

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

74

WARSZAWA—POZNAŃ 1977

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN,
80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszerza 14, tel. 41-12-71

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe

Warszawa 1977

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 350 + 90 egz.	Oddano do składania 1 II 1977 r.
Ark. wyd. 13,5. Ark. druk. 10,25.	Podpisano do druku 2 VIII 1977 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g.	Druk ukończono w sierpniu 1977 r.
Nr zam. 72/239, 70 × 100 cm. U-1/466.	Cena zł 42,—

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

JANUSZ KOWALSKI

Gdańsk

Określenie początku rozwiniętego wrzenia przechłodzonego w przepływie wymuszonym*

W pracy podano zależności na wyznaczanie początku rozwiniętego wrzenia przechłodzonego (PRWP) w przepływie dla wody oraz freonu 11, 21 i 22. Obowiązują one dla sprawdzonego doświadczalnie zakresu parametrów: gęstość strumienia ciepła $q=0,01 \div 1,76$ MW/m², ciśnienia $1 \div 139$ bar, prędkości masowej $G=46,5 \div 3500$ kg/m²·s dla różnej geometrii kanału (o przekroju kołowym, pierścieniowym i prostokątnym). Eksperymentalne określenie PRWP wykonano poprzez prześwietlanie kanału promieniami γ . Własne badania przeprowadzono dla wody oraz freonu 11 i 21.

Spis oznaczeń

$a, a_1,$	q – gęstość strumienia cieplnego,
b, b_1, c – wykładniki potęgowe,	r – ciepło parowania,
A, A_1 – stałe,	$Re = \frac{G \cdot D_h}{\mu}$ – liczba Reynoldsa,
c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,	T – temperatura,
D – średnica,	$\Delta T_p = T_s - T_{PRWP}$ – średnie przechłodzenie cieczy w PRWP w odniesieniu do temperatury nasycenia,
F – przekrój kanału,	w – prędkość przepływu,
g – przyspieszenie ziemskie,	λ – przewodność cieplna,
G – prędkość masowa,	μ – lepkość dynamiczna,
l – wielkość charakteryzująca promień odrywającego się pęcherzyka, długość,	Ω – obwód kanału,
p – ciśnienie,	ρ – gęstość,
$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}$ – liczba Prandtla,	σ – napięcie powierzchniowe.

Indeksy

c – faza ciekła,	s – temperatura nasycenia,
h – średnica hydrauliczna,	w – średnica wewnętrzna,
o – wlot kanału,	$'$ – stan nasycenia.
p – faza parowa,	

* Praca wykonana w ramach problemu resortowego PAN-19, grupa tematyczna 3.

1. Wprowadzenie

Podczas przepływu dwufazowego z wrzeniem przechłodzonym wyodrębnić można dwa obszary: porowatości przyściennej i przemieszczonej. Istnienie tych dwóch obszarów potwierdzają liczne prace eksperymentalne [1, 2, 3]. W obszarze porowatości przyściennej, generujące na ścianie pęcherzyki, ze względu na zbyt małą grubość przegrzanej warstwy przyściennej, nie mogą wzrastać do rozmiarów potrzebnych do oderwania się od powierzchni kanału. Stan taki trwa do początku rozwiniętego wrzenia przechłodzonego (PRWP), w którym istniejące warunki termiczne i hydrodynamiczne są wystarczające do odrywania się pęcherzyków pary od ścianki kanału. Od tego punktu rozpoczyna się obszar porowatości przemieszczonej, w którym odrywające się pęcherzyki kondensują w przechłodzonym rdzeniu cieczy.

Dokładne określenie PRWP stanowiącego granicę między dwoma wymienionymi obszarami ma istotny wpływ na określenie objętościowej zawartości fazy parowej i warunków stabilności przepływu podczas wrzenia przechłodzonego. Istnieje niewielka liczba prac dotyczących wyznaczania PRWP. Mają one zwykle charakter eksperymentalny i dotyczą przeważnie wody jako czynnika roboczego. Do nielicznej grupy opracowań opartych na analizie teoretycznej należą prace Leviego [4], Stauba [5] oraz półempiryczna Ūnala [6]. Prace [4, 5] opierają się na założeniu, że PRWP jest scharakteryzowany przez oderwanie się pierwszych pęcherzy pary od ścianki. Przechłodzenie cieczy w PRWP określono na podstawie równań otrzymanych z bilansu sił działających na pęcherzyki w chwili oderwania od ścianki, oraz założonego rozkładu temperatury od wierzchołka pęcherza do osi kanału. Otrzymane wyrażenia posiadają stałe, które określono z badań. Powyższe modele dają dość poważne błędy, szczególnie przy małych prędkościach przepływu. Ponadto, ze względu na skomplikowaną postać posiadają ograniczone zastosowanie. Istnieje pewna liczba opracowań, w których autorzy przedstawili zależności empiryczne służące do obliczenia przechłodzenia cieczy w PRWP. Do tej grupy należą prace Bowringa [2], Rouhaniego [7], Miropolskiego [8] oraz Ahmeda [9]. Prezentowane w powyższych pracach korelacje, mogą być stosowane tylko dla wody przy dużych prędkościach przepływu.

2. Wielkości charakteryzujące PRWP

Z powyższych rozważań wynika, że nie ma wystarczająco dokładnego i ogólnego modelu teoretycznego czy korelacji, przy pomocy której można opisać PRWP przy różnych prędkościach przepływu. Ponadto zdecydowana większość metod obliczeniowych nadaje się do stosowania tylko przy przepływie dwufazowym wody. W niniejszej pracy opracowano zależności kryterialne na przechłodzenie cieczy ΔT_p w PRWP dla przepływu dwufazowego wody i innych czynników.

Zasadniczymi parametrami opisującymi wrzenie przechłodzone w PRWP są parametry opisujące konwekcyjny ruch cieczy oraz parametry charakteryzujące proces wrzenia „w objętości” [6]. W zależności od prędkości przepływu udział powyższych parametrów zmienia się. Przy dużych prędkościach przepływu, przy których obserwuje się

oddziaływanie konwekcji wymuszonej na pęcherzyk w chwili oderwania się od ścianki, PRWP można opisać funkcją parametrów

$$f[g, G, D_h, c_p, r, \lambda', \mu', \Delta T_p] = 0. \quad (1)$$

Przeprowadzając analizę wymiarową parametrów w równaniu (1) dochodzi się do postaci liczb kryterialnych

$$f\left[\frac{q}{Gr}, \frac{c_p \Delta T_p}{r}, \frac{GD_h}{\mu'}, \frac{c_p \mu'}{\lambda'}\right] = 0. \quad (2)$$

PRWP będzie więc scharakteryzowany przez liczbę bezwymiarową $q/G \cdot r$, względne przechłodzenie cieczy $c_p \cdot \Delta T_p / r$ (które można zinterpretować jako stosunek ciepła nagrzewania do ciepła tworzenia się fazy parowej w PRWP) oraz przez powszechnie znane liczby charakteryzujące konwekcyjny ruch cieczy – liczbę Reynoldsa $Re = G \cdot D_h / \mu'$ i liczbę Prandtla $Pr = c_p \cdot \mu' / \lambda'$.

Na podstawie równania (2) względne przechłodzenie cieczy w PRWP, w odniesieniu do temperatury nasycenia, można przedstawić zależnością

$$\frac{c_p \Delta T_p}{r} = A \left(\frac{q}{Gr}\right)^a Pr_c^b Re_c^c. \quad (3)$$

Stałą A oraz wykładniki a, b, c wyznaczono w rozdziale 4 na podstawie eksperymentów własnych i innych badaczy.

Przy małych prędkościach przepływu decydującymi parametrami opisującymi PRWP są parametry charakteryzujące proces wrzenia „w objętości”. W związku z powyższym, w dalszej analizie opartej na równaniu (1) pominięto parametry charakteryzujące konwekcję wymuszoną: prędkość masową G oraz średnicę hydrauliczną kanału D_h wprowadzając proporcjonalny do średnicy odrywającego się pęcherzyka wymiar l wyrażony zależnością

$$l = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_c - \rho_p)}}. \quad (4)$$

Wielkość ta jest przyjmowana bardzo często za wymiar charakterystyczny w analizie kryterialnej procesu wrzenia „w objętości”. W związku z powyższym równanie (1) w zmodyfikowanej postaci przybiera postać

$$f[q, l, c_p, r, \lambda', \mu', \Delta T_p] = 0. \quad (5)$$

Na podstawie analizy wymiarowej otrzymano

$$\frac{c_p \Delta T_p}{r} = f\left(\frac{ql}{r\mu'}, \frac{c_p \mu'}{\lambda'}\right). \quad (6)$$

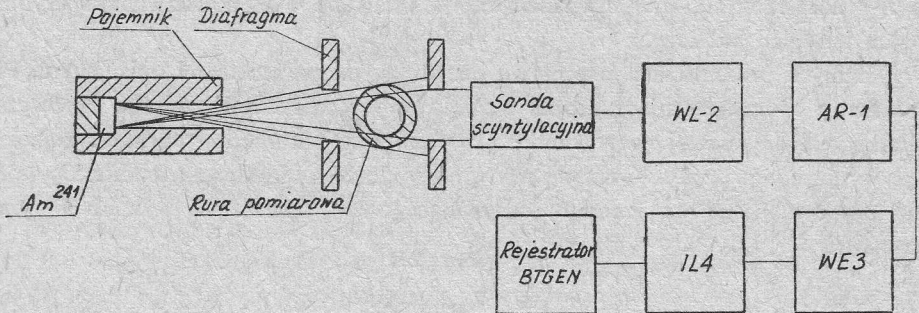
Z powyższego wynika, że względne przechłodzenie cieczy w PRWP opisuje liczba $(q \cdot l) / (\mu' \cdot r)$ charakteryzująca ruch pęcherzyka w chwili oderwania od ścianki oraz liczba Prandtla $Pr_c = c_p \cdot \mu' / \lambda'$. Zależność (6) można wyrazić w postaci funkcji potęgowej

$$\frac{c_p \Delta T_p}{r} = A_1 \left(\frac{q}{r\mu'} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_c - \rho_p)}}\right)^{a_1} Pr_c^{b_1}. \quad (7)$$

Założono, że wpływ gęstości strumienia cieplnego q , a zatem liczb $q/G \cdot r$ oraz $q/\mu' \cdot r \times \sqrt{\sigma/g(\rho_c - \rho_p)}$ na proces wrzenia daje się ująć wykładnikiem potęgi $a = a_1 = 0,7$, potwierdzonym przez wielu badaczy zarówno przy przepływie wody [10] i freonów [11].

3. Eksperymentalne badania PRWP

W eksperymentach przeprowadzonych przez Griffitha [1] i Bowringa [2] zaobserwowano, że PRWP charakteryzuje się gwałtownym przyrostem fazy parowej. Tę charakterystyczną cechę wykorzystano w przeprowadzonych w pracy eksperymentach. Badania wykonano na specjalnym stanowisku badawczym, szczegółowo opisanym w pracy [12], w którym czynnikiem roboczym był freon 11 i 21 oraz woda. Czynnik przepływa w rurze pionowej o długości 4200 mm i średnicy wewnętrznej $D_w = 21$ mm, oraz rurze poziomej długości 2760 mm o średnicy $D_w = 21$ i 13 mm. Rurę grzano prądem elektrycznym bezpośrednio przyłożonym do ścianki. Gwałtowny przyrost fazy parowej rejestrowano przy użyciu specjalnej, uprzednio wzorcowanej aparatury, metodą absorpcji promieniowania γ [13]. Metoda ta polega na pomiarze natężenia promieniowania γ osłabionego przez warstwę absorbenta, w tym przypadku jest to ciecz z pęcherzykami pary. Zestaw aparatury pomiarowej (rys. 1) składa się ze źródła promieniotwórczego (izotop – ameryk



Rys. 1. Schemat zestawu do identyfikacji PRWP metodą absorpcji promieniowania γ

241), dwóch diafragm, sondy scyntylacyjnej oraz aparatury elektronicznej. W skład tej aparatury wchodzi: wzmacniacz WL2, analizator różnicowy AR1, układ formujący WE3, integrator liniowy IL4 oraz rejestrator kompensacyjny typu BT6EN, którym rejestrowano zwiększone natężenie promieniowania γ w wyniku gwałtownego wzrostu fazy parowej w PRWP. Ponieważ źródło, diafragmy i sonda umieszczone były w niezmiennym położeniu na długości rury, PRWP dla różnych warunków termicznych i hydrodynamicznych ustalano poprzez regulację temperatury T_0 na wlocie kanału. Temperaturę T_0 mierzono termoparą płaszczową NiCr – Ni o średnicy zewnętrznej 1 mm, przy użyciu wielozakresowego kompensatora typu QTK Metra oraz rejestratora temperatury typu MKW.

W przeprowadzonej w punkcie 2 analizie, za charakterystyczną wielkość PRWP przyjęto przechłodzenie cieczy w tym punkcie ΔT_p , które na podstawie bilansu energetycznego można określić zależnością

$$\Delta T_p = (T_s - T_0) - \frac{l_{\text{PRWP}} q \Omega}{G F c_p} \quad (8)$$

W eksperymentach położenie PRWP na długości kanału $l_{PRWP} = \text{const}$ (dla rury pionowej $l_{PRWP} = 3,9$ m, a dla poziomej $l_{PRWP} = 2,33$ m).

4. Wyniki pomiarów

Eksperymentalne wartości przechłodzenia cieczy ΔT_p w PRWP dla freonów 21 i 11 oraz wody przedstawiono w tabeli 1. Przy opracowaniu zależności (3) i (7) wykorzystano także badania innych autorów (tab. 2). Analiza danych eksperymentalnych wykazała, że oddziaływanie konwekcji wymuszonej na wzrost pęcherzyka i jego oderwanie obserwuje się przy prędkościach przepływu powyżej 0,4 m/s. Spostrzeżenia te pokrywają się z obser-

Tabela 1

Eksperymentalna wartość względnego przechłodzenia cieczy

$$\frac{c_p \Delta T_p}{r} \text{ dla PRWP (badania własne)}$$

Lp.	Czynnik	Geometria kanału	Ciśnienie p_s [bar]	Prędkość masowa G $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]$	Gęstość strumienia cieplnego q [MW/m ²]	$\frac{c_p \Delta T_p}{r}$	Punkty na rys. 2 i 3
1	freon 21	rura $D_w = 21$ mm kanał pionowy	4,95	200	0,01	0,0225	1
2			4,95	289	0,01	0,0242	
3			5,05	1080	0,0305	0,063	
4			7,95	1050	0,031	0,068	
5			10,9	1050	0,015	0,0408	
6			10,9	1050	0,03	0,061	
7			10,9	1060	0,046	0,075	
8			10,9	1050	0,0495	0,082	
9			10,9	1050	0,067	0,1	
10			10,9	542	0,0309	0,0867	
11			10,9	1480	0,0305	0,048	
12			18,2	1050	0,032	0,086	
13			8,0	1060	0,03	0,0546	
14	freon 11	rura $D_w = 21$ mm	5,25	298	0,015	0,046	2
15	kanał pionowy	6,6	560	0,019	0,07		
16	woda	rura $D_w = 21$ mm	1,8	166	0,1	0,014	3
17		kanał poziomy	3	400	0,1	0,024	
18		rura $D_w = 21$ mm	2,5	238	0,1	0,015	
19		kanał pionowy	3	400	0,075	0,019	
20		3	570	0,125	0,022		

wacjami Ünala [6], który określa tę prędkość wartością $w = 0,45$ m/s. W związku z powyższym, przy prędkościach przepływu $w \geq 0,4$ m/s zastosowano przy opracowaniu danych eksperymentalnych zależność (3), natomiast przy $w < 0,4$ m/s zależność (7).

W zależności (3) wartość wykładnika potęgowego b , wyznaczonego na podstawie własnych danych eksperymentalnych oraz zawartych w [17, 21], wynosi $b=0,7$. Dla określenia wykładnika c sporządzono w układzie logarytmicznym wykres

$$\frac{c_p \Delta T_p}{r \left(\frac{q}{Gr}\right)^{0,7} Pr^{0,7}} = f(Re)$$

(rys. 2), z którego wynika zależność kryterialna

$$\frac{c_p \Delta T_p}{r} = 1,9 \left(\frac{q}{Gr}\right)^{0,7} Pr_c^{0,7} Re_c^{0,16}. \quad (9)$$

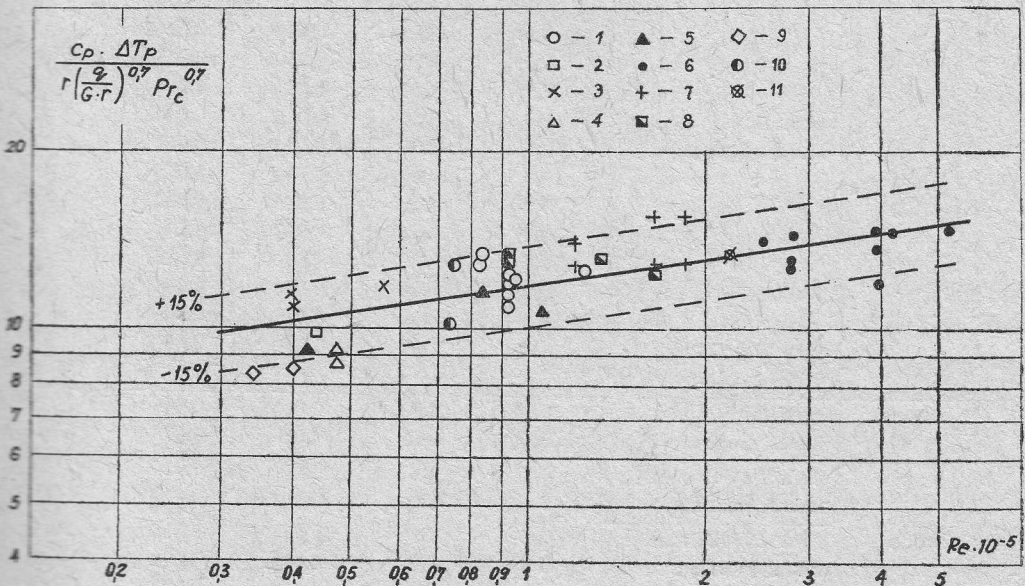
Powyższa zależność obowiązuje dla sprawdzonego doświadczalnie zakresu liczb bezwymiarowych

$$0,025 \cdot 10^{-3} < \frac{q}{Gr} < 2,27 \cdot 10^{-3},$$

$$0,84 < Pr_c < 3,5,$$

$$30 \cdot 10^3 < Re_c < 505 \cdot 10^3.$$

Podobnie określono wartość wykładnika b_1 oraz stałą c_1 w zależności (7). Wykreślony



Rys. 2. Zależność $\frac{c_p \Delta T_p}{r \left(\frac{q}{Gr}\right)^{0,7} Pr^{0,7}}$ od liczby Re przy prędkościach $w \geq 0,4$ m/s. Punkty 1, 2, ... 11 odnoszą się do danych zawartych w tabeli 1 i 2.

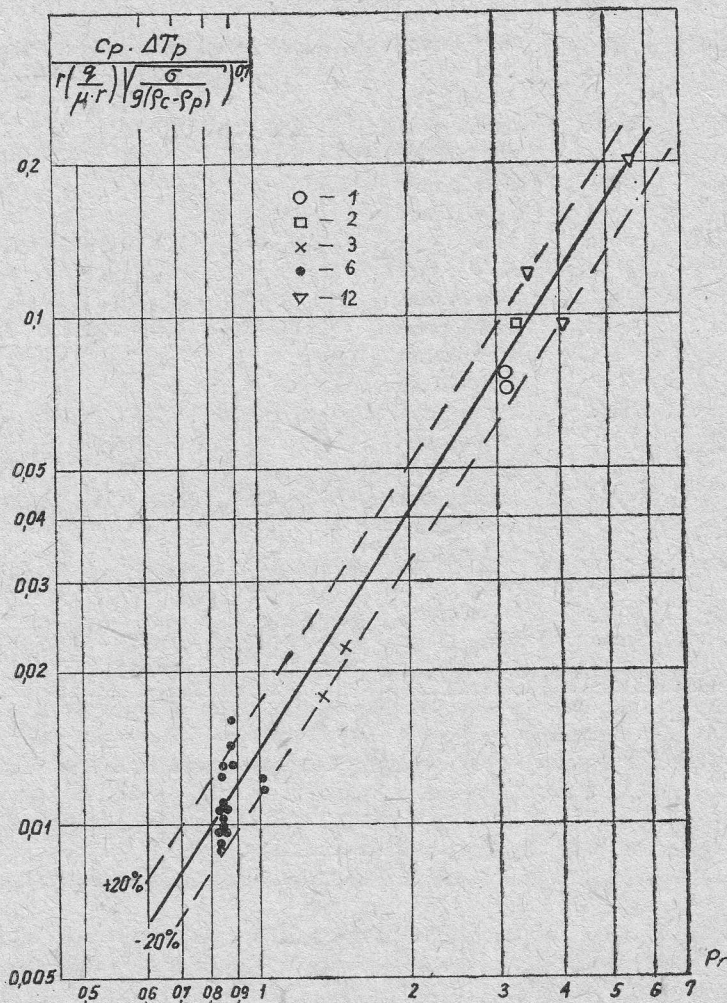
sposób wyznaczania tej wielkości pokazano na rys. 2, gdzie funkcja

$$\frac{c_p \Delta T_p}{r \left(\frac{q}{\mu' r} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_c - \rho_p)}} \right)^{0,7}} = f(Pr).$$

Z nachylenia otrzymanej prostej wynika, że wartość wykładnika $b_1 = 1,55$, zaś stała $c_1 = 0,0135$.

Opracowana korelacja ma postać:

$$\frac{c_p \Delta T_p}{r} = 0,0135 \left(\frac{q}{\mu' r} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_c - \rho_p)}} \right)^{0,7} Pr_c^{1,55}. \quad (10)$$



Rys. 3. Zależność $\frac{c_p \Delta T_p}{r \left(\frac{q}{\mu r} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_c - \rho_p)}} \right)^{0,7}}$ od liczby Pr przy prędkościach przepływu $w < 0,4$ m/s

Dane eksperymentalne wykorzystane przy opracowaniu zależności (9) i (10)

Autor	Czynnik	Geometria kanału	Ciśnienie p_s [bar]	Gęstość strumienia ciepłego q [MW/m ²]	Prędkość masowa G [kg/m ² s]	Punkty na rys. 2 i 3
Evangelisti [14]	woda	kanał, przekrój pierścieniowy $D_z=13$ mm $D_w=7$ mm	1	$0,437 \div \div 0,885$	1410	4
Ferrelli [15]	woda	rura $D_w=12,7$ mm	8,3	$0,364 \div \div 0,678$	$530 \div 1320$	5
Rouhani [16]	woda	kanał, przekrój pierścieniowy $D_z=25$ mm $D_w=12$ mm	$9,83 \div 50$	$0,3 \div 0,9$	$80 \div 1360$	6
Bartolomey [17]	woda	rura $D_w=15$ mm $D_z=24$ mm	$15 \div 45$	$0,38 \div 0,8$	900	7
Foglia [18]	woda	kanał, przekrój prostokątny $25,4 \times 2,6$ mm	$59 \div 90$	$0,865 \div \div 1,76$	$1850 \div 3500$	8
Maurer [19]	woda	kanał, przekrój prostokątny $25,4 \times 2,2$ mm	$82,5 \div 110$	$0,785 \div \div 1,18$	$800 \div 840$	9
Egen [20]	woda	kanał, przekrój prostokątny $25,4 \times 2,6$ mm	138	$0,95 \div 1,56$	1150	10
Ünal [6]	woda	rura $D_w=8$ mm	139	0,38	2121	11
Zuber [21]	freon 22	rura $D_w=10$ mm	$11 \div 32,1$	$0,0137 \div \div 0,0334$	$46,5 \div 180$	12

Zakres stosowalności korelacji (10) określają bezwymiarowe liczby w zakresie

$$0,261 < \frac{q}{\mu r} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_c - \rho_p)}} < 5,82,$$

$$0,84 < Pr_c < 5,5.$$

Analiza 41 danych eksperymentalnych przechłodzenia cieczy ΔT_p w PRWP przy prędkościach przepływu $w \geq 0,4$ m/s (rys. 2) wykazała, że 83% pomiarów posiada odchyłki mniejsze niż 15% od korelacji (9). Dla małych prędkości ($w < 0,4$ m/s) 87% pomiarów odbiega mniej niż 20% od zależności wyrażonej wzorem (10).

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań teoretycznych i eksperymentalnych stwierdzono:

- w zależności od prędkości przyływu, istnieją w PRWP różne mechanizmy przenoszenia ciepła; przy małych prędkościach ($w < 0,4$ m/s) nie obserwuje się wpływu konwekcji wymuszonej na wzrost pęcherzyka oraz na jego oderwanie się od ścianki,
- wpływ geometrii kanału przy dużych prędkościach jest niewielki, przy prędkościach $w < 0,4$ m/s jest pomijalny,
- nie stwierdzono zauważalnej różnicy w wartościach przechłodzenia cieczy ΔT_p w PRWP między przepływem pionowym a poziomym, przy prędkościach przepływu $0,166 \div 0,4$ m/s,
- praktycznym wynikiem danej pracy jest otrzymanie łatwych w użyciu korelacji, za pomocą których można wyznaczyć przechłodzenie cieczy ΔT_p w PRWP w szerokim zakresie parametrów termicznych i hydrodynamicznych, przy różnej średnicy i geometrii kanału, dla przepływu wody i innych czynników, np. freonów,
- zależności (8), (9) lub (10) pozwalają także na określenie miejsca na długości kanału, w którym rozpoczyna się PRWP.

Praca wpłynęła do Redakcji w styczniu 1976 r.

Literatura

- [1] P. Griffith, J. Clark, W. M. Rohsenow, *Void Volumes in Subcooled Boiling Systems*. ASME Paper 58-HT-19, 1958.
- [2] R. W. Bowring, *Physical Model, Based on Bubble Detachment Calculation of Steam Voidage in the Subcooled Region of Heated Channel*. HPR 10, Institute for Atomenergi, Halden, Norway, 1962.
- [3] G. Bijwaard, F. W. Staub, N. Zuber, *A Program of Two-Phase Flow Investigation*. Eleventh Quarterly Report, GEAP-5067, 1965.
- [4] S. Levy, *Forced Convection Subcooled Boiling-Prediction of Vapor Volumetric Fraction*. Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 10, 1967.
- [5] F. W. Staub, *The Void Fraction in Subcooled Boiling-Prediction of the Initial Point of Net Vapor Generation*. J. Heat Transfer, Trans. ASME, series C, vol. 90, 1968.
- [6] H. C. Ůnal, *Determination of the Initial Point of Net Vapor Generation in Flow Boiling Systems*. Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 18, 1975.
- [7] S. Z. Rouhani, *Calculation of Steam Volume Fraction in Subcooled Boiling*. J. Heat Transfer, Trans. ASME, series C, vol. 90, 1968.
- [8] E. L. Miropolskij, R. I. Sznjejerova, A. I. Karmyszewa, *Parosodierzhanije pri napornom dviženii parovodnoj smiesi s podvodom tiepla i v adiabaticheskich uslovijach*. Tieploenergetika Nr 5, 1971.
- [9] S. Y. Ahmad, *Axial Distribution of Bulk Temperature and Void Fraction in a Heated Channel with Inlet Subcooling*. J. Heat Transfer, Trans. ASME, series C, vol. 92, 1970.
- [10] S. S. Kutateladze, *Osnovy teorii tieploobmienna*. Maszgiz. Moskva – Leningrad 1957.
- [11] I. I. Gogonin, *Tieploobmien pri kipiennii frieona-21 v uslovijach svobodnoj konvekcii*. Chołod. Tiechnika, nr 3/1970.
- [12] J. Kowalski, *Objętościowa zawartość fazy parowej w przepływie dwufazowym*. Praca doktorska, Pol. Gdańska, 1975.

- [13] E. Śliwicki, J. Kowalski, *O pewnych metodach pomiaru objętościowej zawartości fazy parowej w przepływie dwufazowym*. Biuletyn IMP PAN, nr 800, 1974.
- [14] R. Evangelisti, P. Lupoli, *The Void Fraction in Annular Channel at Atmospheric Pressure*. Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 12, 1969.
- [15] J. K. Ferrell, *A Study of Convection Boiling Inside Channels*. North Carolina State University, Raleigh, 1964.
- [16] S. Z. Rouhani, *Void Measurement in the Region of Subcooled and Low Quality Boiling*. Proceedings of Symposium on Two-Phase Flow, Exeter, vol. 2, 1965.
- [17] G. G. Bartolomey, V. M. Čanturija, *Ekspierimentalnoje issledowanije istinnych parosodierzaniij pri kipieni niedogrietoj vody v viertikalnych trubach*. Tiepłoeniergetika Nr 2, 1967.
- [18] J. J. Foglia, F. G. Peter, H. M. Epstein, R. O. Wooton, D. A. Dingee, J. W. Chastain, *Boiling Water Void Distribution and Slip Ratio in Heated Channels*, USAEC Report BMI 1517, 1961.
- [19] G. W. Maurer, *A Method of Predicting Steady-State Boiling Vapor Fractions in Reactor Coolant Channels*. USAEC Report WAPD-BT-19, 1960.
- [20] R. A. Egen, D. A. Dingee, J. W. Chastain, *Vapor Formation and Behavior in Boiling Heat Transfer*. USAEC Report BMI-1163, 1957.
- [21] N. Zuber, F. W. Staub, G. Bijwaard, P. G. Kroeger, *Steady State and Transient Void Fraction in Two-Phase Flow Systems, Final Report for the Program of Two-Phase Flow Investigation*. Atomic Power Equipment Department General Electric. Report Nr GEAP-5417, 1966.

Определение начала интенсивного парообразования при кипении с недогревом

Резюме

В работе представлен эмпирический метод определения начала интенсивного парообразования при кипении с недогревом в вынужденном течении. При скоростях выше 0,4 м/сек, когда на возрастание пузырька решительно влияет вынужденная конвекция, средний недогрев жидкости ΔT_p , в начале интенсивного парообразования определяется зависимостью (9). В случае малых скоростей ($w < 0,4$ м/сек), среднее переохлаждение жидкости ΔT_p описывается уравнением (10).

Экспериментальные исследования недогрева ΔT_p в начале интенсивного парообразования проводились при помощи специальной аппаратуры методом абсорбции излучения γ . Исследования проводились для нескольких агентов: фреонов 21 и 11, а также воды.

Determination of the Initial Point of Net Vapor Generation in Subcooled Boiling

Summary

An empirical method of determining the initial point of net vapor generation in a forced flow is described in the paper. For velocities above 0.4 m/s where mainly the forced convection decides on the bubble growth, the average subcooling of a liquid, ΔT_p , under conditions of the initial point of net vapor generation in subcooled boiling has been expressed by relation (9). For low velocities ($w < 0.4$ m/s) the average subcooling of a liquid has been given by (10).

A special apparatus was used to experimentally investigate the subcooling ΔT_p at the initial point of net vapor generation (Fig. 1). To this end a method consisting in the γ radiation absorption was adopted. Several media were examined, viz. Freon 21 and 11, and water.