

Tadeusz BOHDAL

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I CHŁODNICTWA

Badanie rozwoju i zaniku wrzenia czynnika chłodniczego w kanale

Prof. dr hab. inż. Tadeusz BOHDAL

Absolwent Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie. Stopień naukowy doktora i doktora habilitowanego uzyskał w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, specjalność technika cieplna i chłodnicza. Tytuł profesora uzyskał w 2007 roku w zakresie nauk technicznych. Jest kierownikiem Katedry Techniki Ciepłej i Chłodnictwa na Wydziale Mechanicznym. Głównie zainteresowania naukowe to wymiana ciepła i pędu podczas przemian fazowych czynników chłodniczych oraz niestabilności im towarzyszące.

e-mail: tadeusz.bohdal@tu.koszalin.pl



Streszczenie

Przeprowadzono badania eksperymentalne rozwoju i zaniku wrzenia pęcherzykowego proekologicznych czynników chłodniczych w kanale rurowym. Procesom tym towarzyszy zjawisko zerowego kryzysu wrzenia związane z histerezą aktywizacji zarodków. Potwierdzono, że rozwój i zanik wrzenia wykazuje własności falowe. Rozwój wrzenia następuje w postaci tzw. frontu wrzenia, który przemieszcza się przeciwnie do kierunku przepływu z prędkością zależną od przegrzania cieczy przy ogrzewanej ściance. Analogicznie zanik wrzenia sukcesywnie postępuje zgodnie z kierunkiem przepływu czynnika. Badania potwierdziły występowanie histerezy rozwoju i zaniku wrzenia pęcherzykowego w kanale.

Słowa kluczowe: chłodnictwo, przemiany fazowe, niestabilności.

Investigations of development and decay of boiling of the refrigerant in a channel

Abstract

Experimental investigations of development and decay of bubbly boiling of environment-friendly refrigerants in a tubular channel were performed. These processes are accompanied by the zero boiling crisis phenomenon connected with the nuclei activation hysteresis. It was confirmed that the development and decay of boiling have wave properties. The development of boiling occurs in the form of the so-called boiling front which shifts in the direction opposite to the flow direction with the speed dependent on the wall superheat. The decay of boiling progresses successively in compliance with the refrigerant flow direction. The tests confirmed the occurrence of development and decay hysteresis of bubbly boiling in the channel. In the description including the wave effect, there was taken into account the pressure change impulse v_p and boiling front v_t translocation velocity. These velocities depend on the refrigerant spore filling ϕ in a channel. Besides, bubble boiling in flow has a very important employment aspect. Such phenomena occur not only in evaporators of cooling devices, but also in other energy systems. Under dynamic conditions some changes of parameters can cause negative exploitation qualities characterised by instability of machines and motors.

Keywords: refrigeration, phase transition, instabilities.

1. Wstęp

Istotnym problemem przy projektowaniu parowników jest określenie obszarów objętych procesem wrzenia czynnika chłodniczego. Jest to ważne nie tylko ze względu na intensywność wymiany ciepła, ale również ze względu na opory przepływu i stabilność pracy całej instalacji chłodniczej. Jak wykazują liczne badania eksperymentalne jednoznaczne określenie punktu początku i zakończenia wrzenia w kanale jest zagadnieniem złożonym i wymaga szerszego spojrzenia i udoskonalenia opisu [5]. Wrzenie w przepływie rozpoczyna się (podobnie jak wrzenie w objętości) w chwili, gdy przegrzanie cieczy w pobliżu ścianki będzie dostatecznie duże. Podobnie zakończenie procesu wrzenia nastąpi, gdy przegrzanie cieczy przy ściance będzie mniejsze od wartości krytycznej. Powyższe oznacza, że aby zainicjować proces wrzenia należy uzyskać dostatecznie duże przegrzanie zarodków pary

i pobudzić je do produkcji pęcherzyków parowych. Należy przekroczyć tak zwany próg aktywności zarodka. Aktywizacja i dezaktywizacja zarodków parowych na ogrzewanej ściance nie następuje przy tym samym przegrzaniu, lecz z pewnym opóźnieniem. Zjawisko to nosi nazwę *histerezy nukleacji* i jest przyczyną występowania zerowego kryzysu wrzenia, podczas którego następuje zamiana mechanizmu konwekcyjnej wymiany ciepła w układzie jednofazowym cieczy na wrzenie pęcherzykowe [6]. Towarzyszy temu gwałtowny spadek temperatury powierzchni wymiany ciepła, przy zachowaniu niezminionej temperatury płynu w dalszej odległości od ścianki oraz przy zachowaniu stałej wielkości gęstości strumienia ciepła. Zanik wrzenia przebiega łagodnie. Wraz ze zmniejszaniem się temperatury ogrzewanej powierzchni następuje sukcesywne ograniczanie generacji pęcherzyków parowych. Zjawisko to nosi nazwę *histerezy wymiany ciepła*, której towarzyszy *histereza oporów przepływu*.

Przeprowadzone w ostatnich latach badania wykazują, że ośrodki dwufazowe wykazują interesujące własności falowe [2, 4, 7, 8, 9]. Wywierają one również wpływ na proces wrzenia, a szczególnie na jego rozpoczęcie, rozwój, zanikanie i zakończenie. Jest to szczególnie istotne w przypadku wystąpienia zerowego kryzysu wrzenia. Obecnie powstały warunki szerszego niż dotychczas wprowadzenia komputerowych systemów rejestracji i przetwarzania danych pomiarowych [1, 3], co pozwala niewątpliwie na lepsze rozpoznanie zjawisk towarzyszących procesowi wrzenia pęcherzykowego w przepływie.

2. Początek wrzenia w kanale

W pracy [3] przeprowadzono szczegółową analizę określania początku wrzenia w kanale rurowym opartą na podstawie badań eksperymentalnych różnych autorów. W analizie 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 . Stwierdzono, że inicjacja procesu wrzenia powierzchniowego zależy od wielkości niedogrzanania cieczy ΔT_n w rdzeniu przepływu i od przegrzania cieczy przy ściance kanału ΔT_w . Wprowadzono nowe pojęcie bezwymiarowe współczynnika B zdefiniowanego związkiem

$$B = \frac{\Delta T_w}{\Delta T_n}, \quad (1)$$

gdzie: $\Delta T_w = T_w - T_s$, $\Delta T_n = T_s - T_F$

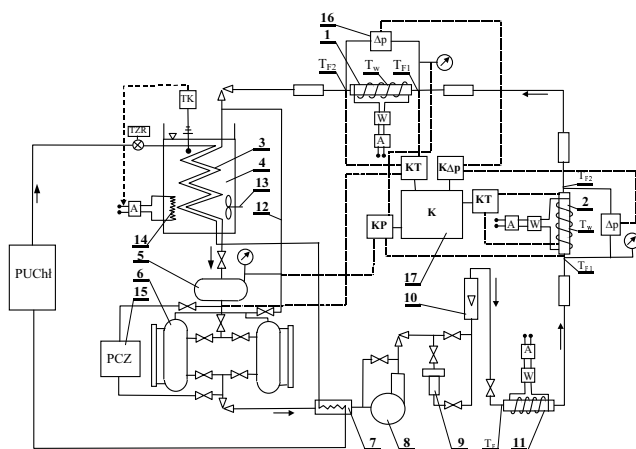
Wykonano obliczenia bezwymiarowego współczynnika B opisanego wzorem (1) oddzielnie dla wyników badań uzyskanych przy quasistatycznym wzroście gęstości strumienia ciepła q (oznaczono go symbolem $B1$) oraz dla wyników badań uzyskanych przy quasistatycznym obniżaniu gęstości strumienia ciepła q (symbol $B2$). Uzyskane wyniki obliczeń wykazały przydatność kryterium (1) do wyznaczania początku wrzenia pęcherzykowego (PPWP) w kanale z tym, że uzyskano dwie różne wartości współczynnika B . Jeżeli quasistatycznie zwiększano gęstość strumienia ciepła q doprowadzanego do ścianki kanału to wartość współczynnika $B1$ oscylowała wokół stałej wartości (np. dla czynnika R123 $B1 = 4,2 \pm 30\%$). Natomiast przy obniżaniu wielkości q wartość $B2$ była niższa (np. dla czynnika R123 $B2$ wynosił $3,2 \pm 20\%$). Wprowadzono, zatem *nowe pojęcia górnej i dolnej wartości bezwymiarowego współczynnika B* określonego równaniem (1). 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 dodatkowej nadwyżki temperatury ścianki kanału inicjującej ten proces. Wpływem zerowego kryzysu wrzenia można tłumaczyć także 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 $B2$ obciążona jest mniejszym rozrzutem ($\pm 20\%$).

Przeprowadzona w pracy [3] analiza początku i zakończenia wrzenia w kanale została wykonana w sposób klasyczny, to znaczy dotyczyła określonego przekroju poprzecznego kanału. Pozwoliła na określenie kryterium, które umożliwia wyznaczyć parametry, przy których rozpocznie się lub zakończy wrzenie w określonym przekroju poprzecznym kanału rurowego. W pracy [6] wykazano falowy charakter zerowego kryzysu wrzenia. Mając powyższe na uwadze przeprowadzono dalsze badania eksperymentalne potwierdzające falowy charakter rozpoczęcia i zakończenia wrzenia czynnika chłodniczego w kanale rurowym.

3. Badania eksperymentalne

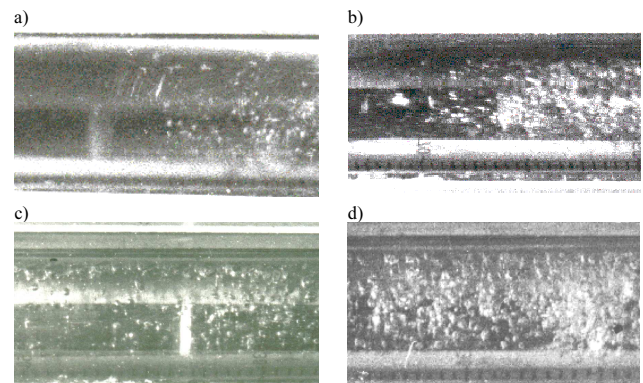
Celem badań eksperymentalnych było jakościowe i ilościowe potwierdzenie możliwości zachodzenia rozwoju i zaniku wrzenia pęcherzykowego w ogrzewanym kanale w granicach pętli histerezy wymiany ciepła i oporów przepływu. Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, którego schemat ideowy przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska badawczego; 1- poziomy odcinek pomiarowy z oprzyrządowaniem, 2- pionowy odcinek pomiarowy z oprzyrządowaniem, 3- skraplacz, 4- zbiornik chłodziwa, 5- zbiornik czynnika chłodniczego, 6- zbiornik pomiarowy, 7- dochładzacz, 8- pompa, 9- filtr, 10- rotametr, 11- podgrzewacz wstępny, 12- przewód wyrównawczy ciśnienia, 13- mieszadło, 14- element grzewczy, 15- przepływomierz elektroniczny typu *Sonoflo*, 16- elektroniczny przetwornik różnicy ciśnienia, 17- komputer, współpracujący z przetwornikami do pomiaru temperatury, ciśnienia i różnicy ciśnień, Δp – pomiar spadku ciśnienia, W – watomierz, A – autotransformator, PUCH – pomocnicze urządzenie chłodnicze, PCZ – przepływomierz czynnika chłodniczego, TK – termometr kontaktowy, TZR – termostacyjny zawór rozprężny, KT, KP, KAP – komputerowe przetworniki sygnału temperatury, ciśnienia i spadku ciśnienia, K – komputer wraz z oprzyrządowaniem

Fig. 1. A schematic diagram of the test facility; 1- horizontal test section with instrumentation, 2- vertical test section with instrumentation, 3- condenser, 4- coolant vessel, 5- refrigerant vessel, 6- measuring vessel, 7- subcooler, 8- pump, 9- filter, 10- rotameter, 11- preheater, 12- pressure equalising pipe, 13- stirrer, 14- heating element, 15- electronic flow meter of *Sonoflo* type, 16- electronic pressure difference transducer, 17- computer connected to transducers for measurements of temperature, pressure and pressure difference, Δp - pressure difference measurement, W- watt meter, A- autotransformer, PUCH- auxiliary refrigeration unit, PCZ- refrigerant flow rate meter, TZR – thermostatic expansion valve, TK- contact thermometer, KT- temperature transducer interface, KP- pressure transducer interface, KAP- pressure difference transducer interface, K- computer with accessories

Badania eksperymentalne dotyczyły rozwoju i zaniku wrzenia pęcherzykowego w przepływie oraz towarzyszących im zjawisk. W badaniach eksperymentalnych stworzono warunki do rozpoznania i opisu tych zjawisk. Rozwój i zanik wrzenia w kanale wywoływano drogą zmiany ciśnienia o wartość Δp . Dotychczas praktykowane sposoby quasistatycznego oddziaływania na zmiany parametrów układu (najczęściej opisywane w literaturze) zastąpiono *oddziaływaniem o charakterze dynamicznym*. Na stanowisku istniała możliwość prowadzenia obserwacji zjawisk w procesie rozwoju i zaniku wrzenia (rys. 2).



Rys. 2. Wyniki obserwacji rozwoju wrzenia pęcherzykowego na wyplwyie czynnika R123 z kanału poziomego:

Fig. 2. Visualization of development of bubbly boiling at the refrigerant R123 outflow from a horizontal channel:

- a) $(w/p) = 448 \text{ kg/m}^2/\text{s}$, $q = 6,5 \text{ kW/m}^2$, $T_F = 28,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta p = 0,015 \text{ MPa}$;
 b) $(w/p) = 455 \text{ kg/m}^2/\text{s}$, $q = 10,5 \text{ kW/m}^2$, $T_F = 33,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta p = 0,100 \text{ MPa}$;
 c) $(w/p) = 526 \text{ kg/m}^2/\text{s}$, $q = 9,7 \text{ kW/m}^2$, $T_F = 41,9 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta p = 0,039 \text{ MPa}$;
 d) $(w/p) = 575 \text{ kg/m}^2/\text{s}$, $q = 12,7 \text{ kW/m}^2$, $T_F = 41,4 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta p = 0,022 \text{ MPa}$

4. Badanie rozwoju wrzenia w kanale

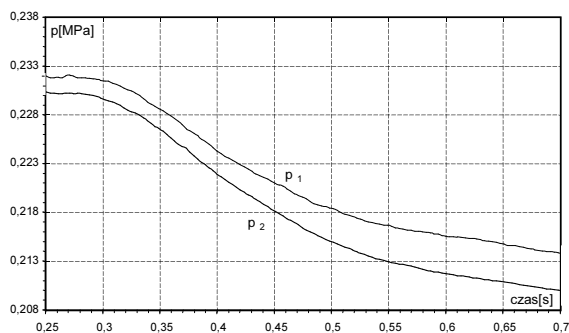
Przed rozpoczęciem wrzenia w kanale parametry czynnika dobierano tak, aby w kanale (pionowym lub poziomym) występował przepływ cieczy przechłodzonej o kilka kelwinów w odniesieniu do temperatury nasycenia. Gęstość strumienia ciepła doprowadzanego do ścianki kanału oraz gęstość strumienia masy czynnika w kanale były zbliżone do wartości, przy których następuje rozwój wrzenia pęcherzykowego w kanale. Następnie obniżano ciśnienie do takiej wartości, aby wywołać chwilowe, ale dostateczne duże przegrzanie cieczy w kanale umożliwiające rozwój procesu wrzenia. Impuls obniżonego ciśnienia wywołany za odcinkiem pomiarowym przemieszczał się w kierunku przeciwnym do przepływu cieczy i powodował rozwój wrzenia w kanale. Powstające pęcherzyki pary odrywały się sukcesywnie od ogrzewanej ścianki i przemieszczały w głąb rdzenia przepływu tworząc mieszaninę dwufazową. Spadkowi ciśnienia w kanale (przy stałej wartości gęstości strumienia ciepła doprowadzanego do ścianki kanału i gęstości masy w kanale) i rozwojowi procesu wrzenia towarzyszyło obniżenie temperatury ścianki. Było ono wynikiem wzrostu intensywności wymiany ciepła wywołanej powstawaniem pęcherzyków pary na ogrzewanej powierzchni.

W podobny sposób wykonano badania w warunkach, gdy do odcinka pomiarowego dopływała mieszanina dwufazowa o strukturze pęcherzykowej i temperaturze nasycenia. Przed rozpoczęciem pomiarów zwiększano quasistatycznie strumień ciepła doprowadzany do ścianki kanału, nie wywołując wrzenia powierzchniowego w kanale. Wrzenie pęcherzykowe występowało tylko w rdzeniu przepływu. Następnie obniżano ciśnienie czynnika w kanale, wywołując rozwój wrzenia powierzchniowego. Uzyskano podobne efekty, jak dla rozwoju wrzenia w cieczy.

Przemieszczanie się impulsu obniżonego ciśnienia i temperatury ścianki miało charakter falowy. Prędkość fali ciśnieniowej v_p i temperaturowej v_T określano na podstawie analizy zmiany ciśnienia i temperatury w czasie wzdłuż długości kanału. Przykłady wyznaczania prędkości v_p i v_T przedstawiono na rys. 3 i 4. Wykre-

sy dotyczą tego samego pomiaru, przy czym na kolejnych wykresach pokazano przebieg zjawiska w mniejszym przedziale czasu. Rys. 3 przedstawia zmianę ciśnienia na dopływie i wypływie czynnika z kanału pomiarowego a rys. 4. zmianę temperatury w pięciu przekrojach pomiarowych wzdłuż długości kanału. Na podstawie rys. 3 stwierdzono, że czas przepływu impulsu obniżonego ciśnienia jest ograniczony i w tym przypadku wynosi około 15 milisekund na długości 0,9 m (odległość umieszczenia czujników pomiaru ciśnienia). Oznacza to, że prędkość przemieszczenia się zaburzenia wywołującego proces wrzenia wynosi około $v_p = 60$ m/s. Nie oznacza to jednak, że front wrzenia przemieszczał się z taką prędkością (była ona mniejsza). Wskazują na to zmiany temperatury wzdłuż długości kanału pomiarowego (rys. 4). Rozmieszczone wzdłuż ogrzewanego kanału czujniki termoelektryczne zarejestrowały przemieszczanie się "zmian" temperatury ścianki na długości 0,5 m w czasie około 170 milisekund. Prędkość przemieszczania się frontu wrzenia określana prędkością zmiany temperatury ścianki v_T wynosiła, więc około $v_T = 2,9$ m/s.

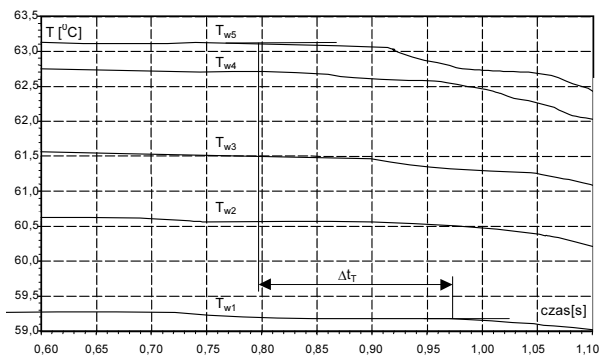
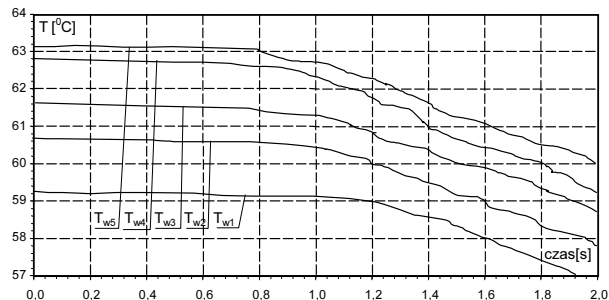
Rysunek 5 przedstawia zmianę w czasie lokalnego przegrzania cieczy na ścianie kanału w dwóch przekrojach pomiarowych. Na jego podstawie można stwierdzić, że warunkiem rozpoczęcia wrzenia powierzchniowego jest przekroczenie krytycznego progu wartości przegrzania cieczy czynnika na ogrzewanej ścianie kanału ΔT_{kr} . Po zainicjowaniu, rozpoczęty proces wrzenia, przebiega w sposób ciągły przy znacznie mniejszych wartościach przegrzania.



Rys. 3. Zmiany ciśnienia p podczas rozwoju wrzenia pęcherzykowego w kanale; czynnik R123, $q = 13,85$ kW/m²; (w_p) = 445 kg/m²s; $\Phi = 0,005$; Δt_p – czas przemieszczania się impulsu ciśnienia wywołującego rozwój wrzenia

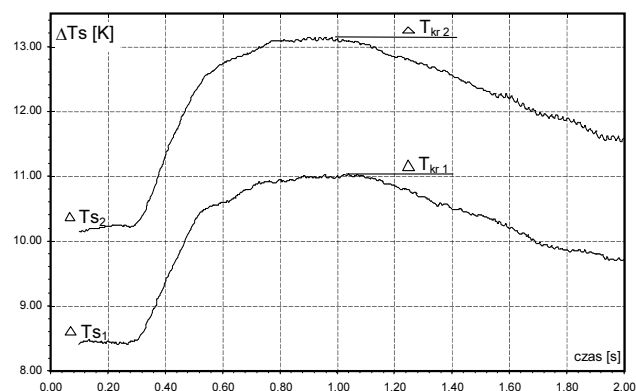
Fig. 3. Pressure changes p during development of bubbly boiling in a channel; refrigerant R123, $q = 13.85$ kW/m²; (w_p) = 445 kg/m²s; $\Phi = 0.005$; Δt_p – displacement time of the pressure impulse producing development of boiling

W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że prędkość v_p przemieszczania się impulsu obniżonego ciśnienia Δp wywołującego rozwój wrzenia w kanale zależała przede wszystkim od stopnia wypełnienia Φ czynnika chłodniczego. Przy zerowych wartościach stopnia wypełnienia Φ prędkość v_p była rzędu około 200 m/s. Wraz ze wzrostem Φ prędkość gwałtownie malała do wartości kilkunastu metrów na sekundę dla $\Phi = 0,4 \div 0,5$.



Rys. 4. Zmiany temperatury czynnika i ścianki kanału T_w podczas rozwoju wrzenia pęcherzykowego w kanale; czynnik R123; $q = 13,85$ kW/m²; (w_p) = 445 kg/m²s; $\Phi = 0,005$; Δt_T – czas przemieszczania się frontu wrzenia

Fig. 4. Changes of refrigerant temperature and channel wall T_w during development of bubbly boiling in a channel; refrigerant R123; $q = 13.85$ kW/m²; (w_p) = 445 kg/m²s; $\Phi = 0.005$; Δt_T – displacement time of boiling front



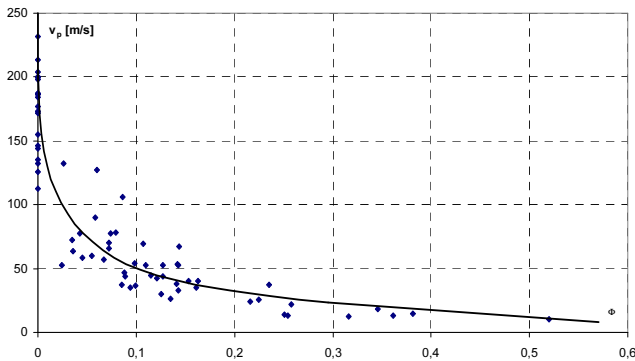
Rys. 5. Zmiany w czasie przegrzania cieczy na ogrzewanej ścianie kanału (dopływ – wypływ) podczas rozwoju wrzenia wywołanego spadkiem ciśnienia; czynnik R123; $q = 13,85$ kW/m²; (w_p) = 445 kg/m²s; $\Phi = 0,005$

Fig. 5. Changes during liquid overheating on the heated channel wall (inflow – outflow) during development of boiling caused by pressure drop; refrigerant R123; $q = 13.85$ kW/m²; (w_p) = 445 kg/m²s; $\Phi = 0.005$

Na rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów dla czynnika chłodniczego R134a w postaci zależności prędkości v_p przemieszczania się impulsu obniżonego ciśnienia wywołującego rozwój wrzenia w kanale od wielkości stopnia wypełnienia Φ czynnika chłodniczego. Front wrzenia powstający na ogrzewanej ścianie przemieszczał się ze znacznie mniejszą prędkością v_T . Były to wartości rzędu kilku metrów na sekundę i mniejsze. Wartości v_T zależały od wielkości impulsu spadku ciśnienia Δp i stopnia wypełnienia Φ .

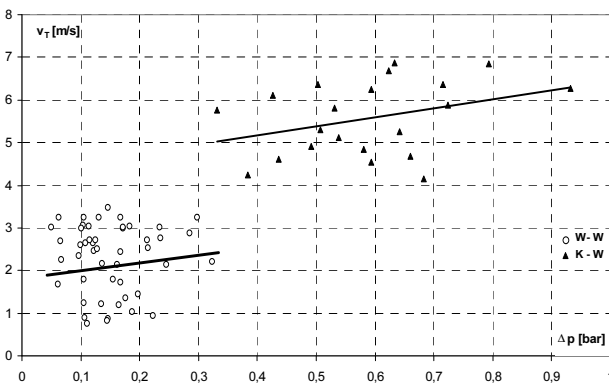
Na rys. 7 przykładowo przedstawiono zależność prędkości przemieszczania się frontu wrzenia v_T od wartości spadku ciśnienia Δp dla czynnika R134a. Przy obniżaniu ciśnienia czynnika w kanale następuje spadek temperatury nasycenia czynnika T_s . Powoduje to chwilowy wzrost stopnia przegrzania cieczy ΔT_s , do momentu rozpoczęcia wrzenia. Szczególnie duże przegrzanie następuje na ogrzewanej ścianie kanału. Przy gwałtownym obniżaniu ciśnienia chwilowe lokalne przegrzanie ΔT_s może osiągać znaczne wartości.

W przeprowadzonych badaniach rejestrowano lokalne chwilowe przegrzania rzędu $40 \div 50$ K. Każdorazowo należy uzyskać krytyczne przegrzanie cieczy, aby zainicjować proces wrzenia, czyli przekroczyć próg aktywności zarodków pary. Wzrost przegrzania cieczy sprzyja wzmożonej aktywacji zarodków wrzenia, co objawia się wyższą prędkością przemieszczania się frontu wrzenia.



Rys. 6. Zależność prędkości v_p przemieszczania się sygnału obniżonego ciśnienia od stopnia zapelnienia Φ dla czynnika R134a; (w_p) = $250 \div 1300$ kg/(m²s), $q = 6 \div 12$ kW/m², $p = 0,2 \div 0,4$ MPa

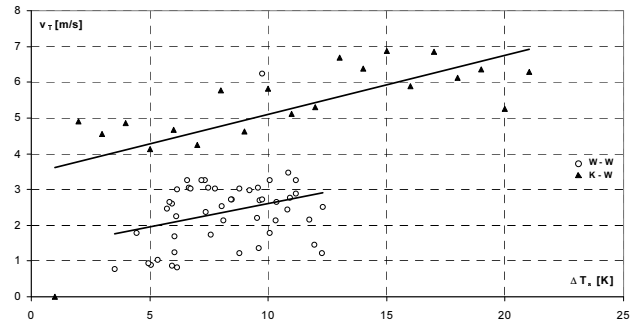
Fig. 6. Dependence of the reduced pressure signal displacement velocity v_p on the void fraction Φ for refrigerant R134a; (w_p) = $250 \div 1300$ kg/(m²s), $q = 6 \div 12$ kW/m², $p = 0,2 \div 0,4$ MPa



Rys. 7. Zależność prędkości v_T przemieszczania się frontu wrzenia od spadku ciśnienia Δp dla czynnika chłodniczego R134a; (w_p) = $250 \div 1300$ kg/(m²s), $q = 6 \div 12$ kW/m², $p = 0,2 \div 0,4$ MPa; K-W rozwój wrzenia w układzie dwufazowym (w cieczy), W-W rozwój wrzenia w układzie dwufazowym

Fig. 7. Dependence of displacement velocity v_T of boiling front from pressure drop Δp for R134a refrigerant; (w_p) = $250 \div 1300$ kg/(m²s), $q = 6 \div 12$ kW/m², $p = 0,2 \div 0,4$ MPa; K-W development of boiling in single-phase system (in liquid), W-W development of boiling in two phase system

Na rys. 8 przedstawiono zależność prędkości przemieszczania się frontu wrzenia v_T od chwilowego lokalnego przegrzania cieczy ΔT_s . Podczas rozwoju wrzenia powierzchniowego w układzie dwufazowym prędkości v_T zmieniały się w granicach od $1 \div 3$ m/s, przy lokalnych chwilowych przegrzaniach cieczy od $5 \div 15$ K. Gdy rozwój wrzenia powierzchniowego następował w układzie jednofazowym (ciecz) prędkości v_T były o około 50 % wyższe, w porównywalnym zakresie przegrzania cieczy. W tym przypadku udało się uzyskać znacznie wyższe lokalne przegrzania cieczy rzędu $50 \div 60$ K i wtedy prędkości v_T dochodziły do około 6 m/s. Występujące opóźnienie w rozwoju wrzenia powierzchniowego należy tłumaczyć wpływem pojemności cieplnej czynnika w podwarstwie przyścienniej i ścianki ogrzewanego kanału. Niezbędne przegrzanie ścianki i cieczy w warstwie przyścienniej uzyskiwane jest w skończonym przedziale czasu, który zależy od grubości i rodzaju materiału ścianki kanału.



Rys. 8. Zależność prędkości frontu wrzenia v_T od chwilowego lokalnego przegrzania cieczy ΔT_s na ogrzewanej ściance kanału w przepływie czynnika R134a; (w_p) = $250 \div 1300$ kg/(m²s), $q = 6 \div 12$ kW/m², $p = 0,2 \div 0,4$ MPa

Fig. 8. Dependence of the boiling front velocity v_T on the instantaneous local liquid overheating ΔT_s on the heated channel wall in the refrigerant R134a flow; (w_p) = $250 \div 1300$ kg/(m²s), $q = 6 \div 12$ kW/m², $p = 0,2 \div 0,4$ MPa

Uzyskane wyniki badań pozwoliły na opracowanie zależności eksperymentalnych opisujących rozwój wrzenia pęcherzykowego w kanale rurowym. Poniżej przedstawiono wyniki analizy badań eksperymentalnych. Prędkość przemieszczania się zaburzeń ciśnienia v_p związana jest ze spadkiem ciśnienia Δp i z lokalnym chwilowym przegrzaniem cieczy ΔT_s . Na podstawie analizy wymiarowej uzyskano następującą zależność:

$$Re = 2,2 \cdot 10^4 \cdot Eu^{0,21} \cdot B^{1,5}, \quad (2)$$

gdzie:

$$Re = \frac{v_p \cdot d \cdot (1 - \gamma)}{\nu \cdot (1 - \Phi)} \quad \text{- liczba Reynoldsa}, \quad (3)$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2} \quad \text{- liczba Eulera}, \quad (4)$$

B - współczynnik opisany wzorem (1).

W równaniu (2) wprowadzono zmodyfikowane do tych celów liczby kryterialne Reynoldsa Re (3) i Eulera Eu (4) oraz bezwymiarowy współczynnik B , podany wzorem (1). Zmodyfikowana liczba Reynoldsa Re zawiera prędkość v_p . Jest to prędkość przemieszczania się zaburzenia wywołanego spadkiem ciśnienia Δp , którego wartość ujmuje zmodyfikowana liczba Eulera Eu . Współczynniki liczbowe w zależności (2) uzyskano aproksymując metodą najmniejszych kwadratów wyniki obliczeń i badań eksperymentalnych. Stwierdzono, że 89 % wyników obliczeń i pomiarów mieściło się w granicach ± 50 %. Jest to niewątpliwie znaczny rozrzut, ale należy mieć na uwadze, iż rozpatrywane zagadnienia dotyczą równowagi metastabilnej układu dwufazowego a przedstawione zjawiska zachodzą w granicach pętli histerezy wymiany ciepła i oporów przepływu [3, 6].

W podobny sposób wyznaczono zależność pozwalającą określać prędkość przemieszczania się frontu wrzenia v_T , której wielkość ujmuje zmodyfikowana liczba Pecleta Pe

$$Pe = 1,1 \cdot 10^4 \cdot B^{1,5}, \quad (5)$$

gdzie:

$$Pe = \frac{v_T \cdot d \cdot (1 - \gamma)}{a \cdot (1 - \Phi)} \quad \text{- liczba Pecleta} \quad (6)$$

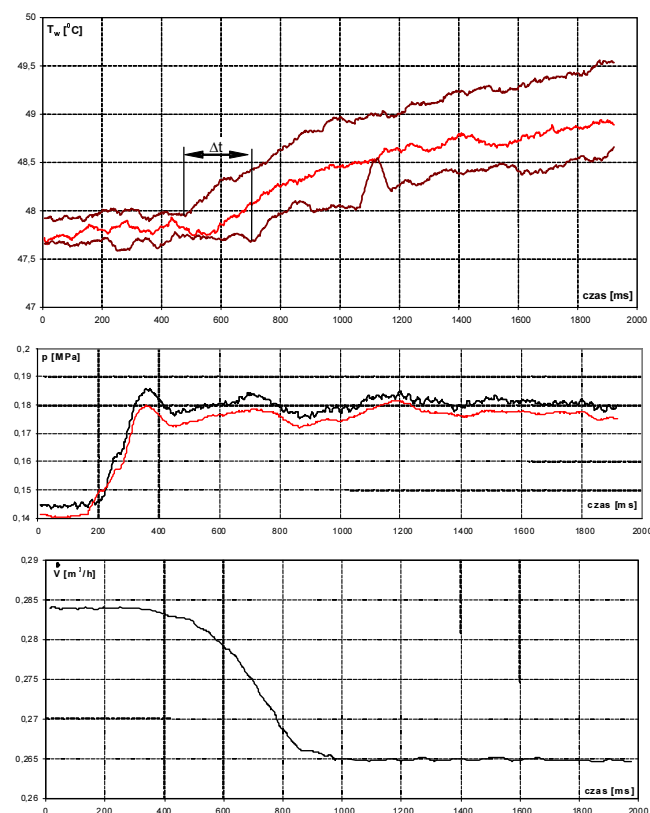
B - współczynnik opisany wzorem (1).

Z porównania wyników obliczeń według zależności (5) z wynikami badań eksperymentalnych uzyskano podobny efekt ich rozbieżności jak dla zależności (2).

5. Badanie zaniku wrzenia w kanale

Badania rozwoju wrzenia pęcherzykowego w kanale wykazały, że zainicjowanie procesu wrzenia wymaga uzyskania odpowied-

nio dużego przegrzania cieczy na ścianie kanału. Wielkość minimalnego przegrzania ujemne górna wartość bezwymiarowego współczynnika $B1$. Mając powyższe na uwadze założono, że zanik wrzenia nastąpi wtedy, gdy uzyska się odpowiednio niską temperaturę cieczy na ścianie ogrzewanego kanału (lokalne przegrzanie będzie zbyt małe aby podtrzymać generację pęcherzyków parowych). Spowoduje to zanik aktywności zarodków pary i zakończy proces wrzenia. Prowadząc badania zaniku wrzenia podwyższano ciśnienie p w kanale metodą częściowego zamykania zaworu za odcinkiem pomiarowym. Powodowało to wzrost temperatury nasycenia T_s i równocześnie wzrost niedogrzaną cieczy do temperatury nasycenia ΔT_n . Jako pierwszy przemieszczał się w kierunku przeciwnym do przepływu wrzącego czynnika sygnał podwyższonego ciśnienia Δp z prędkością v_p a następnie w kierunku zgodnym z kierunkiem przepływu czynnika fala wzrostu temperatury ścianki z prędkością v_T . Wzrost temperatury ścianki oznaczał zmniejszenie intensywności wymiany ciepła wywołanej zanikiem wrzenia. Wynika stąd, że zanik wrzenia następuje na początku ogrzewanego kanału, w miejscu najmniejszego przegrzania cieczy. Na rys. 9 przedstawiono przykładowo zmiany w czasie wielkości towarzyszących zanikowi wrzenia pęcherzykowego w kanale (pomiaru temperatury ścianki kanału wykonano na długości 0,2 m). Dla prezentowanego przypadku prędkość przemieszczania się sygnału wzrostu ciśnienia v_p wynosiła 16,8 m/s a prędkość zaniku wrzenia v_T była równa 1,43 m/s.

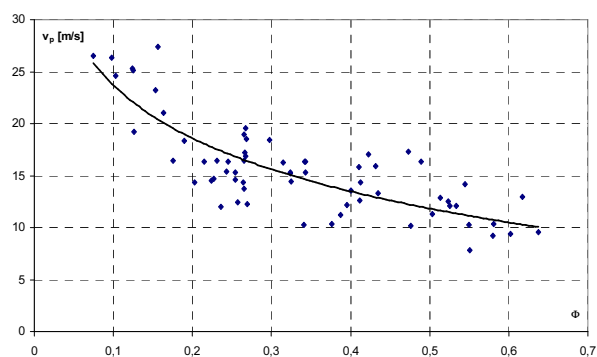


Rys. 9. Zmiana w czasie parametrów podczas zaniku wrzenia pęcherzykowego w kanale, czynnik R123; $q = 21,3 \text{ kW/m}^2$, $\Phi = 0,943$, Δt – czas przemieszczania się frontu wrzenia

Fig. 9. Change of parameters in time during the decay of bubble boiling in channel, refrigerant R123; $q = 21.3 \text{ kW/m}^2$, $\Phi = 0.943$, Δt – displacement time of boiling front

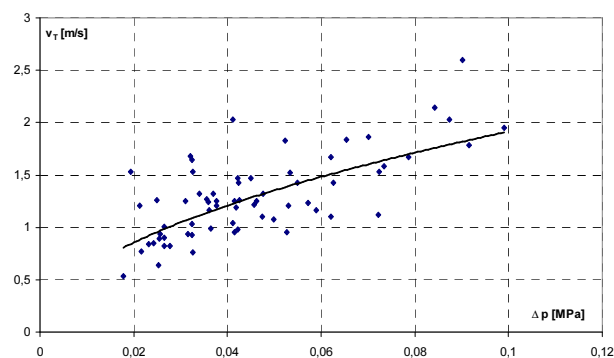
Stwierdzono, że impuls wzrostu ciśnienia Δp , podobnie jak w przypadku rozwoju wrzenia, przemieszczał się z prędkością v_p zależną od stopnia zapełnienia w kanale Φ (rys. 10) z tym, że wartości v_p były średnio o około 20% niższe niż w przypadku rozwoju wrzenia powierzchniowego w kanale (dla tych samych wartości stopnia zapełnienia Φ w stanie początkowym układu). Można to wytłumaczyć występującą histerezą wymiany ciepła początku wrzenia powierzchniowego. Wielkość wzrostu ciśnienia

Δp w kanale decyduje o zmniejszeniu lokalnego przegrzania cieczy na ogrzewanej ścianie kanału. Przy wyższych wartościach przegrzanie to może przyjmować nawet wartości ujemne. Wzrost Δp sprzyja wzrostowi prędkości wygaszania wrzenia w kanale co przedstawiono na rys. 11. Prędkość zaniku wrzenia v_T zależy od wielkości lokalnego zmniejszenia przegrzania cieczy na ścianie kanału. Wielkość tego przegrzania ujemne zaproponowany wcześniej bezwymiarowy współczynnik B . Na rys. 12 przedstawiono zależność zmodyfikowanej liczby Pecleta Pe od współczynnika B . Wygaszenie procesu wrzenia może nastąpić po przekroczeniu dolnej wartości współczynnika B (dla R123 $B = B2 \approx 3$). Spadek wartości współczynnika B sprzyja wzrostowi liczby Pecleta Pe i związanej z nią prędkości v_T .



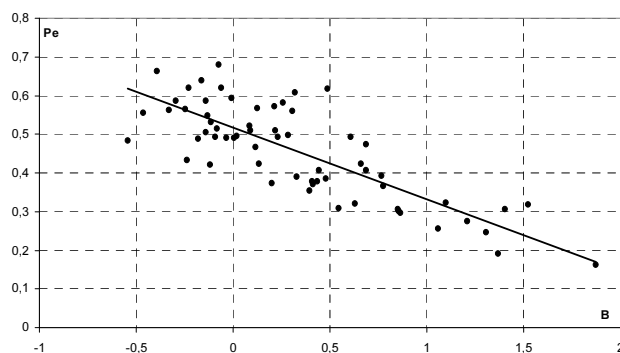
Rys. 10. Zależność prędkości v_p przemieszczania się impulsu ciśnienia Δp w zależności od stopnia zapełnienia Φ podczas zaniku wrzenia; czynnik R134a

Fig. 10. Pressure impulse displacement Δp velocity v_p vs. the void fraction Φ during decay of boiling; refrigerant R134a



Rys. 11. Zależność prędkości zaniku wrzenia v_T od spadku ciśnienia w kanale Δp ; czynnik R134a

Fig. 11. Dependence of velocity v_T of boiling decay from pressure drop in the channel Δp ; refrigerant R134a



Rys. 12. Zależność zmodyfikowanej liczby Pecleta Pe od współczynnika B dla zaniku wrzenia pęcherzykowego w kanale rurowym; czynnik R134a

Fig. 12. Dependence of the modified Peclet's Pe number on B coefficient for decay of bubbly boiling in a tubular channel; R134a refrigerant

Podobnie jak dla rozwoju wrzenia powierzchniowego wyznaczono zależności empiryczne dla zaniku wrzenia w kanale.

Zależność ujmującą prędkość przemieszczania się impulsu ciśnienia v_p wywołującego zanik wrzenia przedstawiono w postaci

$$Re = 0,81 \cdot 10^5 \cdot Eu^{0,11} \quad (7)$$

gdzie: Re - liczba Reynoldsa (wzór 3), Eu - liczba Eulera (wzór 4).

W zależności (7) nie występuje bezwymiarowy współczynnik B (wzór 1), ponieważ w układzie dwufazowym (para mokra) wzrost ciśnienia Δp ujmując jednocześnie zmianę temperatury nasycenia i przegrzania cieczy ΔT_s .

Zależność ujmującą prędkość zaniku wrzenia w kanale v_T ma postać

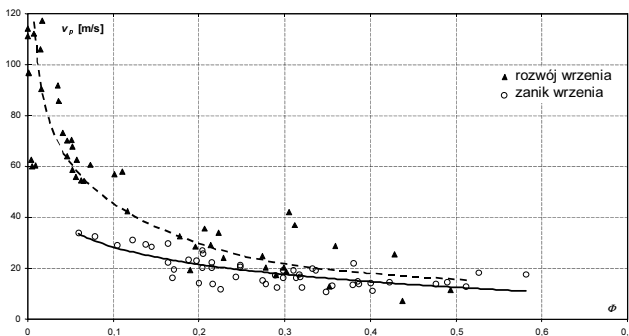
$$Pe = 0,93 \cdot 10^5 (B2 - B)^{0,41} \quad (11)$$

gdzie: Pe - liczba Pecleta (wzór 6), B - współczynnik (wzór 1), $B2$ - dolna wartość współczynnika B .

Porównując wyniki badań i obliczeń stwierdzono zgodność w zakresie $\pm 50\%$.

6. Podsumowanie

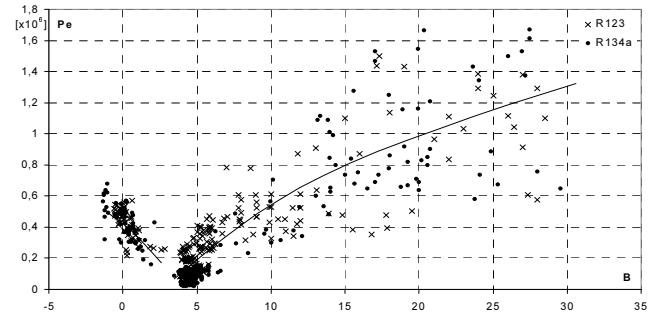
Potwierdzono eksperymentalnie, że rozwój i zanik wrzenia pęcherzykowego w przepływie ma charakter falowy. W opisie oddziaływań ujmujących falowość zjawisk wzięto pod uwagę nie tylko prędkość v_p przemieszczania się impulsu zmian ciśnienia, ale również prędkość v_T frontu wrzenia. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że prędkość przemieszczania się impulsu zmian ciśnienia v_p wywołującego rozwój wrzenia zależy od stopnia zapełnienia Φ czynnika w kanale. W przypadku zaniku wrzenia prędkość v_p jest o około 20% mniejsza, co ilustruje rysunek 13. Prędkość rozwoju lub zaniku wrzenia powierzchniowego w kanale zależy od lokalnego przegrzania cieczy na ogrzewanej ścianie.



Rys. 13. Zależność prędkości przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia v_p wywołującego rozwój lub zanik wrzenia w zależności od stopnia zapełnienia Φ w kanale; czynnik R123

Fig. 13. Displacement velocity of the pressure change signal v_p inducing the development or decay of boiling vs. the void fraction Φ in a channel; refrigerant R123

Na rys. 14 zestawiono uzyskane wyniki pomiarów w postaci zależności zmodyfikowanej liczby Pecleta Pe od bezwymiarowego współczynnika B , który ujmując lokalne przegrzanie cieczy. Wyższe wartości liczby Pecleta Pe dotyczą pomiarów, w których rozwój wrzenia wywoływano skokowym obniżeniem ciśnienia w kanale. Dla tych przypadków uzyskano największe lokalne chwilowe przegrzania cieczy i najwyższe wartości prędkości frontu wrzenia v_T . Najniższe wartości współczynnika B (w tym ujemne) dotyczą zaniku wrzenia. Przebieg zależności $Pe=f(B)$ dla zaniku wrzenia różni się w istotny sposób od przebiegu dla rozwoju wrzenia.



Rys. 14. Zestawienie zbiorcze wyników pomiarów dla rozwoju i zaniku wrzenia powierzchniowego w kanale w postaci zależności $Pe=f(B)$

Fig. 14. Measurement results for development and decay of surface boiling in a channel in form of the function $Pe=f(B)$

Należy jednak wyraźnie podkreślić, że w badaniach eksperymentalnych zastosowano wymuszenie rozwoju wrzenia w przepływie przez „skokowe” zwiększanie przegrzania na powierzchni ścianki kanału (którego przyczyną był gwałtowny spadek ciśnienia). Uzyskane wartości prędkości frontu wrzenia v_T zmieniały się w przedziale $v_T = 0,08 \div 6$ m/s dla przegrzania $\Delta T_s = 5 \div 60$ K. Wyższe wartości prędkości v_T dotyczyły przypadków, gdy rozwój wrzenia wywoływano „skokowym” obniżeniem ciśnienia. Wówczas impuls zmiany ciśnienia przemieszczał się z dużą prędkością v_p (nawet 200 m/s) wymuszając wzrost prędkości v_T .

Metodyka badań eksperymentalnych różniła się od dotychczas stosowanych przez innych badaczy oryginalnym uwzględnieniem wpływu niestabilności na zjawiska rozwoju i zaniku wrzenia w przepływie. Objawiało to się tym, że czynnik chłodniczy był podczas badań jakby „gwałtownie umieszczany” w obszarze metastabilnych. Podczas badania rozwoju wrzenia czynnik „umieszczano” gwałtownie w obszarze stanów cieczy przegrzanej (na prawo od lewej krzywej granicznej $x=0$ na wykresie $lgp-h$) a podczas badań zaniku wrzenia para nasycona mokra czynnika trafiała gwałtownie do obszaru stanów cieczy niedogrzonej do temperatury nasycenia (w kierunku na lewo od lewej linii granicznej $x=0$). Takie „dynamiczne” oddziaływania, które mogą występować w warunkach eksploatacyjnych powodowały dodatkową intensyfikację obu zjawisk.

W podsumowaniu należy wskazać niewątpliwie walory poznawcze badanych eksperymentalnie zjawisk rozwoju i zaniku wrzenia w przepływie a także ich aspekty eksploatacyjne. Zjawiska te zachodzą nie tylko w parownikach urządzeń chłodniczych (w tym zasilanych nowymi proekologicznymi czynnikami), ale również w innych elementach układów energetycznych takich jak kotły parowe, czy też reaktory. W warunkach dynamicznych zmian parametrów układu mogą pojawiać się niekorzystne oddziaływania eksploatacyjne objawiające się niestabilnościami. Są one tym bardziej niebezpieczne, że mają charakter falowy, co może wpływać negatywnie na współpracę różnych węzłów instalacji. Uzyskane wyniki badań wpłyną niewątpliwie na opracowanie dalszych programów badawczych tego typu zjawisk.

7. Oznaczenia

- a - współczynnik wyrównywania temperatury, m^2/s ,
- d - średnica wewnętrzna kanału, m,
- Eu - zastępcza liczba Eulera,
- p - ciśnienie, MPa,
- Pe - zastępcza liczba Pecleta,
- q - gęstość strumienia ciepła, W/m^2 ,
- Re - zastępcza liczba Reynoldsa,
- T - temperatura, K
- t - czas, s,
- w - prędkość czynnika, m/s,
- $(w\rho)$ - gęstość strumienia masy, kg/m^2s ,
- v - prędkość fali, m/s,
- y - dynamiczny stopień suchości,

- Φ - stopień zapełnienia,
 ν - kinematyczny współczynnik lepkości, m^2/s ,
 ρ - gęstość, kg/m^3 ,

indeksy dolne dotyczą:

- F - cieczy,
 kr - warunków krytycznych,
 n - niedogrzenia,
 p - ciśnienia,
 s - nasycenia,
 t - temperatury,
 w - ścianki,
 1, 2, ... - numeru kolejnego czujnika pomiarowego,

indeksy górne dotyczą:

- ' - cieczy,
 '' - pary.

8. Literatura

- [1] Bohdal T.: Bubble boiling of environment-friendly refrigeration media. *International Journal of Heat and Fluid Flow* (2000), No 4, Volume 21, pp. 449 – 455.

- [2] Bohdal T.: Development of bubbly boiling in channel flow. *An International Journal of Experimental Heat Transfer*, 2001, Volume 14, No 3, pp. 199 – 215.
- [3] Bohdal T.: Zjawiska wrzenia pęcherzykowego czynników chłodniczych. Monografia, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001, stron 262.
- [4] Bohdal T., Bilicki Z., Czapp M.: Development of Nucleate Boiling in an Annular Clearance. *An International Journal of Heat and Technology*, 2001, No 2, Volume 19-n, pp. 33-37.
- [5] Bohdal T.: Badanie początku wrzenia pęcherzykowego w kanale. *Chłodnictwo*, 2002, nr 4, s. 10 – 14.
- [6] Bohdal T.: Przyczyny niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych. Monografia, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, 2006.
- [7] Mitrovic J., Fauser J.: Propagation of two-phase fronts during boiling of superheat liquids, *Proc. 2nd European Symp. „Fluids in Space”*, Naples, Italy, 1996.
- [8] Nakoryyakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R., *Wave propagation in gas-liquid media*, Bergles A.E. (Editor) by CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 1993.
- [9] Pavlenko A.N., Lel V.V.: Approximate simulation model of a self-sustaining evaporation front, *Thermophysics and Aeromechanics*, 1999, Vol. 6, no.1, pp. 105-117.

otrzymano / received: 15.02.2010

przyjęto do druku / accepted: 15.03.2010

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Ceny promocyjne do 10 czerwca 2010



CONTROL-TECH

XII Targi Przemysłowej Techniki Pomiarowej

28-30.09.2010, Kielce



TargiKielce
EXHIBITION & CONFERENCE CENTRE

www.control-tech.pl

Zakres branżowy targów:

<ol style="list-style-type: none"> 1. Pomiary długości i kąta 2. Przyrządy pomiarowe 3. Maszyny pomiarowe 4. Urządzenia pomiarowe specjalnego zastosowania 5. Elementy do urządzeń pomiarowych i badawczych 6. Badanie materiału 7. Aparatura do prób nieniszczących 8. Aparatura analityczna 	<ol style="list-style-type: none"> 9. Przyrządy do pomiaru wytrzymałości 10. Aparatura do określania innych wielkości fizycznych 11. Inne urządzenia 12. Oprogramowanie do komputerowego wspomaganie zapewnienia jakości 13. Analiza obrazu oraz systemy przetwarzania obrazu 14. Systemy optyczno-elektroniczne 15. Organizacje/ wydawnictwa/ usługi
---	--

Targi Kielce, ul. Zakładowa 1, 25-672 Kielce
 Menedżer Targów - **Joanna Adamczyk**
 tel. 041 365 12 14, fax 041 365 13 13, e-mail: adamczyk.j@targikielce.pl