 5.7.3. Zależności dla inicjacji wrzenia i wrzenia przechłodzonego

Dla inicjacji wrzenia i wrzenia przechłodzonego otrzymano następującą postać równania (5.57), z uwzględnieniem parametru rozwinięcia powierzchni:

$$Nu_{prop\_sub} = 5, 2 \cdot \Gamma^{-4} \cdot (Pe_l \cdot Bo)^{0,53} \cdot We^{0,12}.$$
 (5.60)

Do równania (5.60) wprowadzono liczby Re i Pr zdefiniowane dla fazy ciekłej.

Podstawowe dane statystyczne dla rozważanego równania (5.60) przedstawiono w tabeli 5.5. Opracowano je w podobny sposób jak dla równania (5.59), którego dane statystyczne zestawiono w tabeli 5.4.

δ	$R^2$	Stała lub liczba podobieństwa	Współczynnik lub wykładnik	Wartość współczynnika lub wykładnika	Błąd oszaco- wania (błąd standardowy)	Współczynnik korelacji (Pearsona)
0,10	0,69	_	С	5,2	0,007	_
		_	Г	4	0,630	0,25
		$Pe_l Bo$	<i>m</i> <sub>3</sub>	0,53	0,007	0,70
		We	$m_4$	0,12	0,006	0,06

 TABELA 5.5. Dane statystyczne równania (5.60)

W celu oszacowania wartości parametrów regresji uwzględniono 2 438 wyników pomiarów, przy czym większość danych (2 214 punktów) zgromadzono na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań na stanowisku badawczym poprzedniej konstrukcji, z wykorzystaniem czynników chłodniczych R-11, R-123 i FC-72, a dotyczących inicjacji wrzenia pęcherzykowego w kanale o gładkiej powierzchni grzejnej. Do wspomnianych danych dołączono wybrane dane z badań realizowanych na aktualnym stanowisku, dotyczących inicjacji wrzenia i obszaru wrzenia przechłodzonego (222 punkty). Liczbę  $Nu_{prop\_sub}$ , wyznaczoną ze wzoru (5.60) porównano z liczbą Nusselta wyznaczoną eksperymentalnie  $Nu_{exp\_sub}$ , przy czym rezultaty pokazano na rysunku 5.53.

Wyniki otrzymane z analizowanego równania, z tolerancją  $\pm 35\%$ , są zgodne z wynikami pomiarów dla ponad 84% danych. Przedstawiona korelacja dotyczy badań inicjacji wrzenia i wrzenia przechłodzonego w przepływie przez kanał prostokątnych o głębokościach 0,7 mm, 1 mm oraz 1,5 mm, szerokościach 20 mm i 40 mm, o zmiennej orientacji przestrzennej, dla trzech płynów chłodniczych (R-11, R-123 i FC-72).



**Rys. 5.53.** Równanie (5.60) dla inicjacji wrzenia i wrzenia przechłodzonego R-123, R-11 i FC-72 w kanale o głębokości 0,7÷1,5 mm o różnej orientacji przestrzennej, kanał ogrzewany asymetrycznie powierzchnią gładką i rozwiniętą; rozróżniono dane uzyskane na stanowisku badawczym poprzedniej konstrukcji oraz na aktualnym stanowisku

Równanie (5.60) sprawdzono w zakresie parametrów:

- $-411 \le Re_l \le 4703;$
- $-1,21\cdot 10^{-4} \le Bo \le 1,86\cdot 10^{-3};$
- $-2,86 \le Pr_l \le 15,46;$
- $0,19 \le We \le 11,79;$
- $0,99 < (Pe_l \cdot Bo) < 15,23;$
- $0 < \Gamma < 0.032.$

Wartości eksperymentalnie otrzymanej liczby *Nusselta* mieszczą się w zakresie  $4,15 \le Nu_{exp \ sub} \le 49,34$ .

Równanie (5.60) stanowi modyfikację korelacji zaproponowanych wcześniej, m.in. w [Piasecka, 2004, 2006; Piasecka i inni, 2004], a dotyczących wyłącznie inicjacji wrzenia w minikanale o gładkiej powierzchni grzejnej.

Na rysunku 5.54 zestawiono wyniki zaproponowanej zależności (5.60) oraz równania Dittusa-Boeltera (2.7), przekształconego do postaci:

$$Nu_{theor D-B} = 0,023 \cdot Re_l^{0,8} \cdot Pr_l^{0,4}.$$
 (5.61)

Zaobserwowano dużą zgodność danych otrzymanych z proponowanego równania, w porównaniu z danymi uzyskanymi z empirycznej korelacji *Dittusa-Boeltera*, wykorzystywanej dla opisu wymiany ciepła podczas konwekcji wymuszonej w kanałach, w warunkach przepływu turbulentnego. Większość danych dotyczyła inicjacji wrzenia, która rozpoczyna wzrost współczynnika przejmowania ciepła. W poprzedzającym inicjację obszarze konwekcji jednofazowej obserwowano spadek wartości współczynnika. Zatem na przyjęte do analizy dane składały się minimalne wartości współczynnika przejmowania ciepła wyznaczonego na drodze eksperymentu i okazały się one zbliżone do wartości współczynnika przejmowania ciepła dla konwekcji jednofazowej podczas przepływu przez kanały o wymiarach konwencjonalnych (wyznaczonych z równania *Dittusa-Boeltera*). Część danych eksperymentalnych uzyskano w warunkach przepływu turbulentnego. Należy zwrócić uwagę, że w literaturze można odnaleźć sugerowane znacznie niższe wartości dolnej krytycznej liczby Reynoldsa (wartość ok. 1 000÷1 500) dla kanałów o niewielkiej średnicy hydraulicznej, w stosunku do powszechnie uznawanych w literaturze (wartość ok. 2 300). Być może intensyfikacja wymiany ciepła podczas inicjacji wrzenia może dawać zbliżone efekty, jak zmiana charakteru przepływu w kanale.



**Rys. 5.54.** Porównanie otrzymanych wyników z równania (5.60) z wybranym z literatury równaniem Dittusa-Boeltera (5.61)

#### 5.8. PODSUMOWANIE

W rozdziale omówiono wyniki otrzymane z własnych badań eksperymentalnych, przeprowadzonych przy wykorzystaniu termografii ciekłokrystalicznej do detekcji rozkładu temperatury powierzchni grzejnej o powierzchni rozwiniętej, do której doprowadzano strumień ciepła, przy równoczesnej rejestracji obrazów struktur przepływu dwufazowego w minikanale, ustawianym pod różnym kątem do poziomu. Głównym przedmiotem zainteresowania był przebieg procesu wymiany ciepła podczas rozwoju wrzenia czynnika chłodniczego w kanale, opory przepływu dwufazowego oraz identyfikacja struktur przepływu i zbadanie wpływu wybranych czynników na wymienione zagadnienia. Pomiary rozkładu temperatury powierzchni grzejnej pozwoliły uzależnić rejestrowany stopień zapełnienia od lokalnej temperatury powierzchni grzejnej. Wyniki przedstawiono głównie jako zależności współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, krzywych wrzenia oraz map struktur przepływu.

Zaobserwowano, że rozwojowi wrzenia towarzyszy wzrost temperatury powierzchni grzejnej i spadek wartości współczynników przejmowania ciepła wraz ze wzrostem udziału pary w mieszaninie przepływającej przez kanał. Wartości lokalnych współczynników przejmowania ciepła podczas rozwoju wrzenia okazały się kilku-, a nawet kilkudziesięciokrotnie wyższe (obszar rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego), w porównaniu do otrzymanych podczas inicjacji wrzenia i konwekcji jednofazowej.

Przeprowadzono analizę spadku ciśnienia podczas przepływu dwufazowego dla pionowej i poziomych orientacji przestrzennych, na podstawie danych eksperymentalnych i dostępnych w literaturze modeli (homogeniczny, rozdzielony). Stwierdzono, że jedynie dla kanału pionowego (położenie 90°), większość wyników eksperymentalnych oporów przepływu mieści się w granicy błędów  $\pm 30\%$ .

Rozpoznano struktury przepływu dwufazowego w kanale oraz określono udziały fazy ciekłej i parowej. Pozwoliło to na wyznaczenie stopnia zapełnienia fazy parowej oraz stopnia suchości w zależności od zmiennej orientacji przestrzennej kanału. Skonstruowano mapy struktur przepływu dwufazowego w różnych położeniach kanału. Przedyskutowano wpływ rodzaju zastosowanej powierzchni grzejnej i orientacji kanału na rozwój wrzenia i opory przepływu. Analiza dotyczyła również wpływu wybranych parametrów geometrycznych kanału (głębokość i szerokość) oraz cieplno-przepływowych (ciśnienie na wlocie i prędkość przepływu) na rozwój procesu wrzenia w kanale. Stwierdzono, że największy wpływ na formowanie struktur wywiera orientacja przestrzenna kanału. Zastosowanie rozwinietej powierzchni grzejnej spowodowało wzrost współczynnika przejmowania ciepła od kilku do kilkudziesięciu procent (niemal dwukrotne dla najwyższych wartości współczynnika), w stosunku do powierzchni gładkiej. Powierzchnie z mikrowgłębieniami rozmieszczonymi równomiernie, pozwoliły na uzyskanie wyższych wartości współczynnika przejmowania ciepła niż powierzchnie z rozmieszczonymi w sposób nieregularny mikrowgłębieniami.

Porównano własne wyniki z wybranymi z literatury. Zastosowano korelacje innych badaczy opisujące wymianę ciepła przy wrzeniu do opisu własnych danych. Stwierdzono, że większość korelacji pozwala prognozować współczynnik przejmowania ciepła w uznawanej granicy błędów (±35%), jedynie w określonych położeniach kanału. Porównano współczynniki przejmowania ciepła otrzymane podczas własnych badań wrzenia w przepływie i dużej objętości. Zaproponowano własne równania kryterialne do wyznaczania liczby *Nusselta* podczas wrzenia czynników chłodniczych w minikanałach ogrzewanych asymetrycznie powierzchnią rozwiniętą. W równaniu tym stosować należy sugerowane wartości współczynników w zależności od wyróżnionych dwóch obszarów wrzenia: inicjacji wrzenia i wrzenia przechłodzonego kanałach oraz wrzenia nasyconego.

# **6** WNIOSKI I WYTYCZNE DO PRZYSZŁYCH BADAŃ

# 6.1. WNIOSKI Z WYKONANYCH BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH I ANALIZ TEORETYCZNYCH

- W pracy przedstawiono identyfikację zjawisk związanych z rozwojem wrzenia pęcherzykowego czynników chłodniczych (FC-72, Novec 7100) w kanale o różnych wymiarach przekroju prostokątnego i zmiennej orientacji przestrzennej.
- Powierzchnię grzejną kanału stanowiła jednostronnie rozwinięta metalowa folia. Do uzyskania rozwinięcia jej powierzchni wykorzystano dwa różne procesy: teksturowanie laserowe (wynikowo uzyskano mikrowgłębienia rozmieszczone regularnie) oraz proces elektroerozji (wytworzono miniwgłębienia rozmieszczone nieregularnie).
- W badaniach doświadczalnych symultanicznie rejestrowano dwuwymiarowe pole temperatury powierzchni grzejnej oraz struktury przepływu dwufazowego w kanale. Pomiary rozkładu temperatury powierzchni grzejnej, za pomocą termografii ciekłokrystalicznej, pozwoliły uzależnić rejestrowany stopień zapełnienia od lokalnej temperatury powierzchni grzejnej.
- Zaobserwowano, że podczas wrzenia w przepływie przez kanał, inicjację wrzenia obserwuje się jako nagły spadek temperatury powierzchni grzejnej przy stałym strumieniu ciepła. Jest to tzw. front wrzenia, przesuwający się w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu wraz ze zwiększaniem strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej. Towarzyszy mu zjawisko histerezy nukleacji, charakterystyczne dla płynów chłodniczych. Podczas inicjacji wrzenia dochodzi do wzrostu wartości współczynnika przejmowania ciepła, chociaż jego wartości są niewiele wyższe niż dla konwekcji. Doprowadzanie strumienia ciepła do powierzchni grzejnej powoduje dalszy wzrost temperatury powierzchni grzejnej, rozwój procesu wrzenia pęcherzykowego, któremu towarzyszy duży wzrost wartości współczynnika przejmowania ciepła, a następnie spadek jego wartości wraz ze wzrostem udziału pary w mieszaninie przepływającej przez kanał. Wartości lokalnych współczynników przejmowania ciepła podczas rozwoju wrzenia okazały się kilku-, a nawet kilkudziesięciokrotnie wyższe (obszar rozwinietego wrzenia pecherzykowego), w porównaniu do otrzymanych podczas inicjacji wrzenia i konwekcji jednofazowej.
- W badaniach, oprócz orientacji i parametrów geometrycznych kanału oraz rodzaju rozwinięcia jego powierzchni grzejnej, uzmienniano parametry cieplnoprzepływowe (strumień masy oraz ciśnienie na wlocie do kanału). Zbadano

wpływ wymienionych parametrów na rozwój wrzenia w kanale i opory przepływu dwufazowego. W analizie uwzględniono rodzaj zastosowanego czynnika chłodniczego.

- Przeprowadzono analizę oporów przepływu dwufazowego dla pionowej i poziomych orientacji przestrzennych kanału, na podstawie własnych danych eksperymentalnych i modeli teoretycznych (homogeniczny, rozdzielony). Stwierdzono, że jedynie dla kanału pionowego (położenie 90°), ponad połowa wyników własnych badań eksperymentalnych mieści się w granicy błędów ±30%. Nieco niższą zgodność uzyskano dla kanału poziomego (położenie 0°), a najniższe – dla położenia 180°. Wyniki z eksperymentów, dla większości analizowanych przypadków, osiągnęły wartości zbliżone do uzyskanych z modeli teoretycznych.
- Rozpoznano struktury przepływu dwufazowego w kanale, określono udziały fazy ciekłej i parowej oraz skonstruowano mapy struktur przepływu dwufazowego. Wartości wyznaczonych eksperymentalnie stopni zapełnienia różniły się znacznie w zależności od orientacji przestrzennej kanału. Porównano je z otrzymanymi na drodze obliczeń teoretycznych.
- Stwierdzono, że największy wpływ na rodzaj powstających struktur przepływu dwufazowego wywiera orientacja przestrzenna kanału. Dla poziomego ustawienia kanału (położenie 0°) i pionowego ustawienia kanału (położenie 90°) zaobserwowano struktury: pęcherzykową, pęcherzykowo-korkową, korkową i korkowo-mgłową. Dla poziomego ustawienia kanału (położenie 180°) zaobserwowano dodatkowo strukturę mgłową. Struktura korkowo-mgłowa wykazywała odmienny wygląd i charakter, w zależności od ustawienia kanału.
- Wpływ na charakter i wygląd struktur przepływu wywiera również rodzaj rozwinięcia powierzchni grzejnej. W porównaniu do struktur obserwowanych w eksperymentach z wykorzystaniem gładkiej folii grzejnej, uzyskiwane w niniejszych badaniach pęcherzyki są znacznie bardziej rozdrobnione.
- Przeprowadzono analizę wpływu rodzaju powierzchni rozwiniętej i położenia kanału na rozwój wrzenia i opory przepływu, w tym określono wpływ: na współczynnik przejmowania ciepła, wyznaczony eksperymentalnie spadek ciśnienia, krzywe wrzenia, stopień zapełnienia i mapy struktur przepływu dwufazowego. Oprócz podobnych do znanych z literatury i najczęściej podawanych typowych przebiegów krzywych wrzenia z jednostopniową *histerezą nukleacji*, zaobserwowano również kilkustopniowy "krokowy" przebieg tego zjawiska. Stwierdzono, że inicjacja i rozwój wrzenia przy zastosowaniu powierzchni rozwiniętej następuje przy zdecydowanie niższych (do 30%) strumieniach ciepła dostarczanych do powierzchni grzejnej, w porównaniu do wyników uzyskanych dla folii gładkiej. Zastosowanie rozwiniętej powierzchni grzejnej spowodowało wzrost współczynnika przejmowania ciepła od kilku do kilkudziesięciu procent (niemal dwukrotne dla najwyższych wartości współczynnika), w stosunku do powierzchni gładkiej. Powierzchnie z mikrowgłębieniami roz-

mieszczonymi równomiernie, pozwoliły na uzyskanie wyższych wartości współczynnika przejmowania ciepła niż powierzchnie z rozmieszczonymi w sposób nieregularny mikrowgłębieniami.

- Porównano własne wyniki z wybranymi z literatury. Zastosowano korelacje innych badaczy opisujące wymianę ciepła przy wrzeniu do opisu własnych danych. Stwierdzono, że niektóre korelacje ze stosunkowo dobrym przybliżeniem pozwalają prognozować wartości współczynnika, ale często tylko dla określonego położenia kanału. Zależnościami, które można stosować dla minikanału pionowego (położenie 90°) i poziomego (położenie 0)° z uznawaną granicą błędów (±35%) są korelacje: *Shaha, Kandlikara* i *Steinke, Mikielewicza* i innych oraz *Dutkowskiego*. Warte podkreślenia jest spostrzeżenie, że dla kanału poziomego (położenie 180°) dobrą zgodność wyników eksperymentalnych (wartość błędu 26%), uzyskano przy zastosowaniu korelacji *Coopera* – przeznaczonej dla wrzenia w dużej objętości.
- Porównano współczynniki przejmowania ciepła otrzymane podczas własnych badań wrzenia w przepływie i dużej objętości, przy czym w badaniach wykorzystano rozwinięte powierzchnie grzejne, o podobnych parametrach geometrycznych.
- Zaproponowano własne równanie kryterialne do obliczania liczby Nusselta o współczynnikach zróżnicowanych dla inicjacji i wrzenia przechłodzonego oraz wrzenia nasyconego, w oparciu o bezwymiarowe liczby podobieństwa: Pecleta, wrzenia oraz Webera. Do równania wprowadzono bezwymiarowy parametr, uwzględniający stopień rozwinięcia powierzchni grzejnej. Wyniki porównano z otrzymanymi ze znanych równań funkcjonujących w literaturze, otrzymując dużą zgodność równania z równaniem Dittusa-Boeltera, dotyczącego przepływu jednofazowego (dotyczy postaci równania przeznaczonej do opisu wymiany ciepła podczas inicjacji wrzenia i wrzenia przechłodzonego).
- W związku z pracami nad strukturami intensyfikującymi wymianę ciepła przy wrzeniu uzyskano patent PL pt. *Struktura intensyfikująca wymianę ciepła przy* wrzeniu, nr 217287.
- Przedstawiono propozycje praktycznego wykorzystania powierzchni rozwiniętych, w tym koncepcje oraz prototypy urządzeń, w wyniku udziału autorki w programie stażowym.

## 6.2. WYTYCZNE DO PRZYSZŁYCH BADAŃ

Badania eksperymentalne, analizy teoretyczne i aspekty wykorzystania praktycznego zdobytej wiedzy będą kontynuowane. W szczególności przewiduje się działania:

- zmianę geometrii modułu pomiarowego i rozszerzenie badań na miniprzestrzenie z rozwiniętą powierzchnią grzejną (kanał pierścieniowy);
- jednoczesny pomiar temperatury powierzchni grzejnej różnymi technikami (termografia ciekłokrystaliczna, termowizja oraz punktowy pomiar temperatury przy wykorzystaniu termoelementów), w celu weryfikacji otrzymanych wyników oraz ewentualnego uproszczenia stosowanych dotychczas metod;
- zastosowanie powierzchni rozwiniętych o wyższym stopniu porowatości w stosunku do testowanych powierzchni rozwiniętych, w tym metalowo-włóknistych powierzchni spiekanych oraz spiekanych proszków miedzianych w piecu próżniowym (planowana porowatość powierzchni do 60%);
- wykonanie rozszerzonych porównawczych badań wrzenia w przepływie i wrzenia w dużej objętości przy wykorzystaniu jednakowych grzejnych powierzchni rozwiniętych, przy zastosowaniu różnych czynników wrzących (płyny chłodnicze, woda, alkohol etylowy), a następnie analiza lokalnych współczynników przejmowania ciepła;
- badania wrzenia w przepływie przez miniprzestrzenie w zakresie przepływu turbulentnego i w rozszerzonym zakresie zmian ciśnienia, w celu zidentyfikowania wpływu tych czynników na lokalną wartość współczynnika przejmowania ciepła i kształt krzywych wrzenia;
- zastosowanie do badań wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie przez miniprzestrzenie cieczy wrzących o różnych właściwościach termodynamicznych celem ustalenia wpływu tych właściwości na proces wrzenia (oprócz czynników chłodniczych planuje się użycie wody i alkoholu etylowego);
- powiązanie pomiarów temperatury powierzchni grzejnej oraz rejestracji struktur przepływu dwufazowego celem symultanicznej akwizycji wszystkich danych, co pozwoli na możliwość prowadzenia pomiarów w stanie nieustalonym;
- zaproponowanie uniwersalnej korelacji do prognozowania wymiany ciepła podczas wrzenia w miniprzestrzeniach o różnej orientacji przestrzennej, uwzględniającej parametr rozwinięcia powierzchni;
- utworzenie modelu inicjacji i rozwoju wrzenia pęcherzykowego w powiązaniu z przepływem dwufazowym w miniprzestrzeni;
- wykorzystanie metod analityczno-numerycznych do wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła z warunku brzegowego trzeciego rodzaju, prowadzenie obliczeń numerycznych również we współrzędnych cylindrycznych;

 kompleksowe badania na układach z kolektorami słonecznymi o rozwiniętych powierzchniach absorberów, w konstrukcji wykorzystujące minikanały oraz ogniwa fotowoltaiczne.

Praca powstała w ramach projektów badawczych NCN: numer N N512 354037 oraz projektu o numerze umowy UMO-2013/09/B/ST8/02825, realizowanych pod kierownictwem dr inż. Magdaleny Piaseckiej.

Projekt NCN, nr umowy UMO-2013/09/B/ST8/02825 został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2013/09/B/ST8/02825.

# Literatura

Agostini B., Thome J.R., 2005, *Comparison of extended database if flow boiling heat transfer coefficient in multi-microchannel elements with the three-zone model*, Proc. ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, II Ciocco, Castelvecchio Pascoli, Italy, CD, No. 25, pp. 8.

Agostini B., Bontemps A., 2005, *Vertical flow boiling of refrigerant R134a in small channels*, International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 26, pp. 296–306.

Ali R., Palm B., Maqbool M.H., 2011, *Flow boiling heat transfer characteristics of a minichannel up to dryout condition*, Journal of Heat Transfer, vol. 133, No. 8, paper 081501, 10 pages.

Ali R., Palm B., Maqbool M.H., 2012, *Flow boiling heat transfer of refrigerants R134a and R245fa in a horizontal micro-channel*, Experimental Heat Transfer, vol. 25, No. 3, pp. 181–196.

Ammerman C., You S., 1998, *Enhanced convective boiling of FC-87 in small, rectangular, horizontal channels: heat transfer coefficient and CHF*, ASME Heat Transfer Division, vol. 357, pp. 225–233.

Ammerman C.N., You S.M., 2001, *Enhancing small-channel convective boiling performance using a microporous surface coating*, Journal of Heat Transfer, vol. 123, pp. 976–983.

Antoszewski B., 2010, Warstwy powierzchniowe z teksturą: kształtowanie wybranymi technologiami wiązkowymi oraz właściwości tribologiczne, seria: Monografie, studia, rozprawy, Nr M33, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.

Bai T., Tang T., Tang B., 2013, *Enhanced flow boiling in parallel microchannels with metallic porous coating*, Applied Thermal Engineering, vol. 58, pp. 291–297.

Baldassari Ch., Mameli M., Marengo M., 2012, *Experimental analysis of heterogeneous non uniform flow boiling of R-134a inside a glass minichannel*, Proc. ECI 8th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer 2012, Lausanne, Switzerland, paper No. 1493, pp. 8.

Bao Z.Y., Fletcher D.F., Haynes B.S., 2000a, *An experimental study of gas-liquid flow in narrow conduit*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 43, pp. 2313–2324.

Bao Z.Y., Fletcher D.F., Haynes B.S., 2000b, *Flow boiling heat transfer of Freon R11 and HCFC123 in narrow passages*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 43, pp. 3347–3358.

Bertsch S.S., Groll E.A., Garimella S.V., 2009, *Refrigerant flow boiling heat transfer in parallel microchannels as a function of local vapor quality*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 51, pp. 4775–4787.

Bilicki Z., 1983, *Latent heat transport in forced boiling flow*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 26, pp. 559–565.

Bilicki Z., 1997, *The relation between the experiment and theory for nucleate forced boiling*, Proc. 4<sup>th</sup> World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Brussels, Belgium, vol. 2, pp. 571–578.

Bohdal T., 1985, *Analiza wymiany ciepła podczas zerowego kryzysu wrzenia*, Chłodnictwo, tom 7, s. 6–10.

Bohdal T., 2000, *Bubbly boiling of environment-friendly refrigerating media*, International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 21, No. 4, pp. 449–455.

Bohdal T., 2001a, *Development of bubbly boiling in channel flow*, Experimental Heat Transfer, vol. 4, pp. 199–215.

Bohdal T., 2001b, *Zjawiska wrzenia pęcherzykowego czynników chłodniczych*, Monografia nr 76, Wydział Mechaniczny, Wydawnictwo Uczelaniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.

Bohdal T., Charun, H., Sikora M., 2011, *Comparative investigations of the condensation of R134a and R404A refrigerants in pipe minichannels*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 54, pp. 1963–1974.

Bohdal T., Kuczyński W., 2011, *Boiling of R404A refrigeration medium under the conditions of periodically generated disturbances*, Heat Transfer Engineering, vol. 32, No. 5, pp. 359–368.

Bohdal T., Kuczyński W., 2004, *Investigation of boiling of refrigerating medium under conditions of impulse disturbances*, Experimental Heat Transfer, vol. 17, No. 2, pp. 103–117.

Bohdal T., Kuczyński W., 2005, *Investigation of boiling of refrigeration medium under periodic disturbance conditions*, Experimental Heat Transfer, vol. 18, No. 3, pp. 135–151.

Bohdal T., Matysko R., 2006, *Condensation of a refrigeration medium in the presence of an inert gas*, Applied Thermal Engineering, vol. 26, No. 16, pp. 1942–1950.

Brauner N., Moalem-Maron D., 1992, *Identification of the range of small diameter conduits regarding two-phase flow pattern transitions*, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 19, 29–39.

Brutin D., Tadrist L., 2004, *Pressure drop and heat transfer analysis of flow boiling in a minichannel; influence of the inlet condition on two phase flow stability*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 47, pp. 2365–2377.

Cheng L., Mewes D., 2006, *Review of two-phase flow and flow boiling of mixtures in small and mini channels*, International Journal of Multiphase Flow, vol. 32, pp. 183–207.

Chin, Y., 1997, *An experimental study on flow boiling in narrow channel: from convection to nucleate boiling*, Ph. D. Dissertation, Dept. Mechanical Engineering, University of Houston, USA.

Chin Y., Hollingsworth D.K., Witte L.C., 1998a, *A study of convection in an asymmetrically heated duct using liquid crystal thermography*, ASME – Heat Transfer Division, vol. 357-2, pp. 63–70.

Chin Y., Witte L.C., Hollingsworth D.K., 1998b, *Investigation of flow boiling incipience in a narrow rectangular channel using liquid crystal thermography*, ASME – Heat Transfer Division, vol. 357-3, pp. 79–86.

Chisholm D., 1967, *A theoretical basis for the Lockhart–Martinelli correlation for two-phase flow*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 10, pp. 1767–1778.

Ciałkowski M.J., Frąckowiak A., 2002, Funkcje cieplne i ich zastosowanie do rozwiązywania zagadnień przewodzenia ciepła i mechaniki, Politechnika Poznańska, Poznań.

Cieśliński J.T., 2011, *Flow and pool boiling on porous coated surfaces*, Reviews in Chemical Engineering, vol. 27, pp. 179–190.

Cieśliński, J.T., 2002, *Nucleate pool boiling on porous metallic coatings*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 25, No. 7, pp. 557–564.

Cieśliński J., Krasowski K., 2013, *Heat transfer during pool boiling of water, methanol, and R141B on porous coated horizontal tube bundles*, Journal of Enhanced Heat Transfer, vol. 20, No. 2, pp. 165–177.

Collier J.G., 1981, *Convective boiling and condensation*, 1nd Edition, McGraw Hill Int. Book Company.

Collings P.J., 1990, *Liquid crystals. Nature's delicate phase of matter*, Princeton, Princeton University Press.

Cooper M.G., 1984, *Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling – a wide ranging examination using reduced properties*, Advances in Heat Transfer, vol. 16, pp. 157–239.

Daniel E., Hollingsworth D.K., Witte L.C., 2006, *Transition from boiling onset to fully developed nucleate boiling in a narrow vertical channel*, Proc. ECI International Conference on Boiling Heat Transfer, Spoleto, Italy, CD-No.112.

Dawidowicz B., Cieśliński J., 2012, *Heat transfer and pressure drop during flow boiling of pure refrigerants and refrigerant/oil mixtures in tube with porous coating*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, No. 9-10, pp. 2549–2558.

Dutkowski K., 2010a, Air-water two-phase frictional pressure drop in minichannels, Heat Transfer Engineering, vol. 31, pp. 321–330.

Dupont V., Thome J.R., 2004, *Evaporation in microchannels; influence of the channel diameter on heat transfer*, Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference of Microchannels and Minichannels, Rochester, NY, USA, pp. 461–468.

Dutkowski K., 2008, *Experimental investigations of Poiseuille number laminar flow of water and air in minichannels*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 51, pp. 5983–5990.

Dutkowski K., 2010b, *Influence of the flashing phenomenon on the boiling curve of refrigerant R134a in minichannels*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 53, pp. 1036–1043.

Dutkowski K., 2009, *Two-phase pressure drop of air-water in minichannels*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 52, pp. 5185–5192.

Dutkowski K., 2011, *Wymiana ciepła i opory przepływu czynników jednoi dwufazowych w minikanałach*, Monografia nr 192, Wydział Mechaniczny, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.

Farina D.J., Hacker J.M., Moffat R.J., Eaton J.K., 1993, *Illuminant invariant calibration of thermochromic liquid crystals*, ASME Heat Transfer Division, vol. 252, Visualization of Heat Transfer Processes, pp. 1–11.

Grysa K., Hożejowska S., Maciejewska B., 2012, *Adjustment calculus and Trefftz functions applied to local heat transfer coefficient determination in a minichannel,* Journal of Theoretical and Applied Mechanics, vol. 50, No. 4, pp. 1087–1096.

Gungor K.E., Winterton R.H.S., 1986, *A general correlation for flow boiling in tubes and annuli*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 29, pp. 351–358.

Gungor K.E., Winterton R.H.S., 1987, *Simplified general correlation for saturated flow boiling and comparisons with data*, Chemical Engineering Research and Design, vol. 65, pp. 148–156.

Hapke I., Boye H., Schmidt J., 2000, *Onset of nucleate boiling in minichannels*, International Journal of Thermal Sciences, vol. 39, pp. 505–513.

Harirchian T., Garimella S.V., 2010, *A comprehensive flow regime map for microchannel flow boiling with quantitative transition criteria*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 53, pp. 2694–2702.

Harirchian T., Garimella S.V., 2008, *Microchannel size effects on local flow boiling heat transfer to a dielectric fluid*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 51, pp. 3724–3735.

Hay J.L., Hollingsworth D.K., 1996, *A comparison of trichromic systems for use in the calibration of polymer-dispersed thermochromic liquid crystals*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 12, pp. 1–12.

Hay J.L., Hollingsworth D.K., 1998, *Calibration of micro-encapsulated liquid crystals using hue angle and a dimensionless temperature*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 18, pp. 251–257.

Hollingsworth D.K., 2003, *Application of liquid crystal thermography to flow boiling heat transfer in minichannels*, Proc. 5<sup>th</sup> International Conference on Boiling Heat Transfer, Montego Bay, Jamaica, pp.10.

Hollingsworth D.K., 2004, *Liquid crystal imaging of flow boiling in minichannels*, Proc. 2nd International Conference on Microchannels and Minichannels, Rochester, NY, USA, pp. 57–66.

Holman J.P., 1989, Experimental methods for engineers. New York, McGraw-Hill.

Hożejowska S., Kaniowski R., Poniewski M.E., 2014a, *Application of adjustment calculus to the Trefftz method for calculating temperature field of the boiling liquid flowing in a minichannel*, International Journal of Numerical Methods in Heat and Fluid Flow, No. 8 (in print).

Hożejowska S., Maciejewska B., Piasecka M., 2014b, Zastosowanie funkcji Trefftza do wyznaczania pół temperatury i współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie, Monografie, studia, rozprawy, Nr 62 Seria Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2014.

Hożejowska S., Maciejewska B., Hożejowski L., 2014c, *Application of adjustment calculus in the nodeless Trefftz method for a problem of two-dimensional temperature field of the boiling liquid flowing in a minichannel*, European Physical Journal Web of Conferences, vol. 67, paper 02037, DOI. http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20146702037.

Hożejowska S., Piasecka M., 2013, *Numerical modeling of temperature fields in the flow boiling liquid through a vertical minichannel with an enhanced heating surface*, Proc. International Conference on Experimental Fluid Mechanics 2013, Kutná Hora, Czech Republic, pp. 261–264.

Hożejowska S., Piasecka M, Hożejowski L., 2013, *Trefftz method for solving twodimensional temperature field of boiling fluid flowing along the minichannel*, The European Physical Journal Web of Conference, vol. 45, paper No. 01040, pp. 7.

Hożejowska S., Piasecka M., Poniewski M.E., 2009, *Boiling heat transfer in vertical minichannels. Liquid crystal experiments and numerical investigations*, International Journal of Thermal Sciences, vol. 48, pp.1049–1059.

Hożejowska S., Piasecka M., Poniewski M.E., 2002, *One- and two-dimensional models for local flow boiling heat transfer coefficient determination in narrow channel*, Proc. 3rd International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems – HEAT 2002, Baranów Sandomierski, pp. 307–314.

Huo X., Chen L., Tian Y.S., Karayiannis T.G., 2004, *Flow boiling and flow regimes in small diameter*, Applied Thermal Engineering, vol. 24, pp. 1225–1239.

Jones B.J., Garimella S.V, 2010, *Surface roughness effects on flow boiling in microchannels*, Proc. the ASME InterPack Conference 2009, vol. 2, pp. 409–418.

Kandlikar S.G., 1990, *A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes*, ASME Journal of Heat Transfer, vol. 112, pp. 219–228.

Kandlikar S.G., 2002a, *Fundamental issues related to flow boiling in minichannels nad microchannels*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 26, pp. 389–407.

Kandlikar S.G., 2004, *Heat transfer mechanisms during flow boiling in microchannels*, Journal of Heat Transfer, vol. 126, pp. 8–16.

Kandlikar S.G., 2002b, *Two-phase flow patterns, pressure drop, and heat transfer during boiling in minichannel flow passages of compact evaporators*, Heat Transfer Engineering, vol. 23, pp. 5–23.

Kandlikar S.G., Balasubramanian P., 2004, *An extension of the flow boiling correlation to transition, laminar, and deep laminar flows in minichannels and microchannels*, Heat Transfer Engineering, vol. 25, No. 3, pp. 86–93.

Kandlikar S.G., Steinke M.E., 2002, *Flow boiling heat transfer coefficient in minichannels – correlation and trends*, Proc. 12th International Heat Transfer Conference, Grenoble, France, Paper No. 1178.

Kandlikar S.G., Willistein D.A., Borrelli J., 2005, *Nucleation sites for stabilizing flow boiling in minichannels and microchannels*, Proc. 3rd International Conference on Microchannels and Minichannels, Toronto, Ontario, Canada, CD, pp. 10.

Kaniowski R., 2011, *Analiza struktur przepływu dwufazowego w minikanale asymetrycznie ogrzewanym*, praca doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii.

Kasagi N., Moffat R.J., Hirata M., 1989, *Liquid crystals. Handbook of flow visualization*. Hemisphere Public Corporation.

Kew P.A., Cornwell K., 1997, *Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small diameter channels*, Applied Thermal Engineering, vol. 17, pp. 705–715.

Khanikar V., Mudawar I., Fisher T., 2009, *Effects of carbon nanotube coating on flow boiling in a micro-channel*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 52, pp. 3805–3817.

Kosar A., Kuo C.-J., Peles Y., 2005a, *Boiling heat transfer in rectangular microchannels with reentrant cavities*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp. 4867–4886.

Kosar A., Kuo C.-J., Peles Y., 2005b, *Reduced pressure boiling heat transfer in rectangular microchannels with interconnected reentrant cavities*, Journal of Heat Transfer, vol. 127, pp. 1106–1114.

Kuczyński W., Bohdal T., Charun H., 2013, *Impact of periodically generated hydrodynamic disturbances on the condensation efficiency of R134a refrigerant in pipe mini-channels*, Experimental Heat Transfer, vol. 26, No. 1, pp. 64–84.

Kuczyński W., Charun H., Bohdal T., 2012, *Influence of hydrodynamic instability* on the heat transfer coefficient during condensation of R134a and R404A refrigerants in pipe mini-channels, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, No. 4, pp. 1083–1094.

Kuo C.-J., Peles Y., 2007, *Local measurement of flow boiling in structured surface microchannels*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 50, pp. 4513–4526.

Lazarek G.M., Black S.H., 1982, *Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 25, pp. 945–960.

Li W., Wu Z., 2010, *A general correlation for evaporative heat transfer in micro/minichannels*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 53, pp. 1778–1787.

Lie Y.M., Su F.Q., Lai R.L., Lin T.F., 2006, *Experimental study of evaporation heat transfer characteristics of refrigerants R-134a and R-407C in horizontal small tubes*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp. 207–218.

Liu Z., Winterton R.H.S., 1991, *A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli based on a nucleate pool boiling equation*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 34, pp. 2759–2766.

Lockhart R.W., Martinelli R.C., 1949, *Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes*, Chemical Engineering Progress, vol. 45, pp. 39–48.

Martin-Callizo C., Palm B., Owhaib W., 2007, *Subcooled flow boiling of R-134a in vertical channels of small diameter*, International Journal of Muthiphase Flow, vol. 3, pp. 822–832.

Materiały producenta Haynes-230: http://www.haynesintl.com/pdf/h3000.pdf

McLinden M.O., 1995, *Tables and diagrams for the refrigeration industry*. Thermodynamic and Physical Properties International Institute of Refrigeration, France.

Mehendale S.S., Jacobi A.M., Ahah R.K., 2000, *Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design*, Applied Mechanics Reviews, vol. 53, pp. 175–193.

Mikielewicz D., 2010, A new method for determination of flow boiling heat transfer coefficient in conventional-diameter channels and minichannels, Heat Transfer Engineering, vol. 31, pp. 276–287.

Mikielewicz J., 1974, *Semi-empirical method of determining the heat-transfer coefficient for subcooled, saturated boiling in a channel*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 17, pp. 1129–1134.

Mikielewicz J., Iwicki J., Mikielewicz D., 1992, *A general correlation for saturated freon flow boiling in a horizontal tube*, Recent Advances in Heat Transfer, Amsterdam, pp. 190–203.

Mikielewicz D., Klugmann M., Wajs J., 2012, *Experimental investigation of M-shape heat transfer coefficient distribution of R123 flow boiling in small- diameter tubes*, Heat Transfer Engineering, vol. 33, pp. 584–595.

Mikielewicz D., Mikielewicz J., 2011, A common method for calculation of flow boiling and flow condensation heat transfer coefficients in minichannels with account of nonadiabatic effects, Heat Transfer Engineering, vol. 32, pp. 1173–1181.

Mikielewicz D., Mikielewicz J., Tesmar J., 2007, *Improved semi-empirical method* for determination of heat transfer coefficient in flow boiling in conventional and small diameter tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 50, pp. 3949–3956.

Morshed A.K.M.M., Yang F., Ali M.Y., Khan J.A., Li Ch., 2012, *Enhanced flow boiling in a microchannel with integration of nanowires*, Applied Thermal Engineering, vol. 32, pp. 68–75.

Orozco J., Hanson, C., 1992, A study of mixed convection boiling heat transfer in narrow gaps, ASME – Heat Transfer Division, vol. 206-2, pp. 81–85.

Orzechowski T., 2007, *Determining local values of the heat transfer coefficient on a fin*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 31, No. 8, pp. 947–955.

Orzechowski T., 2003, *Wymiana ciepła przy wrzeniu na żebrach z mikropowierzchnią strukturalną*, seria Monografie, studia, rozprawy, Seria Mechanika Nr 39, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.

Orzechowski T., Tyburczyk A., 2011, *Efektywność dwufazowego chłodzenia na przykładzie żebra z pokryciem siatkowym*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87, Nr 7/2011, s. 48–51.

Orzechowski T., Wciślik S., 2013, *Experimental analysis of the drop film boiling at ambient pressure*, Energy Conversion and Management, vol. 76. pp. 918–924.

Orzechowski T., Wciślik S., 2014, *Instantaneous heat transfer for large drops levitating over a hot surface*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 73, pp. 110–117.

Owens W.L., 1961, *Two-phase pressure gradient*, ASME International Development in Heat Transfer, Part II, pp. 363–368.

Owhaib W., Martin-Callizo C., Palm B., 2004, *Evaporative heat transfer in vertical circular minichannels*, Applied Thermal Engineering, vol. 24, pp. 1241–1253.

Park K.S., Choo W.H., Bang K.H., 2003, *Flow boiling heat transfer of R-22 in small-diameter horizontal round tubes*, Proc. 1<sup>st</sup> International Conference on Microchannels and Minichannels, Rochester, USA, ASME, pp. 623–628.

Park Ch.Y., Jang Y., Kim B., Kim Y., 2012, *Flow boiling heat transfer coefficients and pressure drop of FC-72 in microchannels*, International Journal of Multiphase Flow, vol. 39, pp. 45–54.

Passos J.C., da Silva E.L., Possamai L.F.B., 2005, *Visualization of FC 72 confined nucleate boiling*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 30, pp. 1–7.

Pastuszko R., 2008, *Boiling heat transfer enhancement in subsurface horizontal and vertical tunnels*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 32, pp. 1564–1577.

Pastuszko R., 2012a, Pool boiling for extended surfaces with narrow tunnels – Visualization and a simplified model, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 38, pp. 149–164.

Pastuszko R., 2010, *Pool boiling on micro-fin array with wire mesh structures*, International Journal of Thermal Sciences, vol. 49, pp. 2289–2298.

Pastuszko R., 2012b, *Wymiana ciepła przy wrzeniu w tunelach podpowierzchniowych*, seria Monografie, studia, rozprawy, Nr M33, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.

Pastuszko R., Piasecka M., 2012, *Pool boiling on surfaces with mini-fins and micro-cavities*, Journal of Physics: Conference Series, vol. 395, paper No. 012136, pp. 7.

Peng X.F., Hu H.Y., Wang B.X., 1998, *Boiling nucleation during liquid flow in microchannels*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 41, pp. 101–106.

Peng X.F., Wang B.X., 1993, *Forced convection and flow boiling heat transfer for liquid flowing through microchannels*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 36, pp. 3421–3427.

Piasecka M., 2009a, Analiza wpływu wybranych parametrów na inicjację wrzenia w przepływie płynu chłodniczego przez prostokątny minikanał o zmiennej orientacji przestrzennej, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 6, s. 146–147.

Piasecka M., 2013a, *An application of enhanced heating surface with mini-recesses for flow boiling research in minichannels*, Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp. 261–271.

Piasecka M., 2012a, *An investigation into the influence of different parameters on the onset of boiling in minichannels*, Archives of Thermodynamics, vol. 33, No. 4, pp. 67–90.

Piasecka M., 2010a, *Boiling incipience at fluid flow along a rectangular channel*, Proc. XIIIth International Symposium on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy, Międzyzdroje, Wydanictwo Uczelniane ZUT w Szczecinie, pp. 467–474.

Piasecka M., 2013b, Determination of the temperature field using liquid crystal thermography and analysis of two-phase flow structures in research on boiling heat transfer in a minichannel, Metrology and Measurement Systems, vol. XX, No. 2, pp. 205–216.

Piasecka M., 2006, *Eksperymentalne badania wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie płynu chłodniczego przez pionowy minikanał*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 6s, s. 186–187.

Piasecka M., 2012b, *Experimental investigation of flow boiling heat transfer in a vertical rectangular minichannel with one enhanced heating surface*, Proc. ECI 8<sup>th</sup> International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer, Lausanne, Switzerland, paper No. 1559, pp. 12.

Piasecka M., 2012c, *Experimental study of flow boiling heat transfer in a rectangular minichannel by using various enhanced heating surfaces*, Journal of Physics: Conference Series, vol. 395, paper No. 012136, pp. 8.

Piasecka M., 2014a, *Flow boiling heat transfer in a minichannel with enhanced heating surface*, Heat Transfer Engineering, vol. 35, No. 10, pp. 903–912

Piasecka M., 2012d, *Heating surface laser texturing in studies of heat transfer in minichannels*, [in] *Selected problems of Mechanical Engineering and Maintenance*, ed. Norbert Radek, Monographs, Studies and Dissertations, No. M29, Kielce University of Technology, Kielce 2012, pp. 88–98.

Piasecka M., 2013c, *Heat transfer mechanism and pressure drop during flow boiling of FC-72 in horizontal and vertical minichannels with enhanced walls*, Proc. 8<sup>th</sup> World Congress on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Lisbon, Portugal, CD, paper No. 137, pp. 8.

Piasecka M., 2013d, *Heat transfer mechanism, pressure drop and flow patterns during FC-72 flow boiling in horizontal and vertical minichannels with enhanced walls*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 66, pp. 72–488.

Piasecka M., 2012e, *Investigation into flow boiling heat transfer in a minichannel with enhanced heating surface*, European Physical Journal Web of Conference, vol. 25, paper No. 01072, pp. 12.

Piasecka M., 2004, *Investigations on flow boiling heat transfer in minichannels*, Turbulence, vol. 10, pp. 111–122.

Piasecka M., 2010b, Koncepcja stanowiska do badania wrzenia w przepływie przez minikanał z grzejnikiem porowatym, Logistyka, nr 6/2010, 8 stron.

Piasecka M., 2014b, *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.

Piasecka M., 2010c, Oszacowanie dokładności pomiaru temperatury powierzchni w termografii ciekłokrystalicznej, Logistyka nr 6/2010, 10 stron.

Piasecka M., 2014c, *The use of enhanced surface in flow boiling heat transfer in a rectangular minichannels*, Experimental Heat Transfer, vol. 27, pp. 231–255.

Piasecka M., 2009b, *Wykorzystanie termografii ciekłokrystalicznej do detekcji pola temperatury w badaniach wymiany ciepła podczas przepływu płynu chłodniczego w minikanale*, Logistyka, nr 6/2009, listopad-grudzień, 8 stron.

Piasecka M., 2009c, Wyniki badań wymiany ciepła podczas przepływu płynu chłodniczego w minikanale, Logistyka nr 6/2009, listopad-grudzień, 8 stron.

Piasecka M., Hożejowska S., 2006, *Analiza błędów pomiarowych w badaniach wymiany ciepła w minikanale*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 6s, s. 188–189.

Piasecka M., Hożejowska S., Hożejowski L., Poniewski M.E., 2006, *Wyznaczanie lokalnego współczynnika przejmowania ciepła w badaniach wymiany ciepła w minikanale*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 6s, s. 190–191.

Piasecka M., Hożejowska S., Maciejewska B., 2010, *Współczynnik przejmowania ciepła przy wrzeniu w minikanale – badania doświadczalne i metody obliczeniowe z wykorzystaniem funkcji Trefftza*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, Nr 2/2010, s. 95–96.

Piasecka M., Hożejowska S., Poniewski M.E., 2004, *Experimental evaluation of flow boiling incipience of subcooled fluid in a narrow channel*, International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 25, pp. 159–172.

Piasecka M., Maciejewska B., 2013a, *Application of the Finite Element Method to the determining of boiling heat transfer coefficient for minichannel flow*, Archives of Thermodynamics, vol. 34, No. 1, pp. 55–69.

Piasecka M., Maciejewska B., 2013b, *Enhanced heating surface application in a minichannel flow and use the FEM and Trefftz functions to the solution of inverse heat transfer problem*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 44, pp. 23–33.

Piasecka M., Maciejewska B., 2013c, *Heat transfer coefficient determination for flow boiling in vertical and horizontal minichannels*, Proc. International Conference on Experimental Fluid Mechanics 2013, Kutná Hora, Czech Republic, pp. 562–568.

Piasecka M., Maciejewska B., 2014, *Impact of variable spatial orientation on the heat transfer coefficient during flow boiling in a minichannel with an enhanced surface*, Proc. 5th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale 2014, 22–25.04.2014 Marseille, France, paper No. P-44, 6 pages.

Piasecka M., Maciejewska B., 2012a, *The solution of the two-dimensional inverse heat transfer problem with the use of the FEM in combination with Trefftz functions*, European Physical Journal Web of Conference, vol. 25, paper No. 01073, pp. 12.

Piasecka M., Maciejewska B., 2012b, *The study of boiling heat transfer in vertically and horizontally oriented rectangular minichannels and the solution to the inverse heat transfer problem with the use of the Beck method and Trefftz functions*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 38, pp. 19–32.

Piasecka M., Maciejewska B., 2010a, *Wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła w minikanale metodą MES z wykorzystaniem funkcji Trefftza*, Materiały XIV Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy SWCiM-2010, Międzyzdroje, Wydawnictwo Uczelniane ZUT w Szczecinie, s. 397–404.

Piasecka M., Maciejewska B., 2010b, Zastosowanie metody współczynników wrażliwości z wykorzystaniem funkcji Trefftza w badaniach wymiany ciepła w minikanale, Logistyka, nr 6/2010, 10 stron.

Piasecka M., Poniewski M.E, 2004a, *Flow boiling incipience in minichannels*, Proc. 3rd International Symposium on Two-phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa, Italy, CD, pp. 8 (mt-13).

Piasecka M., Poniewski M.E., 2004b, *Hysteresis phenomena at the onset of subcooled nucleate flow boiling in microchannels*, Heat Transfer Engineering, vol. 25, No. 3, pp. 44–51.

Piasecka M., Poniewski M.E., 2004c, *Influence of selected parameters on boiling heat transfer in minichannels*, Proc. 2nd International Conference on Microchannels and Minichannels, Rochester, NY, USA, pp. 515–522.

Piasecka M., Poniewski M.E., 2008, Zastosowanie termografii ciekłokrystalicznej do badań wrzenia w przepływie przez minikanał, [w:] Wybrane zagadnienia przepływu płynów i wymiany ciepła, Politechnika Warszawska, Szkoła Nauk Technicznych i Społecznych w Płocku, praca zbiorowa pod red. W. Sucheckiego, Warszawa 2008, s. 241–256 (rozdział w monografii).

Piasecka M., Poniewski M.E., Hożejowska S., Hożejowski L., 2005, Various models and numerical procedures of boiling heat transfer calculations in minichannels, Proc. Euromech Colloquium 472 on Microfluidics and Transfer, Grenoble, France, pp. 4.

Poniewski M.E., Piasecka M., Hożejowska S., 2010, *Experimental and numerical evaluation of flow boiling heat transfer in asymetrically heated vertical minichannel*, Materiały Krajowej Konferencji Nano- i Mikromechaniki, Krasiczyn, Rzeszów, s.33.

Poniewski M.E., Thome J.R., 2008, *Nucleate boiling on micro-structured surfaces*, http://www.htri.net/Public/prodsvcs/NucleateBoiling.pdf., Heat Transfer Research Inc., 2008 (e-book).

Revelin R., Thome J.R., 2005, *Experimental investigation of R-134a and R-245fa two-phase flow in microchannels for different flow conditions*, Proc. ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, Castelvecchio Pascoli, Italy, CD, No. 14.

Samoteeva O., Palm B., 2014, *Heat transfer during refrigerant boiling in single mini channels of a rectangular shape*, Proc. 5th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale 2014, 22-25.04.2014 Marseille, France, paper P-68\_042, 7 pages.

Saraceno L., Celata G.P., Furrer M., Mariani A., Zummo G., 2012, *Flow boiling heat transfer of refrigerant FC-72 in microchannels*, International Journal of Thermal Sciences, vol. 53, pp. 35–41.

Shah R.K., 1981, *Classification of heat exchangers*. In: Kakac, S., Bergles, A.E., Mayinger, F. (Eds.), *Heat Exchangers: thermal-hydraulic fundamentals and design*, Hemisphere Publishing Corp., Washington DC, pp. 9–46.

Shah M.M., 1982, *Chart correlation for saturated boiling heat transfer: equations and further study*, ASHRAE Transactions, vol. 88, pp. 185–196.

Sobierska E., Chmiel K., Kulenovic R., Mertz R., 2005, *Experimental investigation on flow boiling in a vertical narrow channel*, Proc. 3<sup>rd</sup> International Conference on Microchannels and Minichannels, Toronto, Canada.

Sobierska E., Kulenovic R., Mertz R., Groll M., 2006, *Experimental results of flow boiling of water in a vertical microchannel*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 31, pp. 111–119.

Su S., Huang S., Wang X., 2005, *Study of boiling incipience and heat transfer enhancement in forced flow through narrow channels*, International Journal of Multiphase Flow, vol. 31, pp. 253–260.

Sun L, Mishima K., 2009, *An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 52, pp. 5323–5329.

Sun Y., Zhang L., Xu H., Zhong X., 2011a, *Flow boiling enhancement of FC-72 from microporous surfaces*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 35, pp. 1418–1426.

Sun Y., Zhang L., Xu H., Zhong X., 2011b, *Subcooled flow boiling heat transfer from microporous surfaces in a small channel*, International Journal of Thermal Sciences, vol. 50, pp. 881–889.

Thome J.R., 2004, *Boiling in microchannels: a review of experiment and theory*, International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 25, pp. 128–139.

Thome J.R., 2004-2010, Engineering Data Book III, Wolverine Tube, Inc.

Thome J.R., Dupont V., Jacobi A.M., 2004, *Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part I: presentation of model*, International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 47, pp. 3375–3385.

Tian Y., Wang X.D., Peng X.F., 2004, *Characteristics of earlier nucleation for boiling in microchannels*, Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference on Microchannels and Minichannels, Rochester, USA.

Tran T., Wambsganss M.W., France D.M., 1996, *Small circular and rectangular channel boiling with two refrigerants*, International Journal of Multiphase Flow, vol. 22, pp. 485–498.

Triplett K.A., Ghiaasiaan S.M., Abdel-Khalik S.I., Sadowski D.L., 1999, *Gas-liquid two-phase flow in micro-channels, Part 1: two-phase flow patterns*, International Journal of Multiphase Flow, vol. 25, pp. 377–394.

Troniewski L., *Metoda obliczania procesu odparowania w rurach w obszarze konwekcyjnym*, Zeszyty Naukowe WSI Opole, nr 35, Mechanika, Z. 9, Opole 1977.

Wambsganss M.W., France D.M., Jendrzejczyk J.A., Tran T.A., 1993, *Boiling heat transfer in a horizontal small-diameter tube*, Journal of Heat Transfer, vol. 115, pp. 963–972.
Wambsganss M.W., Jendrzejczyk J.A., France D.M., 1991, *Two-phase flow patterns and transitions in a small, horizontal, rectangular channel*, International Journal of Multiphase Flow, vol. 17, pp. 327–342.

Wang L., Chen M., Groll M., 2005, *Experimental study on flow boiling heat transfer in mini-tube*, Proc. 3<sup>rd</sup> International Conference Microchannels and Minichannels, Toronto, Canada.

Wang B.X., Peng X.F., 1993, *Boiling characteristics of subcooled liquid flowing through microchannels*, Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering, Seoul, Korea, vol. 1, pp. 417–421.

Wang H., Peterson R.B., 2010, *Enhanced boiling heat transfer in parallel microchannels with diffusion brazed wire mesh*, IEEE Transactions on Components and Packaging Technology, vol. 33, pp. 784–793.

Warrier G.R., Dhir V.K., Momoda L.A., 2002, *Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 26, pp. 53–64.

Wen D.S., Kenning D.B.R., 2004, *Two-phase pressure drop of water during flow boiling in a vertical narrow channel*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 28, pp. 131–138.

Wilk J., 2012, Convective mass/heat transfer in the entrance region of the short circular minichannel, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 38, pp. 107–114.

Wilk J., 2009, *Experimental investigation of convective mass/heat transfer in short minichannel at low Reynolds numbers*, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 33, pp. 267–272.

Wojtan L., Revellin R., Thome J.R., 2005, *Investigation of critical heat flux in single, uniformly heated microchannels*, Proc. ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, Castelvecchio Pascoli, Italy, CD-No.6.

Wójcik T., 2010, *Inicjacja wrzenia i histereza wymiany ciepła na pokryciach porowatych*, seria Rozprawy, monografie, Nr 204, Wydawnictwa AGH, Kraków.

Yan Y.Y., Lin T. F., 1998, *Evaporation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-134a in a small pipe*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 41, pp. 4183–4194.

Yang Y., Fujita Y., 2004, *Flow boiling heat transfer and flow pattern in rectangular channel of mini-gap*, Proc. 2nd International Conference on Microchannels and Minichannels, Rochester, NY, USA, pp. 573–580.

Yen T.-H, Kasagi N., Suzuki Y., 2003, *Forced convective boiling heat transfer in microtubes at low mass and high heat fluxes*, International Journal of Multiphase Flow, vol. 29, pp. 1771–1792.

Yu W., France D.M., Wambsganss M.W., Hull J.R., 2002, *Two-phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube*, International Journal of Multiphase Flow, vol. 28, pp. 927–941. Zabrodzki J., 1994, red., *Grafika komputerowa*, WNT, Warszawa.

#### Patenty

Piasecka M. (udział 80%), Depczyński W. (udział 20%), patent PL pt. *Struktura intensyfikująca wymianę ciepła przy wrzeniu*, nr 217287.

#### Streszczenie

#### WRZENIE W PRZEPŁYWIE NA ROZWINIĘTYCH POWIERZCHNIACH MINIKANAŁÓW

Nieustanny postęp technologiczny oraz rewolucja informatyczna są przyczyną wzrostu wymagań energetycznych przy jednoczesnej tendencji do miniaturyzacji urządzeń. Skutecznym sposobem chłodzenia jest wykorzystanie procesów wymiany ciepła przebiegających ze zmianą stanu skupienia, ze względu na większą efektywność procesu. Wykorzystanie powierzchni rozwiniętej pozwala na dodatkową intensyfikację wymiany ciepła.

W pracy skoncentrowano się na zagadnieniach rozwoju wrzenia pęcherzykowego podczas przepływu czynnika chłodniczego (FC-72, Novec 7100) w minikanale, gdy jego podstawowa głębokość wynosiła 1 mm, a szerokość 40 mm. W badaniach kanał ustawiano pod różnym kątem do poziomu. Powierzchnię grzejną kanału stanowiła jednostronnie rozwinięta cienka folia. Do uzyskania rozwinięcia jej powierzchni wykorzystano dwa różne procesy: teksturowanie laserowe (wynikowo uzyskano mikrowgłębienia rozmieszczone regularnie) oraz proces elektroerozji (wytworzono miniwgłębienia rozmieszczone nieregularnie). W eksperymentach wykorzystano bezkontaktową metodę pomiaru pola temperatury – termografię ciekłokrystaliczną – do detekcji rozkładu temperatury powierzchni grzejnej. Jednocześnie prowadzono bezpośrednią obserwację struktur przepływu dwufazowego podczas wrzenia płynu chłodniczego w kanale.

Celem przeprowadzonych badań była analiza procesów wymiany ciepła i towarzyszącego im zagadnienia oporów przepływu dwufazowego w kanale, na podstawie danych eksperymentalnych i dostępnych w literaturze modeli. Inne ważne zagadnienia rozpatrywane w pracy to: wyznaczenie stopnia zapełnienia i stopnia suchości dla wybranych przekrojów (na drodze eksperymentalnej i teoretycznej) oraz rozpoznanie struktur przepływu dwufazowego i sporządzenie map struktur. Wartości wyznaczonych eksperymentalnie stopni zapełnienia różniły się znacznie w zależności od orientacji przestrzennej kanału. Analizowanymi w pracy zagadnieniami ponadto są: wpływ rozwinięcia powierzchni grzejnej i położenia kanału na rozwój wrzenia i opory przepływu oraz wpływ wybranych parametrów cieplnoprzepływowych (ciśnienie i strumień masy), wymiarów geometrycznych kanału i rodzaju płynu chłodniczego na proces wrzenia w kanale.

Stwierdzono, że inicjacja i rozwój wrzenia przy zastosowaniu powierzchni rozwiniętej następuje przy niższych strumieniach ciepła dostarczanych do powierzchni grzejnej, w porównaniu do wyników uzyskanych dla folii gładkiej.

Porównano własne wyniki z wybranymi z literatury. Stwierdzono, że niektóre korelacje innych badaczy z bardzo dobrym przybliżeniem pozwalają prognozować wartości współczynnika przejmowania ciepła, ale dla określonej orientacji kanału.

Porównano współczynniki przejmowania ciepła otrzymane podczas własnych badań wrzenia w przepływie i dużej objętości. Zaproponowano własne równanie kryterialne do obliczania liczby *Nusselta* dla wrzenia przechłodzonego.

Zawarto propozycje praktycznego wykorzystania poruszanych zagadnień.

#### Summary

#### FLOW BOILING ON ENHANCED SURFACES OF MINICHANNELS

Constant technological progress and IT revolution require efficient power energy sources and devices tend to be miniature. Using heat transfer processes accompanied by the change of state is an efficient cooling method. Using developed surfaces allows additional intensive heat transfer.

The paper focuses on the development of the nucleate boiling during the flow of the cooling liquid (FC-72, Novec 7100) in the minichannel, 1 mm deep and 40 mm wide. Data for various orientations of the channel in relation to the horizontal plane were acquired. Thin foil developed from one side was the heating surface of the channel. The enhanced surface was formed in two processes: laser texturing (the microrecesses distributed evenly) and spark erosion (minirecesses distributed unevenly). Liquid crystal thermography, a contactless method for measurement of the temperature field, was employed for the detection of the temperature distribution of the heating surface. At the same time the two-phase flow pattern during flow boiling of the cooling liquid in the channel were observed.

The study focused on the analysis of the heat transfer process and the associated issue of the two-phase flow pressure drop on the basis of experimental data and models available in the relevant literature. Other important issues dealt with in the study include: determination of the void fraction and the vapour quality for selected cross-sections (by experimental and theoretical methods), research on the twophase flow structures and development of flow pattern maps. There were significant differences in values of the experimentally determined void fraction which depended on the spatial orientation of the channel. Other issues were analyzed in the study: the impact of the development of the heating surface on the progress of the boiling process, flow resistance and the effects of selected heat and flow parameters (pressure and mass flux), geometric dimensions of the channel and type of the cooling liquid on the boiling process in the channel.

It was found that the incipience and development of boiling when enhanced surfaces are applied occur at lower heat fluxes supplied to the heating surface than in the results obtained from the plain foil study.

The results obtained by the author were compared to data from literature. It was also found that some correlations of other researchers allowed proper forecasting of approximate values of heat transfer coefficient, but also for specific orientation of the channel.

The heat transfer coefficients obtained during the author's research on flow and pool boiling of the coolant are discussed. The author also puts forward her own correlation for the calculation of *Nusselt* number for subcooled boiling.

The paper presents ideas of practical utilization of the issues raised in the study.

ZAŁĄCZNIK **A** 

# WŁASNE PROPOZYCJE WYKORZYSTANIA POWIERZCHNI ROZWINIĘTYCH W ZASTOSOWANIACH PRAKTYCZNYCH

#### A.1. WPROWADZENIE

W związku z pracami nad powierzchniami rozwiniętymi intensyfikującymi wymianę ciepła przy wrzeniu uzyskano patent PL pt. *Struktura intensyfikująca wymianę ciepła przy wrzeniu*, nr 217287.

Niżej omówione prototypy urządzeń i zaproponowane koncepcje zostały zrealizowane w Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach w ramach udziału w programie stażowym projektu "*INWENCJA – Potencjał młodych naukowców oraz transfer wiedzy i innowacji wsparciem dla kluczowych dziedzin świętokrzyskiej gospodarki*", współfinansowanym przez Unię Europejską, realizowanym w okresie: 17.05.2012 – 17.03.2013 r.

# A.2. WYKORZYSTANIE ROZWINIĘTYCH POWIERZCHNI ABSORBERA W PROTOTYPOWYCH KOLEKTORACH SŁONECZNYCH

### A.2.1. Prototypowy kolektor słoneczny z absorberem w postaci układu rurek o powierzchni rozwiniętej

Na rysunku A.1 przedstawiono schemat konstrukcyjny zaprojektowanego kolektora słonecznego z absorberem w postaci układu równoległych rurek. Cienkie miedziane rurki absorbera (średnica 10 mm, grubość ścianki 1 mm, długość 480 mm), ułożone w rozstawie 20 mm, połączono lutem twardym z rurkami zbiorczymi (średnica 28 mm, grubość ścianki 1,2 mm, długość 500 mm) w układzie harfowym. Dolutowano połączenia gwintowane 1" i <sup>3</sup>/<sub>4</sub>" do końców rurek zbiorczych. Po wykonaniu próby szczelności, rurki absorbera zostały poddane procesowi piaskowania. W wyniku tego procesu na zewnętrznej powierzchni rurek wytworzone zostały miniwgłębienia. Widok prototypowego kolektora słonecznego z absorberem w postaci rurek o powierzchni rozwiniętej pokazano na rysunku A.2.



**Rys. A.1.** Schemat konstrukcyjny kolektora słonecznego z absorberem w postaci układu równoległych rurek



**Rys. A.2.** Widok prototypowego kolektora słonecznego płaskiego z absorberem w postaci miedzianych rurek, z rozwiniętą powierzchnią, uzyskaną w procesie piaskowania; w górnym lewym rogu pokazano zdjęcie powierzchni rozwiniętej rurek w powiększeniu 200x

### A.2.2. Prototypowe kolektory słoneczne z płytami absorpcyjnymi o powierzchniach rozwiniętych

Schemat koncepcyjny płaskiego kolektora słonecznego z absorberem w postaci rurek, przykrytych płytą absorpcyjną o powierzchni rozwiniętej, pokazano na rysunku A.3.



Rys. A.3. Schemat koncepcyjny kolektora płaskiego z rozwiniętą powierzchnią płyty absorpcyjnej

W celu wytworzenia powierzchni rozwiniętych zastosowano dwa różne procesy technologiczne, wymagające zastosowania różnych materiałów płyt absorberów. W pierwszym wariancie zastosowano płytę miedzianą grubości 1 mm. Do konstrukcji zamocowano ją klejem o dobrej przewodności cieplnej. Zabezpieczono stabilność płyty względem rurek kolektora za pomocą opasek metalowych, ze względu na zmienną rozszerzalność cieplną materiałów poszczególnych części kolektora. W celu uzyskania rozwinięcia zewnętrznej powierzchni płyty wykorzystano urządzenie do obróbki elektroiskrowej (elektrodrążarkę z pisakiem prowadzonym manualnie). W wyniku procesu elektroerozji otrzymano miniwgłębienia rozmieszczone nierównomiernie na całej powierzchni płyty. W drugim wariancie, na rurki absorbera nałożono płaską płytę ze stali nierdzewnej o grubości 0,5 mm. Mocowania płyty z zabezpieczenia wykonano analogicznie, jak w poprzednim przypadku. Aby uzyskać rozwinięcie zewnętrznej powierzchni płyty zastosowano metodę teksturowania laserowego. W jej wyniku otrzymano mikrowgłębienia rozmieszczone równomiernie na całej powierzchni płyty.

Na rysunku A.4 pokazano schemat konstrukcyjny prototypowego kolektora słonecznego płaskiego harfowego z rozwiniętą powierzchnią absorpcyjną (jeden z wariantów urządzenia – z rozwiniętą powierzchnią absorpcyjną przy wykorzystaniu teksturowania laserowego), a rysunek A.5 przedstawia widok wykonanego prototypowego kolektora słonecznego.



**Rys. A.4.** Schemat konstrukcyjny prototypowego kolektora słonecznego płaskiego harfowego z rozwiniętą powierzchnią absorpcyjną przy wykorzystaniu teksturowania laserowego



**Rys. A.5.** Widok prototypowego kolektora słonecznego z rozwiniętą powierzchnią absorpcyjną przy wykorzystaniu teksturowania laserowego (widoczna rozwinięta płyta absorbera); w górnym lewym rogu pokazano zdjęcie powierzchni z mikrowglębieniami w powiększeniu 200x

Przygotowano dodatkowy kolektor słoneczny płaski z absorberem w postaci układu równoległych miedzianych rurek gładkich, z uwagi na konieczność uzyskania bazy pomiarowej – kolektora wzorcowego.

Na rysunku A.6 pokazano schemat układu przepływowego instalacji z płaskim kolektorem słonecznym. Przygotowano oddzielne cztery układy przepływowe, o jednakowych elementach obiegu przepływowego i identycznej aparaturze kontrolno-pomiarowej.



**Rys. A.6.** Schemat układu przepływowego z prototypowym kolektorem słonecznym płaskim z rozwiniętą powierzchnią absorbera: 1 – kolektor płaski, 2 – pompa przepływowa, 3 – zasobnik ciepłej wody, 4 – odpowietrznik, 5 – miedziane rurki kolektora, 6 – obudowa aluminiowa z pokrywą szklaną, 7 – izolacja termiczna, 8 – płyta absorbera o zewnętrznej powierzchni rozwiniętej

Do przeprowadzenia analizy porównawczej przyjęto cztery wykonane prototypowe kolektory słoneczne płaskie z absorberami w postaci:

- układu równoległych rurek z miniwgłębieniami, wykonanymi metodą piaskowania,
- blachy płaskiej z miniwgłębieniami, wykonanymi techniką elektroerozji,
- blachy płaskiej z mikrowgłębieniami wykonanymi laserowo,
- układu równoległych rurek gładkich.

Kolektor słoneczny z absorberem w postaci układu równoległych rurek gładkich przyjęto jako wzorcowy (bazowy). Posłużył do zbadania sprawności wykonanych pozostałych trzech prototypów kolektorów o jednakowych gabarytach. Celem analizy było oszacowanie wzrostu prognozowanej sprawności cieplnej kolektorów z absorberami rozwiniętymi w odniesieniu do kolektora wzorcowego. Stwierdzono, że wszystkie z przygotowanych kolektorów słonecznych z powierzchniami rozwiniętymi powodują zwiększenie sprawności kolektorów w stosunku do kolektora bazowego. Wzrost skuteczności termicznej jest zróżnicowany. Wydaje się, że zależność ta jest związana bezpośrednio ze stopniem rozwinięcia powierzchni absorbera. Piaskowane rurki miedziane są mniej skuteczne od pozostałych absorberów (poza gładkimi rurkami), głównie ze względu na mniejszą powierzchnię absorbera. Efektywną powierzchnią rozwiniętą okazała się blacha miedziana teksturowana za pomocą elektroerozji, prawdopodobnie dzięki zastosowaniu materiału absorbera o największej przewodności cieplnej. Zaplanowano kompleksowe testy pracy kolektorów w następnym sezonie letnim.

### A.3. KONCEPCJA ZASTOSOWANIA ZINTEGROWANYCH MINIKANAŁÓW Z POWIERZCHNIAMI ROZWINIĘTYMI W WYMIENNIKACH CIEPŁA

Przygotowano koncepcję zwartego wymiennika ciepła, w skład którego wchodzi zespół zintegrowanych minikanałów o powierzchni rozwiniętej jako struktury intensyfikującej wymianę ciepła (rys. A.7). Na powierzchni folii metalowej wytworzone są mikro- lub miniwgłębienia technikami teksturowania laserowego lub elektroerozyjną. W koncepcji zaproponowano, aby uzyskana powierzchnia stanowiła dwie naprzeciwległe powierzchnie uformowanych minikanałów, przez które przepływa ciecz wrząca (czynniki chłodnicze). Ścianki boczne minikanałów stanowi materiał izolacyjny (np. PTFE). Układ przepływowy z modułem ze zintegrowanymi minikanałami o powierzchniach rozwiniętych zawiera ponadto pompę oraz wymiennik ciepła pracujący jako skraplacz (rys. A.8).



Rys. A.7. Przekrój przez zespół zintegrowanych minikanałów o powierzchniach rozwiniętych



**Rys. A.8.** Schemat ideowy układu przepływowego z modulem z zintegrowanymi minikanałami o powierzchniach rozwiniętych

# A.4. KONCEPCJA SYSTEMU HYBRYDOWEGO: PANEL FOTOWOLTAICZNY – KOLEKTOR SŁONECZNY, Z MODUŁAMI MINIKANAŁOWYMI I POWIERZCHNIAMI ROZWINIĘTYMI

Opracowano koncepcję systemu hybrydowego: panel fotowoltaiczny – kolektor słoneczny (rys. A.9). Do chłodzenia zespołu ogniw fotowoltaicznych wykorzystano rurki z czynnikiem roboczym kolektora słonecznego. Na powierzchni płyty absorpcyjnej przewidziano wytworzenie mini- lub mikrowgłębień, wykonane różnymi technikami. W koncepcji do chłodzenia zespołu ogniw fotowoltaicznych wykorzystano zespół minikanałów o przekroju prostokątnym. Wewnętrzne ścianki minikanałów będą stanowić powierzchnie rozwinięte.



**Rys. A.9.** Schemat koncepcyjny hybrydowego kolektora – przekrój przez kolektor: 1 - ogniwa pv, 2 - płyta metalowa stanowiąca górną, rozwiniętą powierzchnię absorberakolektora słonecznego, 3 – zespoły minikanałów prostokątnych z rozwiniętą powierzchniąwewnętrzną, 4 – płyta nośna kolektora, 5 – izolacja termiczna, 6 – obudowa metalowa,<math>7 - szyba

### A.5. KONCEPCJA ZASTOSOWANIA POWIERZCHNI ROZWINIĘTYCH W INSTALACJACH KOTŁÓW NA BIOMASĘ

W kotłach na biomasę dochodzi do wymiany ciepła w części wokół paleniska. Ogień ogrzewa powierzchnię wymiennika ciepła, a krążąca w nim woda przejmuje ciepło poprzez metalową płytę. W zaproponowanej koncepcji płyta winna być wykonana z metalu o wysokiej przewodności cieplnej. Jej górna powierzchnia, omywana strumieniem wody, będzie rozwinięta. Koncepcję układu pokazano na rysunku A.10.

Powierzchnie rozwinięte pozwolą na zintensyfikowanie wymiany ciepła wewnątrz kotła. Umożliwi to uzyskanie wyższych sprawności i/lub mocy grzewczych kotła, co bezpośrednio przeniesie się na zmniejszenie ilości opału używanego do podtrzymania pracy kotła. Korzystne będzie działać zastosowanie turbulizatorów na wlocie do wymiennika w górnej części kotła, zakłócających laminarny przepływ wody w wymienniku, korzystnie wpływających na wymianę ciepła. Istnieje bezwzględna konieczność zapobieganiu osadzania się kamienia kotłowego. Należy przewidzieć zastosowanie w instalacji układu zmniejszającego twardość wody, a tym samym ograniczenie zawartości związków wapnia. W koncepcji zaproponowano wprowadzenie magnetyzera, działającego na wodę polem magnetycznym. Na skutek pracy tego urządzenia związki rozpuszczalnych soli wapnia, magnezu oraz niektórych wielowartościowych metali zawarte w wodzie, wytrącają się w postaci osadu, który zostałby wyeliminowany jeszcze przed wpłynięciem do komór wymienników kotła.



**Rys. A.10.** Schemat koncepcyjny zastosowania powierzchni rozwiniętych w instalacjach kotłów na biomasę. Niebieskimi strzałkami oznaczono komory wymienników z wewnętrznymi płaszczyznami przeznaczonymi do procesu rozwinięcia powierzchni (oprac. własne na podstawie http://www.elar.com.pl/kotly-grzewcze)

# A.6. PODSUMOWANIE

W rozdziale przedstawiono prototypy urządzeń i koncepcje, które zostały zrealizowane w Politechnice Świętokrzyskiej w ramach udziału autorki pracy w programie stażowym realizowanym w przedsiębiorstwie. W zaproponowanych konstrukcjach urządzeń wykorzystano powierzchnie rozwinięte. Zaprojektowano, wykonano i przetestowano cztery warianty prototypowych kolektorów słonecznych płaskich, w trzech z nich zastosowano rozwiniętą powierzchnię absorbera. Stwierdzono, że wszystkie z przygotowanych kolektorów słonecznych z powierzchniami rozwiniętymi powodują zwiększenie sprawności kolektorów w stosunku do kolektora bazowego. Opracowano koncepcję zastosowania zintegrowanych minikanałów w celu zwiększenia efektywności wymienników ciepła. Zaproponowano koncepcję systemu hybrydowego: panel fotowoltaiczny – kolektor słoneczny oraz przedstawiono koncepcję zastosowania powierzchni porowatych w instalacjach kotłów na biomasę. załącznik  ${f B}$ 

# **TECHNIKA TERMOGRAFII**

# CIEKŁOKRYSTALICZNEJ

# B.1. PODSTAWOWE WŁASNOŚCI CIEKŁYCH KRYSZTAŁÓW. MODELE BARWY

Ciekłe kryształy znalazły szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach techniki, w których ich unikalne własności, sygnalizowane poprzez zmianę barwy i/lub jej intensywności, można wykorzystać do obserwacji zmian temperatury, naprężeń, promieniowania elektromagnetycznego i zmian własności chemicznych. Najczęściej wykorzystuje się wspomnianą własność selektywnego odbicia światła od płaszczyznowo zorientowanych warstw tych substancji. Barwa światła selektywnie odbitego zależy od wielu czynników zewnętrznych, takich jak: oddziaływania mechaniczne, kąt padania światła białego itd. Szczególnie ważna dla zastosowań w dziedzinie wymiany ciepła jest zależność tej barwy od temperatury obserwowanej powierzchni.

Dzięki opisanym własnościom termoczułych ciekłych kryształów warstwa tej substancji, pokrywająca powierzchnię ciała stałego, dokładnie odwzorowuje rozkład temperatury jej powierzchni, w postaci barwnej mapy. Taki sposób określania rozkładu temperatury nazywa się *termografią* i jest jedną z precyzyjniejszych i wygodniejszych metod wyznaczania dwuwymiarowego rozkładu temperatury dowolnej powierzchni. Zakres temperatury, dla której cząstki termoczułych ciekłych kryształów odbijają widmo widzialne nazywamy *pasmem aktywnym*.

Przystępując do badań termograficznych, należy dobrać odpowiednią mieszaninę ciekłokrystaliczną w taki sposób, aby dla najniższej temperatury, jaka wystąpi na badanej powierzchni, barwa selektywnego odbicia była czerwona, a następnie zmieniała się w sekwencji widma widzialnego (czerwień, żółty, zieleń, niebieski, fiolet) w barwę fioletową, występującą przy najwyższej temperaturze. Gdy temperatura powierzchni jest wyższa lub niższa od granic pasma aktywnego, widziana jest jedynie barwa czarna podłoża absorpcyjnego. Pasmo aktywne wynosi zazwyczaj od kilku do kilkunastu stopni Kelwina; stosując różne kombinacje termoczułych ciekłych kryształów można mierzyć temperatury z szerokiego zakresu od 240 do 623 K, z dokładnością  $\pm$  0,1 K [Collings, 1990; Kasagi i inni, 1989].

Termografia jest wygodnym sposobem ilościowego pomiaru temperatury, ponieważ pozwala bezpośrednio wykrywać i obserwować obszar, który jest cieplejszy lub zimniejszy od temperatury otoczenia, bez pomiaru jej wartości. Tę technikę pomiarową wykorzystuje się od lat 60. XX wieku do pomiaru rozkładu temperatury na powierzchniach i w płynach. Choć wygodne, stosowanie ciekłych kryształów w badaniach termograficznych ma również wady. Duże trudności techniczne sprawiają przede wszystkim procedury kalibracji.

Przed każdym pomiarem przy użyciu ciekłych kryształów, należy przeprowadzić ich kalibrację, celem ustalenia związku pomiędzy demonstrowaną barwą a odpowiadającą jej temperaturą. Obraz pola temperatury powierzchni, z naniesionymi ciekłymi kryształami, zmienia się wraz z kątem obserwacji i jest zależny od składu widmowego padającego światła. Stąd wynika konieczność zachowywania jednakowych warunków oświetleniowych i obserwacyjnych zarówno podczas kalibracji, jak i przeprowadzania eksperymentów. Kalibracja powinna być ponawiana po zastosowaniu nowej partii ciekłych kryształów, po zmianie jakichkolwiek parametrów układu rejestrującego obraz (ustawienie kamery i obiektywu, ustawienie i rodzaj świetlówek, oświetlenie pomieszczenia, itp.). Ciekłe kryształy podlegają procesowi starzenia, co powoduje konieczność okresowej weryfikacji pierwotnej charakterystyki kalibracyjnej.

Zgodnie z teorią kolorymetrii, każdy kolor jest składową trzech kolorów podstawowych i może być określony poprzez ich liniową kombinację. Ze względu na posiadaną aparaturę i oprogramowanie w badaniach zastosowano system akwizycji obrazu kolorowego oparty na trzech kolorach podstawowych: *R*, *G* i *B* (czerwony, zielony i niebieski).

Zapis koloru każdego punktu (piksela) w postaci macierzy 3 x 1 dla zadanej wielkości skalarnej, czyli temperatury, jest niewygodny. Z tego względu zostały opracowane inne, uproszczone modele barw, jak HSI, HSV, HLS itp. [Farina i inni, 1993; Hay i Hollingsworth, 1996; Zabrodzki, 1994]. W omawianych dalej badaniach zastosowano system HSI, gdzie H - hue - barwa, S - saturation - nasycenie, I - intensity - intensywność. Tworzą one biegunowy układ współrzędnych, którego biegunem jest kolor biały (jednakowe wartości składowych R, G i B), a barwa H - hue stanowi kąt, który rośnie monotonicznie wraz z wzrastającą długością fali, zgodnie z sekwencją widma światła, od koloru czerwonego, o najmniejszej długości fali.

Zastosowany w omawianych badaniach system HSI pozwala, w pewnych szczególnych warunkach, na przetworzenie trójskładnikowego sygnału RGB w jednowymiarową macierz barw, czyli wielkości skalarnej – temperaturze, przypisać skalarny wymiar barwy.

Barwa (*hue*) w biegunowym układzie współrzędnych przedstawia długość fali dominującego koloru i zdefiniowana jest jako kąt, w sposób następujący [Hay i Hollingsworth, 1996, 1998; Piasecka i Poniewski, 2008; Piasecka, 2009b, 2010c, 2013b, 2014c; Hożejowska i inni, 2009; Piasecka i Maciejewska, 2013b]:

$$hue = \arctan\left(\frac{\sqrt{3}(G-B)}{2R-G-B}\right),\tag{B.1}$$

gdzie:

R – zawartość składnika barwy czerwonej,

G – zawartość składnika barwy zielonej,

*B* – zawartość składnika barwy niebieskiej.

Jeśli zarówno w procesie kalibracji, jak i w badaniach eksperymentalnych niezmienne są odległości w pomiarowym układzie optycznym, kąt padania światła, rodzaj światła, to stałe są intensywność – *I* oraz nasycenie – *S*, a podstawę dla opisu koloru powierzchni badanej stanowi wyłącznie barwa – *H* (*hue*). Zmiana barwy następuje w funkcji zmian temperatury.

#### **B.2. PRZYGOTOWYWANIE POWIERZCHNI CIEKŁOKRYSTALICZNEJ**

W badaniach użyto ciekłych kryształów w formie mikrokapsułek. Wysokie lub niskie temperatury, zanieczyszczenia, rozpuszczalniki oraz promieniowanie ultrafioletowe powodują szybką degradację termoczułych ciekłych kryształów. W celu zwiększenia ich żywotności, krople ciekłego kryształu pokrywane są ciągłą powłoką polimerową, tworząc mikrokapsułki. Produktem procesu jest wodna zawiesina, którą nanosić można na powierzchnię poprzez napylanie, otrzymując cienką powłokę. Ciekłe kryształy wybrano kierując się wymogiem, aby pasmo aktywne zawierało się w zakresie zmian temperatury, która wystąpi podczas przepływu z wrzeniem badanej cieczy przez minikanał. Do napylania użyto ciekłych kryształów firmy *Hallcrest Inc., USA*.

Ciekłe kryształy i czarną warstwę podkładową przed natryskiem na powierzchnię rozcieńczano wodą destylowaną w stosunku 1:1 lub 2:1. Następnie roztwory wodne mieszanki ciekłokrystalicznej i czarnej farby podkładowej, dokładnie mieszano przy użyciu mieszadła mechanicznego przez około 15-25 minut. Przed wlaniem do zbiornika pistoletu natryskowego, każdy z tych roztworów filtrowano przez gęste filtry ceramiczne. Testowano różne techniki przygotowania poszczególnych warstw. Najlepszą techniką, pozwalającą na otrzymanie jednolitej powierzchni okazało się nanoszenie na szklaną szybę najpierw warstwy ciekłych kryształów, a po ich wyschnięciu warstwy czarnej, matowej farby podkładowej dostarczanej przez producenta ciekłych kryształów. Obie warstwy natryskiwano przy użyciu pistoletu, podłączonego do sprężarki i wyposażonego w wymienne dysze z możliwością regulacji strumienia wypływającej cieczy. Po natryśnięciu każdej warstwy pozostawiano ją do wyschnięcia i dopiero wtedy natryskiwano kolejną. Najlepsze efekty otrzymywano wtedy, gdy nakładane warstwy były bardzo cienkie.

#### **B.3. PROCEDURA I WYNIKI KALIBRACJI**

Do wyznaczenia optymalnego do warunków doświadczenia ustawienia kamery i światła dla reprodukcji barw, które będą odbijane przez powierzchnię ciekłokrystaliczną oraz doboru przesłony obiektywu, używany jest wzorzec standardu koloru *Macbeth Color Checker Rendition Chart*, firmy *Munsell Color* (USA). Porównywanie rejestrowanych przez kamerę barw ze wzorca w zadanych warunkach, umożliwia kontrolę powtarzalności obrazów otrzymywanych podczas wielokrotnych pomiarów. Przed rozpoczęciem procedury kalibracji należy sprawdzić ustawienie kamery, przesłony obiektywu, położenie świetlówek światła białego oraz dokładnie przysłonić inne źródła światła.

Do kalibracji wykorzystano stanowisko pomiarowe, pokazane na rysunku 4.1 w rozdziale 4 pracy. Oddzielny schemat układu przepływowego do skalowania barwy powierzchni folii z warstwą ciekłych kryształów pokazano na rysunku B.1.



**Rys. B.1.** Schemat układu przepływowego do kalibracji ciekłych kryształów: 1 – moduł pomiarowy z minikanałem, 2 – pompa przepływowa, 3 – elektryczny przepływowy podgrzewacz wody, 4 – filtr, 5 – odpowietrzacz, 6 – autotransformator

W procesie kalibracji woda o zadanej temperaturze doprowadzana jest w obiegu zamkniętym do kanału. Ogrzewanie wody następuje w wyniku jej cyrkulacji poprzez elektryczny przepływowy podgrzewacz wody z grzejnikami elektrycznymi (3), z płynną regulacją napięcia poprzez autotransformator (6).

Dla ustalonej temperatury rejestrowany jest barwny obraz powierzchni folii grzejnej, pokrytej warstwą ciekłych kryształów i wyznaczana jest średnia wartość składników RGB dla zadanej ilości pikseli. Po zmianie i ustaleniu się nowej temperatury wody, przepływającej przez kanał w module pomiarowym, dokonywana jest rejestracja odpowiadającej tej temperaturze barwy, co w konsekwencji prowadzi do wyznaczenia krzywej kalibracyjnej.

Jak wspomniano, wybrano system akwizycji obrazu kolorowego oparty na trzech kolorach podstawowych *R*, *G* i *B*. Do przetwarzania zarejestrowanego obrazu kolorowego wykorzystano omówiony wcześniej system HSI, dzięki któremu sygnał trójskładnikowy RGB zamieniany jest w pojedynczą macierz barw. Do akwizycji i przetwarzania danych z kalibracji barwy powierzchni ciekłokrystalicznej względem temperatury wykorzystano program w języku Delphi. Program zapisuje wartości liczbowe RGB dla każdego punktu (piksela) obrazu do pliku tekstowego. Dla każdego punktu obrazu wartości R, G i B przekształcane są w *Hue*, zgodnie z równaniem (B.1), i następnie uśredniane dla zadanej ilości pikseli. Końcowym rezultatem kalibracji jest zależność *temperatura = funkcja barwy (hue)*, zwana *krzywą kalibracyjną*, pokazana rysunku 4.12a w rozdziale 4. W punkcie 4.5.7 przedstawiono ponadto ocenę dokładności pomiarów temperatury powierzchni wykonanych metodą termografii ciekłokrystalicznej.

załącznik **C** 

# RYSUNKI UZUPEŁNIAJĄCE

# DO ROZDZIAŁU 4



**Rys. C.1.** Rezystancja właściwa materiału Haynes-230 w funkcji temperatury (materiały producenta)



**Rys. C.2.** Charakterystyka teksturowanej laserowo folii grzejnej (tekstura laserowa nr 2): a) widok, b) topografia 3D pojedynczego mikrowglębienia na powierzchni folii, c) przykładowy przekrój poprzeczny przez pojedyncze mikrowglębienie



**Rys. C.3.** Charakterystyka teksturowanej laserowo folii grzejnej (tekstura laserowa nr 3): a) widok, b) topografia 3D pojedynczego mikrowglębienia na powierzchni folii, c) przykładowy przekrój poprzeczny przez pojedyncze mikrowglębienie



**Rys. C.4.** Charakterystyka teksturowanej laserowo folii grzejnej (tekstura laserowa nr 4): a) widok, b) topografia 3D pojedynczego mikrowglębienia na powierzchni folii, c) przykładowy przekrój poprzeczny przez pojedyncze mikrowglębienie



**Rys. C.5.** Charakterystyka rozwiniętej powierzchni miedzianej otrzymanej w procesie piaskowania: a) widok, b) topografia 3D fragmentu powierzchni z miniwgłębieniami, c) przekrój poprzeczny przez fragment powierzchni z miniwgłębieniami

4	•
10	
~ ~	
_	5
- 52	
0	:
1	
- 21	•
0	
2	
2	
~ ~	•
- F	2
	•
<u>v</u>	
- 2	١.
	7
್ಷಸ್ತ	٤.
-	
J J	
5	
-	
- 8	÷.
2	2
9	5
4	)
_	
4	
~ ~	'
-	5
- 22	Ľ
1	
~ 2	•
- 5	
- 5	
_N	
1	
12	
9	5
- 2	
2	
>	
~	
`°C	)
- 5	
+	
0	
_	
ž	2
m	
unt	
'ama	
Iram	
aram	
param	
param	L and
h param	- L
ch param	
ch param	I I I I I I I I I I I I I I I I I I I
vch param	2 I I
wvch param	
wych param	
owych param	
vowych parami	
wowch param	
awowych parame	
tawowch parame	
stawowych param	
dstawowych parami	
odstawowych parami	
odstawowych parami	
podstawowych param	Lamenta in a state of a second
i nodstawowych param	
a podstawowych param	
sia podstawowych parami	
cia podstawowych parami	
acia podstawowych parami	
kacia podstawowych parami	
îkacia podstawowych parami	
fikacia nodstawowych parami	
vfikacia podstawowych parami	
cyfikacia podstawowych parami	
ecvfikacia podstawowych parami	
vecvfikacja nodstawowych narami	
'necvfikacia nodstawowych parami	
Specyfikacia podstawowych parami	
Specyfikacia podstawowych paramu	$\sim L \sim 2$
L. Specvfikacia podstawowych paramu	$\sim \sim L \sim 2$
1. Specyfikacia podstawowych param	$- \sim L \sim 2$
.1. Specyfikacia podstawowych param	
<b>C.1.</b> Specyfikacia podstawowych parami	
A C.1. Specyfikacia podstawowych param	
A C.1. Specyfikacia podstawowych parami	$ = - = - \sim L = - \sqrt{2} - \frac{1}{2} - $
ELA C.1. Snecvfikacia podstawowych parami	

	Re	Ι		480	710	845	515	440	470	490	514	480	484	480	510	680	710	730
	$\Delta T_{sub}$	K		59	59	57	52	55	56	55	51	53	53	51	52	48	47	46
	q.	$kW/m^2$		7,19-23,11	8,38 - 25,26	9,07 – 32,93	9,32 – 26,98	8,49 - 27,59	12,23 - 26,30	7,87 - 25,75	10,28-25,49	6,84 - 25,49	7,93 – 24,62	7,28 - 22,05	11,94-26,05	7,84 - 30,19	9,59 - 28,40	13,71 - 28,19
amycn	d <sub>V</sub>	kW/m <sup>3</sup>		$7,07.10^4 - 2,27.10^5$	$8,24\cdot10^4-2,49\cdot10^5$	$8,93 \cdot 10^4 - 3,24 \cdot 10^5$	$9,17.10^4 - 2,66.10^5$	$8,36.10^4 - 2,72.10^5$	$1,2.10^{5}-2,59.10^{5}$	$7,74 \cdot 10^4 - 2,53 \cdot 10^5$	$1,01 \cdot 10^{5} - 2,51 \cdot 10^{5}$	$6,73 \cdot 10^4 - 2,51 \cdot 10^5$	$7, 8 \cdot 10^4 - 2, 42 \cdot 10^5$	$7,16{\cdot}10^4\!-\!2,17{\cdot}10^5$	$1,17.10^{5} - 2,56.10^{5}$	$7,71 \cdot 10^4 - 2,97 \cdot 10^5$	$9,44 \cdot 10^4 - 2,79 \cdot 10^5$	$1,35 \cdot 10^{5} - 2,77 \cdot 10^{5}$
ryment	$p_{in}$	kPa		149	153	149	125	114	119	129	133	121	121	119	125	124	122	115
ian ekspei	5	$kg/(m^2s)$	2	159	222	262,5	157	160	159	158	156	158	158	158	157	240	240	237
си рас	И	m/s	FC-73	0,09	0,13	0,15	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,14	0,14	0,14
iauzowany	${oldsymbol{0}}_{_{V}}$	$m^{3/S}$		$5,51.10^{-6}$	7,79.10 <sup>-6</sup>	9,22.10 <sup>-6</sup>	$5,51.10^{-6}$	$5,51.10^{-6}$	$5,51.10^{-6}$	$5,51 \cdot 10^{-6}$	$5,51 \cdot 10^{-6}$	$5,51.10^{-6}$	$5,51 \cdot 10^{-6}$	$5,51.10^{-6}$	$5,51 \cdot 10^{-6}$	$5,51.10^{-6}$	$5,51.10^{-6}$	$5,51.10^{-6}$
ch parametrow an	Folia grzejna – rodzaj			ad	ũq	ac	âc	ac	ad	ad	ac	ac	ac	ad	ac	kL1	kL1	kL1
oastawowyo	Położenie kanału	0		90	06	90	90	180	0	06	45	135	180	180	0	90	180	0
ucju p	$W_M$	mm		60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	40	40	40
m Ga	$H_M$	mm		-	1	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-
da	Nr serii			slel	s1e2	s1e3	s1e4	s1e5	s1e6	s2e1	s2e2	s2e3	s2e4	s2e5	s2e6	s3e1	s3e2	s3e3
	Nr eksp.			1	2	б	4	5	9	7	8	6	10	11	12	13	14	15

920	865	901	006	1025	880	854	874	867	882	730	850	648	665	665	670	661	640	675	672
38	32	38	38	28	42	43	42	43	44	45	46	43	42	42	42	42	33	42	42
8,18-18,10	5,37 - 28,20	9,93 - 17,35	8,90 - 24,11	11,51 - 21,17	9,94 - 26,85	12, 17 - 30, 57	8,05 - 27,00	8,71 – 34,71	11,17 - 30,37	10,80-28,06	11,38 - 33,86	9,09 - 23,37	9,35 - 18,31	10,90 - 16,47	9,53 – 21,26	10,09-23,23	5,37 - 13,70	10,29-22,92	9,60 - 22,45
$8,05{\cdot}10^4 - 1,78{\cdot}10^5$	$5,28 \cdot 10^4 - 2,78 \cdot 10^5$	$9,77.10^4 - 1,71.10^5$	$8,76.10^4 - 2,37.10^5$	$1,13.10^{5}-2,08.10^{5}$	$9,79.10^4 - 2,64.10^5$	$1,2.10^{5}-3,01.10^{5}$	$7,93.10^4 - 2,66.10^5$	$8,57.10^4 - 3,42.10^5$	$1, 1 \cdot 10^{5} - 2, 99 \cdot 10^{5}$	$1,05.10^{5} - 2,76.10^{5}$	$1,12.10^{5} - 3,33.10^{5}$	$8,95 \cdot 10^4 - 2,3 \cdot 10^5$	$9,21.10^4 - 1,8.10^5$	$1,07.10^{5} - 1,62.10^{5}$	$9,38{\cdot}10^4 - 2,09{\cdot}10^5$	$9,93.10^4 - 2,29.10^5$	$5,28 \cdot 10^4 - 1,35 \cdot 10^5$	$1,01.10^{5} - 2,26.10^{5}$	$9,45 \cdot 10^4 - 2,21 \cdot 10^5$
120	112	110	110	133,5	116,5	135	122,5	122	120	132	125	124,5	123	115,5	120,5	125	115	128	129
283	286	285	284	275	286	287	286	286	285	237	287	212	212	212	211	211	213	211	211
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,14	0,17	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
$6,65.10^{-6}$	$6,65 \cdot 10^{-6}$	$6,65.10^{-6}$	$6,65.10^{-6}$	6,65.10 <sup>-6</sup>	6,65.10 <sup>-6</sup>	6,65.10 <sup>-6</sup>	$6,65 \cdot 10^{-6}$	$6,65.10^{-6}$	$6,65 \cdot 10^{-6}$	$5,51.10^{-6}$	$6,65.10^{-6}$	$4,94.10^{-6}$	$4,94.10^{-6}$	$4,94.10^{-6}$	$4,94.10^{-6}$	$4,94.10^{-6}$	$4,94.10^{-6}$	$4,94.10^{-6}$	$4,94.10^{-6}$
kL2	ac	ac	ac	cL1	cL1	ac	kP	cP	cP	kL3	ac	kL4	kL4	kL4	kL4	cL1	cL1	cL1	cL1
06	90	180	0	06	0	06	06	06	0	06	06	06	06	0	180	06	180	0	45
40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
-	-	-	-	1	1	-	-	1	1	1	-	-	1	1	1	-	-	1	-
s5e1	s6e1	s6e2	s6e3	s7e1	s7e2	s8e1	s9e1	s10e1	s10e2	sllel	s13e1	s14e1	s14e2	s14e3	s14e4	s15e1	s15e2	s15e3	s15e4
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35

Luige Link C
--------------

36	s15e5		40	135	cL1	$4,94.10^{-6}$	0,12	213	121	$6,91 \cdot 10^4 - 2,04 \cdot 10^5$	7,02-20,71	42	645
37	s15e6		40	06	cL1	$3,23.10^{-6}$	0,08	138	128	$7,68{\cdot}10^4 - 1,23{\cdot}10^5$	7,81-12,49	40	443
38	s15e7	1	40	180	cL1	$3,23.10^{-6}$	0,08	137	120	$5,52 \cdot 10^4 - 1,39 \cdot 10^5$	5,61-14,07	37	446
39	s15e8	1	40	0	cL1	$3,23.10^{-6}$	0,08	138	120	$8,68{\cdot}10^4 - 1,72{\cdot}10^5$	8,82-17,47	40	444
40	s15e9	1	40	06	cL1	$6,65{\cdot}10^{-6}$	0,17	284	129	$6,75 \cdot 10^4 - 2,09 \cdot 10^5$	6,85-21,28	40	905
41	s15e10		40	180	cL1	$6,65.10^{-6}$	0,17	285	106,5	$5,41 \cdot 10^4 - 2,4 \cdot 10^5$	5,50-24,38	36	875
42	sl6el	1	40	0	cL1	$6,65.10^{-6}$	0,17	281	114	$9,96.10^4 - 2,32.10^5$	10, 12 - 23, 53	33	945
42	s16e2	1	40	45	cL1	$6,65.10^{-6}$	0,17	283	118,5	$1,03.10^{5} - 1,95.10^{5}$	10,50 - 19,78	36	925
43	s16e3	1	40	135	cL1	$6,65.10^{-6}$	0,17	282	114	$7,83 \cdot 10^4 - 2,39 \cdot 10^5$	7,97-24,27	33	935
44	s16e4	1	40	06	cL1	$3,23.10^{-6}$	0,08	137	115,5	$9,93{\cdot}10^4 - 1,91{\cdot}10^5$	10,09 - 19,43	35	453
45	s16e5	1	40	06	cL1	$6,65{\cdot}10^{-6}$	0,17	282	117,5	$9,51 \cdot 10^4 - 2,37 \cdot 10^5$	9,67 - 24,04	34	940
46	s17e1	1	40	06	cL1	$6,65 \cdot 10^{-6}$	0,17	284	153	$6,19\cdot 10^4 - 2,5\cdot 10^5$	6,29-25,37	44	905
47	s17e2	1	40	06	cL1	$6,65 \cdot 10^{-6}$	0,17	283	208,5	$9,19{\cdot}10^4 - 2,87{\cdot}10^5$	9,34-29,20	55	916
48	s17e3	1	40	06	cL1	$6,65 \cdot 10^{-6}$	0,17	285	261	$9,47{\cdot}10^4 - 2,79{\cdot}10^5$	9,63 – 28,36	67	886
49	s17e4	1	40	0	cL1	$6,65{\cdot}10^{-6}$	0,17	284	198	$8,28 \cdot 10^4 - 3,06 \cdot 10^5$	8,42-31,06	55	901
50	s17e5	1	40	180	cL1	$6,65 \cdot 10^{-6}$	0,17	283	115	$8,56{\cdot}10^4 - 1,76{\cdot}10^5$	8,70-17,86	37	920
						Ň	ovec 71	00					
51	s21e1	-	40	90	cL1	$6,65.10^{-6}$	0,17	251	127	$6,48 \cdot 10^4 - 2,79 \cdot 10^5$	6,59 - 28,32	45	845
52	s21e2	1	40	90	cL1	$4,94.10^{-6}$	0,12	187	122	$8,58{\cdot}10^4 - 2,18{\cdot}10^5$	8, 72 - 22, 15	46	628
53	s22e1	-	40	90	cL1	$6,65.10^{-6}$	0,17	251	201	$6 \cdot 10^4 - 1,46 \cdot 10^5$	6,09 - 14,82	62	845

54	s22e2	1	40	06	cL1	$6,65 \cdot 10^{-6}$	0,17	251	274	$7, 1 \cdot 10^4 - 1, 42 \cdot 10^5$	7,22 - 14,42	77	845
55	s18e5	-	40	90	ac	$3,23.10^{-6}$	0,08	137	130	$8,1\cdot10^4 - 1,57\cdot10^5$	8,23 - 15,97	40	454
56	s19e1	-	40	90	ac	$4,94.10^{-6}$	0,12	210	201	$6,92 \cdot 10^4 - 2,35 \cdot 10^5$	7,03 - 23,91	55	680
57	s19e2	1	40	90	а	$4,94.10^{-6}$	0,12	211	249	$5,52 \cdot 10^4 - 2,38 \cdot 10^5$	5,61 - 24,23	64	671
58	s20e1	1,5	40	90	ය	$4, 4 \cdot 10^{-6}$	0,08	137	141	$5,89{\cdot}10^4-2,00{\cdot}10^5$	5,99 - 20,32	61	544
59	s20e2	1,5	40	06	ac	$5,3.10^{-6}$	0,09	145	141	$6,33\!\cdot\!10^4-2,16\!\cdot\!10^5$	6,44 - 21,97	58	655
60	s20e3	1,5	40	180	ac	$6, 1 \cdot 10^{-6}$	0,10	167	256	$1,04 \cdot 10^4 - 1,92 \cdot 10^5$	11,18 - 19,52	65	753
61	s20e4	1,5	40	0	ac	$6, 1 \cdot 10^{-6}$	0,10	167	248	$1, 1.10^{5} - 2, 25.10^{5}$	11,18-22,82	67	755
62	s20e5	0,7	40	90	ß	$6,1 \cdot 10^{-6}$	0,10	167	194	$7,\!26\!\cdot\!10^4-2,\!16\!\cdot\!10^5$	7,38 - 21,97	67	754
63	s20e6	0,7	40	90	ß	$4, 4 \cdot 10^{-6}$	0,07	137	198	$7,\!26\!\cdot\!10^4-2,\!16\!\cdot\!10^5$	7,38 - 19,52	60	544
						No	vec 7]	001					
64	s21e1		40	90	ac	$6,65 \cdot 10^{-6}$	0,17	251	127	$6,48\!\cdot\!10^4\!-\!2,79\!\cdot\!10^5$	6,59 - 28,32	45	845
65	s21e2		40	90	ac	$4,94.10^{-6}$	0,12	187	122	$8,58{\cdot}10^4\!-\!2,18{\cdot}10^5$	8,72-22,15	46	628
66	s22e1	1	40	90	а	$6,65{\cdot}10^{-6}$	0,17	251	201	$6, 0 \cdot 10^4 - 1, 46 \cdot 10^5$	6,09 - 14,82	62	845
67	s22e2	1	40	90	а	$6,65 \cdot 10^{-6}$	0,17	251	274	$7, 1 \cdot 10^4 - 1, 42 \cdot 10^5$	7,22 - 14,42	77	845
Oznac bT 1 _	zenia: tekstura	lacar	1 e/mo.	r Jeniowu	, LI	S — təkstnira	Jacarl	и с <sub>б</sub> и	, denior	omierzchni: FI 0	taketura lasarov	м с ем	Jeniov

lekslura laserowa 5, wychrek tekstura powierzchni; kL14 - tekstura laserowa 4, wycinek powierzchni; cL1 - tekstura laserowa 1, cała powierzchnia; kP -- LEKSIUIA IASETOWA 2, WYCHIEK POWIETZCHIII, KLY elektroerozyjna, wycinek powierzchni; cP - tekstura elektroerozyjna, cała powierzchnia, g - folia gładka leksula laserowa 1, wychiek powierzchili, kuż