

Początek wrzenia w przepływie proekologicznych czynników chłodniczych

Tadeusz Bohdal
Politechnika Koszalińska

Recenzent: Marian Rubik
Politechnika Warszawska

1. Wstęp

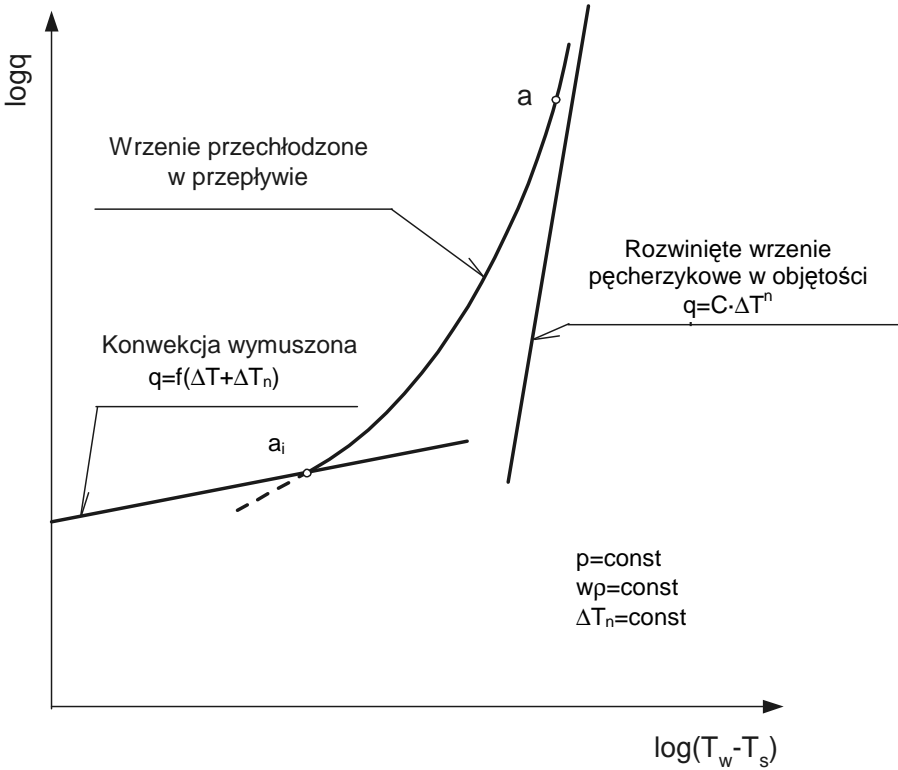
Wrzenie w przepływie rozpoczyna się (podobnie jak wrzenie w objętości) w chwili, gdy przegrzanie w cieczy w pobliżu ścianki osiągnie wymaganą wartość. Do tego momentu wymiana ciepła pomiędzy ścianką a substancją jednofazową (cieczą) odbywa się na drodze konwekcji wymuszonej w określonych warunkach. Zazwyczaj przepływ jednofazowy ma charakter turbulentny i może być opisany empiryczną korelacją Dittusa – Boeltera o postaci [8]:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} . \quad (1)$$

Pomijając wpływ temperatury na zmianę fizycznych właściwości cieczy można przyjąć, że w warunkach konwekcji wymuszonej współczynnik przejmowania ciepła α od powierzchni wewnętrznej kanału jest funkcją gęstości strumienia masy ($w\rho$), czyli:

$$Nu \approx Re^{0,8} . \quad (2)$$

Przy dostatecznie dużym przegrzaniu cieczy przy ściance kanału, pomimo niższej temperatury płynu T_F w rdzeniu przepływu od temperatury nasycenia T_s , występuje w kanale wrzenie zwane *wrzeniem przechłodzonym*. Według wielu badaczy [6,8,9,10] w obszarze wrzenia przechłodzonego ma miejsce superpozycja wymiany ciepła podczas jednofazowej konwekcji wymuszonej i wymiany ciepła z wrzeniem pęcherzykowym, co obrazowo przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Interpretacja wrzenia przechłodzonego w przepływie w układzie współrzędnych $\log q - \log(T_w - T_s)$

Fig. 1. Interpretation of boiling over-cooled in flow in $\log q - \log(T_w - T_s)$ co-ordinate system

Na rys. 1 przedstawiono krzywą przechłodzonego wrzenia cieczy w układzie współrzędnych $\log q - \log(T_w - T_s)$ jak również linie opisujące proces wymiany ciepła podczas konwekcji wymuszonej w kanale i wrzenia pęcherzykowego w objętości. W punkcie a_i zachodzi zjawisko początku wrzenia pęcherzykowego w kanale (punkt a_i oznaczono symbolem PPWP). Pokazany na rys. 1 stan a charakteryzuje przejście wrzenia przechłodzonego w rozwinięte wrzenie pęcherzykowe. Położenie stanów a i a_i w czasie i przestrzeni zależy nie tylko od rodzaju czynnika, ale również od warunków w jakich zachodzi ten proces. Podczas konwekcji wymuszonej i wrzenia przechłodzonego różnica pomiędzy temperaturą ścianki i temperaturą płynu jest równa sumie różnic temperatur ΔT i ΔT_n , gdzie:

$$\begin{aligned}\Delta T &= T_w - T_s, \\ \Delta T_n &= T_s - T_F.\end{aligned}\quad (3)$$

2. Kryteria określania początku wrzenia pęcherzykowego w przepływie

Problem opisu warunków, w jakich pojawia się zjawisko początku wrzenia pęcherzykowego (*PPWP*) rozpatrywany był przez niektórych badaczy.

J. Madejski [8] opierając się na kryterium aktywizacji zarodków pary podał sposób określania punktu (*PPWP*) na drodze teoretycznej w postaci zależności:

$$\frac{\alpha_k}{\alpha_b} + \frac{\alpha_k \cdot \Delta T_n}{q} = 4 \cdot St \cdot \frac{\bar{q}}{q} \cdot \frac{z_i}{d_e} + \frac{\left(\frac{z_i}{d_e}\right)^{0,7}}{0,7 + \left(\frac{z_i}{d_e}\right)^{0,7}}, \quad (4)$$

gdzie:

α_k – współczynnik przejmowania ciepła w procesie konwekcji wymuszonej w kanale,

$$St = \frac{\alpha_k}{c_p \cdot w \rho} \text{ - liczba Stanton,} \quad (5)$$

$$\bar{q} = \frac{1}{z} \int_0^{z_i} q(z) dz \text{ - średnia gęstość strumienia ciepła} \quad (6)$$

w kanale o długości z ,

z_i – współrzędna osiowa,

d_e – średnica hydrauliczna.

W pracy Ünala [11] proponuje się wykorzystanie zasady superpozycji wymiany ciepła w określaniu (*PPWP*). Po przeprowadzeniu analizy teoretycznej i uwzględniając wyniki badań własnych oraz innych autorów stwierdził on, że w punkcie (*PPWP*) wielkość C określona wzorem

$$\frac{\alpha_i \cdot \Delta T_n}{q_i} = C, \quad (7)$$

jest stałą zależną jedynie od rodzaju i prędkości przepływu czynnika w .

Przykładowo: woda $C = 0,24$ dla $w \geq 0,45$ m/s,

$C = 0,11$ dla $w < 0,45$ m/s,

R22 $C = 0,18$ dla $w \geq 0,45$ m/s,

$C = 0,11$ dla $w < 0,45$ m/s.

Z podanych przez autora [11] zależności wynika, że dla danego czynnika można określić wielkość C w zależności od zakresu prędkości przepływu. Fakt ten tłumaczy się występowaniem różnych mechanizmów procesu wymiany ciepła w zjawisku początku wrzenia pęcherzykowego. Gdy prędkości przepływu są małe, poniżej 0,45 m/s, to konwekcja wymuszona nie ma większego wpływu na tworzenie pęcherzyków parowych i ich odrywanie od wewnętrznej ścianki kanału. Zaleca się, aby wielkość współczynnika α_i we wzorze (7) obliczać według korelacji Dittusa-Boeltera (1). Dokładność metody Ůnala wynosi $\pm 30\%$.

W pracy Kowalskiego [7] zaproponowano empiryczną metodę określania (PPWP) opartą o wyniki badań własnych i innych autorów sprawdzoną w przypadku wody, R11 i R21. Podano zależność kryterialną, która obowiązuje przy prędkości $w \geq 0,4$ m/s

$$Ku = \frac{c_p \cdot \Delta T_n}{r} = 1,9 \cdot \left(\frac{q}{w\rho \cdot r} \right)^{0,7} \cdot Pr^{0,7} \cdot Re^{0,16} \quad (8)$$

i sprawdzonym doświadczalnie zakresie liczb bezwymiarowych:

$$\begin{aligned} 0,025 \cdot 10^{-3} < \frac{q}{w\rho \cdot r} < 2,27 \cdot 10^{-3}, \\ 0,84 < Pr < 3,5, \\ 30 \cdot 10^3 < Re < 505 \cdot 10^3. \end{aligned} \quad (9)$$

Gdy prędkość przepływu $w < 0,4$ m/s to obowiązuje zależność:

$$Ku = \frac{c_p \cdot \Delta T_n}{r} = 0,0135 \cdot \left(\frac{q}{\mu' \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')}} \right)^{0,7} \cdot Pr^{1,55} \quad (10)$$

przy czym zakres stosowalności wynosi:

$$\begin{aligned} 0,261 < \frac{q}{\mu' \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')}} < 5,81, \\ 0,84 < Pr < 5,5. \end{aligned} \quad (11)$$

W pracy Mikielwicz [9] proponuje się, że strefa przechłodzonego wrzenia cieczy rozpoczyna się w przekroju kanału, w którym współczynnik

przejmowania ciepła przy wrzeniu przechłodzonym jest równy współczynnikowi przejmowania ciepła przy konwekcji wymuszonej. Z korelacji empirycznej dotyczącej wrzenia przechłodzonego [9] uzyskuje się zależność uogólnioną na niedogrzanie cieczy ΔT_n w przekroju kanału od którego rozpoczyna się strefa wrzenia przechłodzonego:

$$\frac{c_p' \cdot \rho' \cdot \Delta T_n}{r \cdot \rho''} = 2780 \cdot \left(\frac{q}{w' \cdot \rho'' \cdot r} \right)^{1,165} \quad (12)$$

W pracy [6] podano zależność do określenia procesu niedogrzanania cieczy ΔT_n przy wrzeniu cieczy, przy którym zastępuje początek wrzenia przechłodzonego (PPWP) w postaci:

$$\Delta T_n = 0,376 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{q^{1,1} \cdot d^{0,2}}{(w\rho)^{0,8}} \quad (13)$$

Podobną zależność podaje także autor pracy [10]. Jak w wyniku z zależności (12) i (13) wykładniki potęg przy gęstości strumienia ciepła q , są zbliżone. Występująca w równaniu (12) zależność stopnia niedogrzanania ΔT_n od średnicy kanału d i gęstości strumienia masy ($w\rho$) wynika prawdopodobnie z tego, że przy tego typu pomiarach bada się zależność współczynnika przejmowania ciepła α od gęstości strumienia ciepła q , którą następnie porównuje się z zależnością analogiczną opisującą wymuszony ruch konwekcyjny cieczy. Stąd wynikają wielkości $d^{0,2}$ i $1/(w\rho)^{0,8}$ uwidocznione w korelacji (13).

Przedstawione powyżej wybrane próby różnych autorów opisanego początku wrzenia pęcherzykowego w kanale (PPWP) dotyczą w większości przypadków stabilnego prowadzenia procesu. Linia $a_i - a$ pokazana na rys. 1 dotyczy stabilnej równowagi układu a realizowane procesy wrzenia przebiegające według niej nazwano ogólnie wrzeniem przechłodzonym.

Wiadomo jednak, że zjawisku początku wrzenia pęcherzykowego towarzyszą, w niektórych zakresach (i dla niektórych czynników) zjawiska o charakterze niestabilnym. Rozpatrując łącznie oba zjawiska i ich wzajemny wpływ uzyskuje się nieco inny obraz i inne muszą być metody jego opisu. Jeżeli procesowi towarzyszy zjawisko zerowego kryzysu wrzenia a więc termicznego opóźnienia rozpoczęcia wrzenia pęcherzykowego, wówczas PPWP oznacza stan, w którym przy zwiększaniu niedogrzanania cieczy do temperatury nasycenia ΔT_n wrzenie przechłodzone ulega zakończeniu, co wykazały uprzednie badania eksperymentalne autora niniejszej pracy. W przypadku wystąpienia zerowego kryzysu wrzenia otrzymywane są stany układu o parametrach na prawo od linii $a_i -$

a przedstawionej na rys. 1. Są to stany układu o równowadze metastabilnej. W tych przypadkach położenie punktu opisującego początek przechłodzonego wrzenia pęcherzykowego (PPWP) będzie zależało od tego jak daleko, zmieniając parametry występujące w prezentowanych powyżej zależnościach, „udało się opóźnić” rozpoczęcie procesu wrzenia (na przykład zmniejszając niedogrzaenie cieczy ΔT_n , zwiększając gęstość strumienia ciepła q , zmniejszając gęstość strumienia masy ($w\rho$) lub ciśnienie p).

Przedstawione w rozdziale 3 wyniki badań eksperymentalnych autora opisują wpływ zerowego kryzysu wrzenia na położenia początku wrzenia pęcherzykowego w przepływie i wynikające stąd skutki.

3. Własne badania eksperymentalne

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych autora dotyczące początku wrzenia pęcherzykowego (PPWP) w przepływie w kanale rurowym przykładowo dla czynnika chłodniczego R123. Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym opisanym szczegółowo w pracach [3,4,5].

Celem badań było określenie termodynamicznego parametrów stanu czynnika, w którym powstają pierwsze pęcherzyki parowe (stan a_i na rys. 1).

Pomiary prowadzono utrzymując na stałym zadanym poziomie parametry czynnika chłodniczego na dopływie do kanału pomiarowego. Wartości parametrów dobierano tak, aby w odcinku obserwacyjnym umieszczonym na wypływie czynnika z kanału pomiarowego przepływała ciecz z minimalną ilością pęcherzyków parowych. Proces wrzenia rozpoczął się przy końcu kanału pomiarowego. Wartości temperatury ścianki T_w rejestrowano za pomocą zestawu termopar w przekroju poprzecznym kanału oddalonym o 0,1 m od przekroju wypływu czynnika z odcinka pomiarowego. Temperaturę czynnika T_F określano na podstawie pomiarów temperatury płynu na dopływie i wypływie z kanału pomiarowego. Temperaturę nasycenia T_s wyznaczano na podstawie wyników pomiaru ciśnienia na dopływie i wypływie z odcinka badawczego. Badania przeprowadzono dla dwóch przypadków, a mianowicie zwiększając oraz zmniejszając quasistatycznie gęstość strumienia ciepła q doprowadzanego do ścianki. Ten sposób postępowania uwzględnia możliwość występowania zerowego kryzysu wrzenia.

W tabeli 1 podano wyniki pomiarów początku wrzenia pęcherzykowego (PPWP) uzyskane na drodze wzrostu gęstości strumienia q , zaś w tabeli 2 przy obniżaniu wielkości q . Na rys. 2 przedstawiono wynik obserwacji początku wrzenia pęcherzykowego czynnika R123 na pionowej rurze w szczelinie pierścieniowej.

Tabela 1. Wyniki badań początku wrzenia pęcherzykowego (PPWP) w kanale poziomym przy quasistatycznym wzroście gęstości strumienia ciepła q
Table 1. Research results on bubble boiling start in the horizontal channel by quasistatic increase of heat stream density q

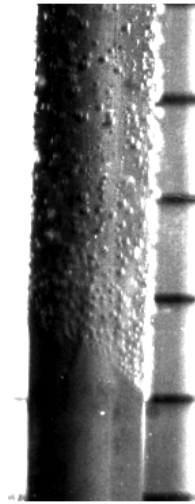
p	T _{F1}	T _{F2}	T _w	T _s	q	(wρ)	α _{EXP}	B1
[10 ⁵ Pa]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[kg/m ² s]	[W/m ² K]	
4,191	63,14	70,75	87,33	74,01	14372	475	866,82	5,26
4,015	61,26	68,54	85,03	72,02	14237	472	863,37	4,76
3,891	60,51	66,78	90,21	70,70	12359	400	527,48	6,25
3,691	60,25	65,61	82,08	68,50	11412	419	692,89	5,88
3,591	57,13	64,25	79,08	67,41	10452	411	704,78	4,76
3,291	56,54	61,24	73,46	64,13	7839	369	641,48	4,34
3,191	55,75	60,15	71,63	63,05	6696	364	583,27	4,00
3,091	55,25	59,56	69,25	61,96	5716	363	589,88	4,16
2,991	54,75	58,75	67,98	60,87	5389	352	583,85	4,54
2,891	54,21	57,51	65,04	59,77	7510	897	997,34	3,33
2,691	48,25	52,53	70,58	57,54	15678	931	868,58	3,70
2,692	48,02	52,11	71,14	57,55	15552	951	817,23	3,57
2,591	47,03	51,25	68,71	56,39	17331	963	992,61	3,44
2,68	48,12	52,32	69,12	57,45	16454	948	979,40	3,33
2,491	46,25	50,09	66,13	55,21	15228	972	949,37	3,22
2,391	45,75	49,25	65,08	53,99	14392	974	909,16	3,44
2,489	46,19	50,92	66,10	55,11	15205	970	1001,65	3,70
2,588	46,99	51,97	67,59	56,37	18015	987	1153,33	3,57
2,291	45,08	48,14	64,71	52,73	13718	981	827,88	3,70
2,191	44,25	47,75	62,58	51,42	11758	985	792,85	4,16
2,091	43,75	47,04	61,01	50,04	11432	967	818,91	4,76
1,991	41,75	45,75	56,08	48,58	10962	983	1061,18	3,70
1,891	39,75	42,51	57,22	47,04	12472	955	847,85	3,33
1,791	39,25	42,12	53,79	45,40	9472	965	811,65	3,57
1,691	37,25	40,52	48,71	43,65	9042	895	1104,03	2,61
1,591	36,51	39,53	47,33	41,78	8879	893	1138,33	3,57
1,491	35,75	37,48	45,71	39,76	5389	868	654,80	3,70

Tabela 2. Wyniki badań początku wrzenia pęcherzykowego (PPWP) w kanale poziomym przy quasistatycznym obniżaniu gęstości strumienia ciepła q **Table 2.** Research results on bubble boiling start in the horizontal channel by quasistatic decrease of heat stream density q

P	T _{F1}	T _{F2}	T _w	T _S	q	(wp)	α_{EXP}	B2
[10 ⁵ Pa]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[kg/m ² s]	[W/m ² K]	
1,709	34,75	38,53	55,17	43,97	11759	739	705,54	3,03
1,809	36,25	40,51	57,04	45,70	12086	701	730,61	3,22
1,909	37,5	41,50	59,04	47,32	13229	714	754,14	3,03
2,009	38,25	42,50	60,29	48,85	13229	726	743,53	2,77
2,109	39,00	44,25	62,00	50,29	13719	614	772,89	2,94
2,409	44,75	48,75	64,17	54,22	14862	940	964,02	2,85
2,509	45,75	49,75	65,42	55,42	15352	948	979,91	2,78
2,609	47,02	51,25	67,42	56,60	15351	924	949,60	3,03
2,809	49,25	53,50	70,29	58,86	15352	868	914,26	3,13
2,909	50,25	54,75	71,42	59,97	15352	864	921,18	3,22
3,009	51,25	56,25	73,42	61,07	15679	818	913,32	3,57
3,109	52,25	57,25	74,29	62,15	15679	818	920,02	3,44
3,209	52,75	58,25	76,21	63,24	18292	808	1018,56	3,57
3,309	53,75	60,25	77,13	64,33	18292	781	1083,26	4,17
3,409	54,50	60,75	78,71	65,41	18455	753	1027,66	3,85
3,714	55,51	63,04	79,96	68,75	16332	494	963,05	2,94
1,32	31,25	33,02	41,46	35,95	5879	799	695,11	2,85
1,82	35,51	40,25	57,21	45,89	12086	856	712,66	3,03
2,12	38,04	43,50	63,50	50,44	18945	744	947,25	2,85
2,72	42,25	52,02	72,38	57,87	19598	407	961,88	3,44
3,32	55,25	59,75	73,25	64,45	9146	521	677,47	2,85
3,92	59,25	66,25	82,13	71,02	11106	416	699,57	3,33
4,12	60,75	69,25	85,92	73,22	12739	352	764,33	4,16
4,32	61,75	71,03	87,83	75,38	13229	366	785,87	3,84
4,72	62,25	75,25	91,83	79,43	19272	354	1163,77	4,00
1,41	33,03	35,10	43,92	38,11	6533	910	732,64	2,85
1,51	34,00	36,50	49,00	40,24	8493	757	679,41	3,33
2,11	40,75	45,75	61,17	50,36	11759	553	762,74	3,33

Rys. 2. Punkt początku wrzenia pęcherzykowego (PPWP) w szczelinie pierścieniowej; czynnik R123, $(w\rho) = 374 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q=11,3 \text{ kW/m}^2$, $p = 0,389 \text{ MPa}$, $T_{F1} = 60,2^\circ\text{C}$

Fig. 2. Point of bubble boiling start (PPWP) in ring-shaped gap; medium R123, $(w\rho) = 374 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q=11,3 \text{ kW/m}^2$, $p = 0,389 \text{ MPa}$, $T_{F1} = 60,2^\circ\text{C}$



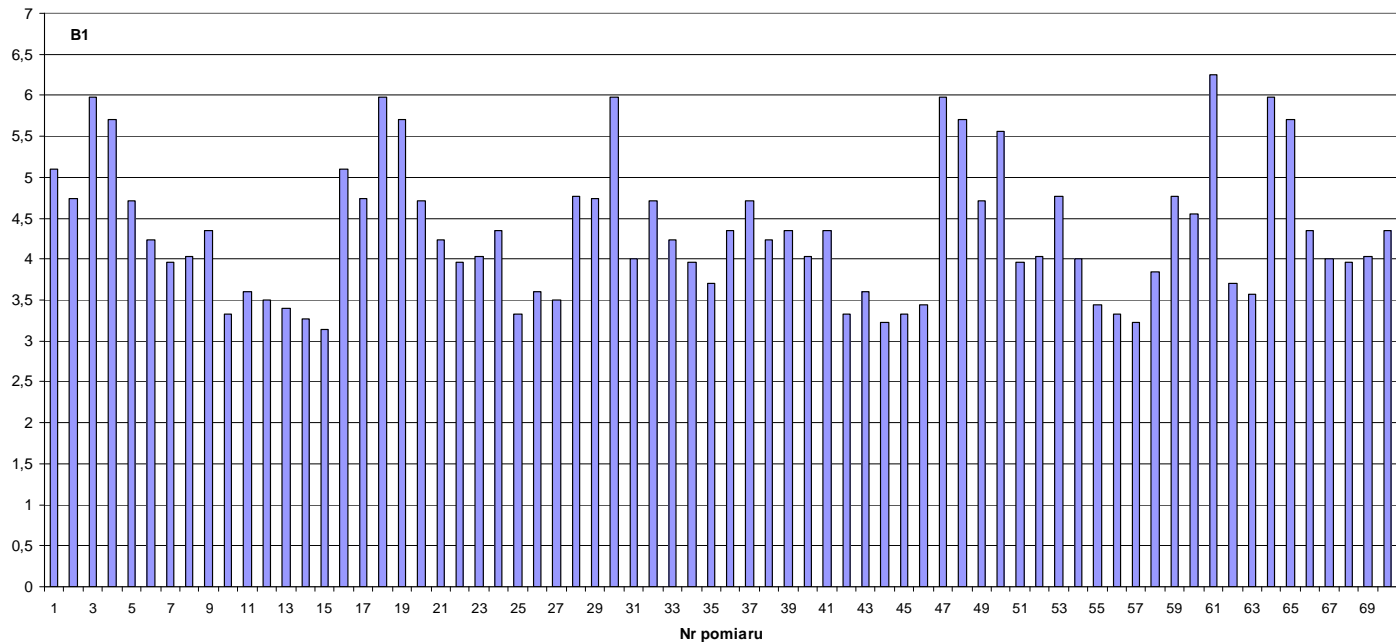
4. Analiza wyników badań eksperymentalnych

W analizie wyników badań założono, że wrzenie pęcherzykowe rozpoczyna się w kanale rurowym jako wrzenie powierzchniowe przechłodzone. Oznacza to, że temperatura T_F przepływającej w rdzeniu przepływu cieczy jest niższa od temperatury nasycenia T_s , której wartość wynika z aktualnego ciśnienia p . Istnieje zatem lokalne niedogrzanie cieczy do temperatury nasycenia wynoszące ΔT_n . Wyniki badań własnych oraz innych autorów [5÷11] wykazały, że inicjacja procesu wrzenia powierzchniowego zależy od wielkości niedogrzanania cieczy ΔT_n w rdzeniu przepływu i od przegrzania cieczy przy ścianie kanału ΔT_w ($\Delta T_w = T_w - T_F$).

Wprowadzono pojęcie bezwymiarowego współczynnika B zdefiniowanego związkiem:

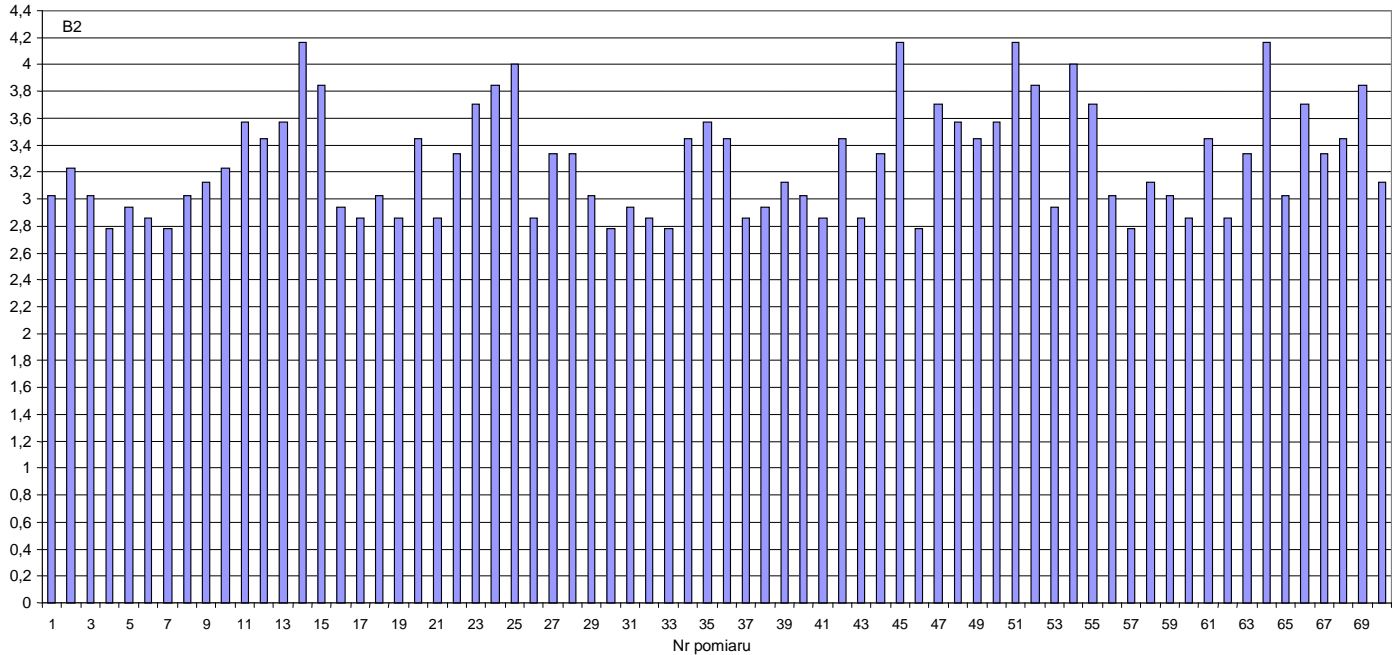
$$B = \frac{\Delta T_w}{\Delta T_n} . \quad (14)$$

Wykonano obliczenia współczynnika bezwymiarowego B opisanego wzorem (14) oddzielnie dla wyników badań zamieszczonych w tabelicy 1 (oznaczono go symbolem $B1$) oraz w tabelicy 2 (symbol $B2$). Na rys. 3 i 4 przedstawiono graficzną interpretację wielkości współczynnika $B1$ i $B2$.



Rys. 3. Wyniki obliczeń współczynnika $B1$ określonego wzorem (14)
 (quasistatyczny wzrost gęstości strumienia ciepła – tabela 1)

Fig. 3. Results of $B1$ coefficient calculations using equation (14)
 (quasistatic increase of heat stream density – Table 1)



Rys. 4. Wyniki obliczeń współczynnika $B2$ określonego wzorem (14)
(quasistatyczne obniżenie gęstości strumienia ciepła - tabela 2)

Fig. 4. Results of $B2$ coefficient calculations using equation (14)
(quasistatic decrease of heat stream density – Table 2)

Uzyskane wyniki obliczeń wykazały przydatność kryterium (14) do wyznaczania początku wrzenia pęcherzykowego (*PPWP*) w kanale z tym, że uzyskano dwie różne wartości współczynnika *B*. Jeżeli qusistatycznie zwiększono gęstość strumienia ciepła *q* doprowadzanego do ścianki kanału wartość współczynnika *B1* oscylowała wokół $4,2 \pm 30\%$. Natomiast przy obniżaniu wielkości *q* wartość *B2* była niższa i wynosiła $3,2 \pm 20\%$. Można zatem wprowadzić nowe pojęcia górnej i dolnej wartości bezwymiarowego współczynnika *B* określonego równaniem (14). Istnienie górnej i dolnej wartości współczynnika *B* można wyjaśnić opóźnieniem termicznym generacji pęcherzyków parowych i wpływem zjawiska zerowego kryzysu wrzenia. Rozpoczęcie procesu wrzenia w kanale wymaga zatem spełnienia warunku dodatkowego przegrzania ścianki kanału inicjującego ten proces. Wpływem zerowego kryzysu wrzenia można tłumaczyć również większy rozrzut uzyskanych wartości *B1* ($\pm 30\%$) ze względu na obszar równowagi metastabilnej układu. W tym przypadku położenie punktu (*PPWP*) zależy każdorazowo od tego jak daleko udało się przegrzać ciecz w laminarnej podwarstwie przyściennej przed rozpoczęciem procesu wrzenia. Przy obniżaniu gęstości strumienia ciepła *q* nie obserwuje się tego typu niestabilności a stąd wartość *B2* obarczona jest mniejszym rozrzutem ($\pm 20\%$).

Zaproponowane przez autora kryterium początku wrzenia pęcherzykowego (*PPWP*) porównano ze wzorem Ünala (wzór 7).

Określając przegrzanie cieczy ΔT_w ze wzoru Newtona dla przejmowania ciepła:

$$\Delta T_w = \frac{q_i}{\alpha_i}, \quad (15)$$

gdzie:

q_i - lokalna gęstość strumienia ciepła na ściance kanału,

α_i - lokalny współczynnik przejmowania ciepła,

uzyskuje się postać bezwymiarowego współczynnika

$$B = \frac{q_i}{\alpha_i \cdot \Delta T_n} = \frac{1}{C}, \quad (16)$$

gdzie:

C - współczynnik Ünala (według wzoru 7) zależny od rodzaju czynnika.

Dla wyników badań eksperymentalnych czynnika chłodniczego R123 uzyskano dolną C_1 i górną C_2 wartość bezwymiarowego współczynnika *C*:

$$C1 = 0,24,$$

$$C2 = 0,31.$$

Przeprowadzone badania dotyczyły w zasadzie ruchu burzliwego, gdzie prędkości przepływu były wyższe od przyjętej przez Ünal wartości granicznej w $\geq 0,45$ m/s. Dla tego zakresu Ünal zaleca przyjmować dla wody $C = 0,24$ a dla R22 $C = 0,18$. Uzyskana dla czynnika R123 *dolna* wartość $C1 = 0,24$ jest zbliżona do zalecanych przez Ünal z tym, że wyznaczono ją dla przypadku początku wrzenia na drodze wzrostu przegrzania zarodków i ich aktywacji. W przypadku obniżania przegrzania jej wartość jest o około 30% wyższa.

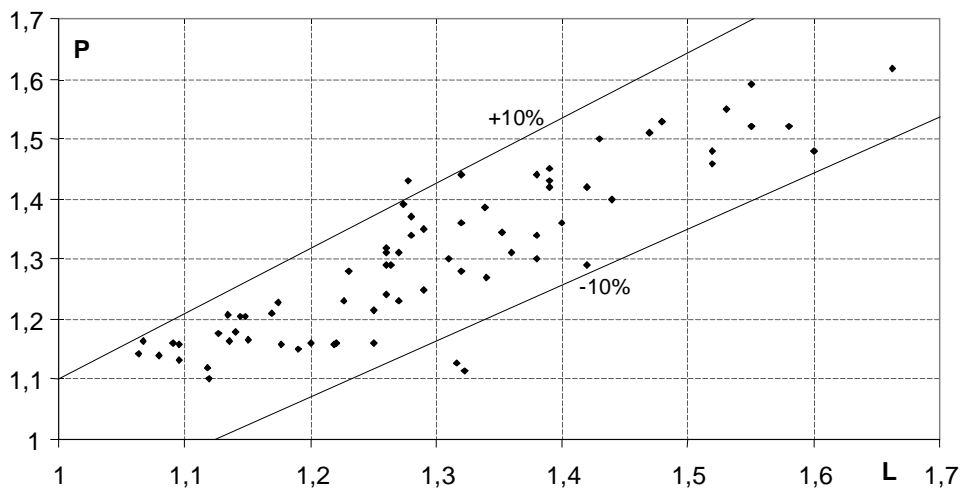
Dobrą zgodność z eksperymentem uzyskano wyniki obliczenia punktu (PPWP) dla początku wrzenia pęcherzykowego w kanale według korelacji zaproponowanej przez *J. Madejskiego* [8] (wzór 4). Wyniki obliczeń były zgodne z wynikami badań dla R123 w granicach $\pm 10\%$ dla przypadku obniżania gęstości strumienia ciepła i zakończenia procesu wrzenia w kanale. Na rys. 5 przedstawiono porównanie obliczeń według wzoru (4) i wyników pomiarów uzyskanych przez autora dla początku wrzenia pęcherzykowego czynnika R123 w kanale poziomym. Na osi poziomej przedstawiono wartości lewej strony L

$$L = \frac{\alpha_k}{\alpha_b} + \frac{\alpha_k \cdot \Delta t_n}{q} \quad (17)$$

a na osi pionowej strony prawej P

$$P = 4 \cdot St \cdot \frac{q}{d_e} \cdot \frac{z_i}{d_e} + \frac{\left(\frac{z_i}{d_e}\right)^{0,7}}{0,7 + \left(\frac{z_i}{d_e}\right)^{0,7}} \quad (18)$$

równania (4). Korelację (4) można więc z powodzeniem wykorzystywać do określania początku wrzenia pęcherzykowego w tych przypadkach, gdy nie występuje zerowy kryzys wrzenia i nie ma znacznych opóźnień w aktywacji zarodków wrzenia. W przypadku wystąpienia zerowego kryzysu punkt (PPWP) przesuwają się w stronę wyższych wartości gęstości strumienia ciepła q i przydatność wzoru (4) jest znacznie mniejsza ze względu na występujące rozbieżności wynikające z braku równowagi stabilnej układu.



Rys. 5. Wyniki obliczeń według wzoru (4) dla parametrów i wyników badań punktu (PPWP) dla czynnika R123 (stan układu uzyskano drogą quasistatycznego obniżenia gęstości strumienia ciepła na ogrzewanej ściance)

Fig. 5. Results of calculations according to equation (4) for parameters and results of research on point of bubble boiling start for medium R123 (state of the system was achieved by quasistatic decrease of heat stream density on heated wall)

5. Podsumowanie

Uzyskane wyniki pomiarów potwierdzają występowanie histerezy wymiany ciepła związanej z powstawaniem pęcherzyków parowych i rozpoczęciem wrzenia pęcherzykowego w kanale [1]. Stan układu w zakresie występującej histerezy (i związana z tym praca maszyn i urządzeń chłodniczych) zależy od tego czy osiągnięto go drogą wzrostu czy spadku przegrzania zarodków pary [2]. W ogrzewanym kanale może występować konwekcja wymuszona lub wrzenie pęcherzykowe, co może mieć określone skutki podczas eksploatacji tych urządzeń. Proponowaną przez autora metodykę badań początku wrzenia pęcherzykowego w przepływie w kanale rurowym można z powodzeniem stosować do badań innych czynników chłodniczych. Metoda ta pozwala na określanie parametrów stanu czynnika w punkcie a_i (PPWP) na rysunku 1, przy czym jej podstawą są fizyczne zjawiska zachodzące podczas wrzenia.

Literatura

1. **Bohdal T.:** Heat transfer and flow resistance in the zero boiling crisis. The Jubilee 10th International Congress of Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation, Praha 1990
2. **Bohdal T., Majka K.:** An investigation of bubble boiling process instabilities in channel flow. Recent Advances in Heat Transfer. B. Sunden and A. Žukauskas (Editors) 1992, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, pp.220-230
3. **Bohdal T.:** Bubble boiling of environment-friendly refrigerating media. Progress in Engineering Heat Transfer, Institute of Fluid-Flow Machinery Publishers, Proceedings of The 3rd Baltic Heat Transfer Conference, Gdańsk, Poland September 22-24, 1999, pp. 633 - 640
4. **Bohdal T., Rasmus A.:** Badanie wrzenia w przepływie proekologicznych czynników chłodniczych. Wydawnictwo: Środkowo-Pomorskiego Towarzystwa Naukowego Ochrony Środowiska: Rocznik Ochrona Środowiska. Tom 1, 1999, s. 123 – 136
5. **Bohdal T.:** Bubble boiling of environment-friendly refrigeration media. International Journal of Heat and Fluid Flow (2000), No 4, Volume 21, pp. 449 - 455
6. **Głuszczenko I. F., Majewskij E. M.:** Gidrawliczeskoje soprotiwlenije parogienierijuszczego kanała ochładzajemogo wodnoj. Tiejpłofizyka i Tiejpłotiechnika, nr 17, 1970.
7. **Kowalski J.:** Określenie początku rozwiniętego wrzenia przechłodzonego w przepływie wymuszonym. Prace Instytutu Maszyn Przepływowych, zeszyt 74 (1977), s. 37-46
8. **Madejski J.:** Wymiana ciepła przy wrzeniu i przepływy dwufazowe. Cz.II, Ośrodek Informacji o Energii Jądrowej, W-wa, 1973
9. **Mikielewicz J.:** Wymiana ciepła i opory przepływu freonu 21 przy wrzeniu przechłodzonym w kanale generatora pary. Prace IMP, Gdańsk 1972, zeszyt 60, s.109-121
10. **Tarasowa N., W., Orłow W., M.:** Tiejpłootdzacza i gidrawliczeskoje soprotiwlenije pri powierchnostom kipienii wody w kolcewych kanałach. Wyd. Energia, Lenin-grad 1964
11. **Unal H.C.:** Prediction of nucleate pool boiling heat transfer coefficient for binary mixtures. Int. J. Heat Mass Transfer 1986, Vol.29, no4, s. 637

Oznaczenia

- B - współczynnik
- C - współczynnik
- c - ciepło właściwe
- d - średnica
- g - przyspieszenie ziemskie
- Ku - liczba Kutateladzego
- Nu - liczba Nusselta
- p - ciśnienie

- Pr - liczba Prandtla
- q - gęstość strumienia ciepła
- Re - liczba Reynoldsa
- r - ciepło parowania
- St - liczba Stanton
- T - temperatura
- (wρ) - gęstość strumienia masy
- z - współrzędna osiowa
- α - współczynnik przejmowania ciepła
- μ - dynamiczny współczynnik lepkości
- ρ - gęstość
- σ - napięcie powierzchniowe

Indeksy dotyczą:

dolne:

- b - wrzenia w objętości
- e - średnicy ekwiwalentnej
- EXP - wartości eksperymentalnej
- F - płynu
- i - kolejnej wartości, lokalnej wartości
- k - konwekcji
- n - niedogrzenia
- p - stałego ciśnienia
- s - nasycenia
- w - ścianki
- 1 - parametrów na dopływie do kanału
- 2 - parametrów na wypływie z kanału

górne:

- prim - cieczy
- bis - pary

Boiling Start in Flow of Environment Friendly Refrigerating Media

Abstract

Boiling in the flow starts (like boiling in the volume) in the moment, when overheating of the liquid near the wall reaches sufficiently high value. Up to this moment exchange of heat between the wall and the one phase substance (liquid) is done on the way of forced convection under particular conditions. Usually one phase flow has a turbulent nature and may be described with empirical correlation of Dittus – Boelter.

Passing over the influence of the temperature on change of thermo-physical properties of the liquid under forced convection conditions, it is stated that coefficient of heat interception α from the inner surface of the channel is the function of mass stream density ($w\rho$).

When the liquid is overheated sufficiently enough by the wall of a channel, in spite of the lower temperature of the liquid T_F in the core of the flow than saturation temperature T_s , a kind of boiling appears in the channel – so called overcooled boiling. According to many researchers in the overcooled boiling area superposition of heat exchange during one phase forced convection and heat exchange with bubble boiling has a place.

This paper shows the results of the Author's experimental research on the point of the bubble boiling start during the flow in a pipe channel of for example refrigerating medium R123. Research was conducted on the measuring stand described in detail in other Author's works.

The aim of the research was to determine parameters of the medium's thermodynamical state, in which first steam bubbles arise (state a_i in the Fig. 1).

Obtained results of the research confirm occurrence of heat exchange hysteresis connected with steam bubbles arising and start of the bubble boiling in the channel. The state of the system in the range of occurring hysteresis (and the work of machines and cooling devices connected with this) depends on if it is reached on the way of increase or decrease of steam nucleuses overheating. In the heated channel forced convection or bubble boiling may occur and this might give rise to specific consequences for exploitators of those devices. Methodology of research on the start of the bubble boiling during the flow in the pipe channel proposed by the Author may be successfully used for other refrigerating media. This method allows determining, in the quantitative way, parameters of the medium's state in a_i point and it is justified by the physical basics of phenomena occurring during boiling.