



Analiza niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych. Część II – Badania eksperymentalne własne

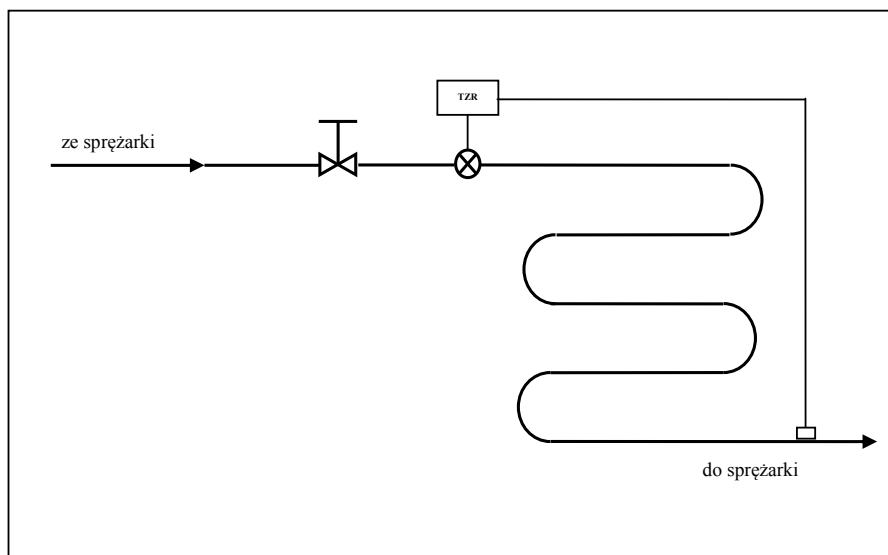
Tadeusz Bohdal
Politechnika Koszalińska

1. Wstęp

W praktyce eksploatacyjnej mają często miejsce przypadki zaburzeń typu jednostkowego spowodowane wystąpieniem gwałtownej zmiany parametrów układu [3]. Jako przyczyny tego typu zaburzeń można wymienić, między innymi, wystąpienie niedrożności zaworu lub kanału przepływowego, powstanie awarii układu zasilania parownika lub skraplacza, zamknięcie lub otwarcie zaworu odcinającego, gwałtowna zmiana obciążenia cieplnego, uszkodzenie wentylatora chłodnicy lub skraplacza chłodzonego powietrzem itd. Oprócz zaburzeń jednostkowych mogą występować w obiegu chłodniczym zaburzenia generowane w sposób periodyczny, na przykład wskutek okresowego działania elementów automatyki chłodniczej, czy dynamicznej zmiany parametrów zasilania parownika, wynikających ze zjawiska migotania termostatycznego zaworu rozprężnego [4]. W części pierwszej [6] opracowania przedstawiono wyniki analizy danych literaturowych w zakresie niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki własnych badań eksperymentalnych procesu wrzenia proekologicznego czynnika chłodniczego podczas przepływu w kanałach rurowych w warunkach zaburzeń generowanych jednostkowo.

2. Badania wrzenia czynnika chłodniczego w warunkach zaburzeń jednostkowych

Badania eksperymentalne przeprowadzono wykorzystując modelowy wymiennik ciepła, który składał się z 12 rur prostych poziomych, połączonych kolanami w węzownicę rurową. Długość węzownicy wynosiła 12 m a średnica wewnętrzna 13 mm. Od zewnątrz węzownica rurowa była ożebrowana (ożebrowanie lamelowane) i omywana strumieniem powietrza, generowanym za pomocą wentylatora osiowego. W rurociągu na dopływie czynnika do węzownicy umieszczono zawór odcinający, który wykorzystano do wywoływania zaburzeń jednostkowych przez jego gwałtowne otwieranie lub zamykanie w czasie eksploatacji. Dodatkowo węzownica rurowa zasilana była czynnikiem chłodniczym za pomocą termostaticznego zaworu rozprężnego TZR. W węzownicy rurowej wzdłuż drogi przepływu czynnika chłodniczego umieszczono 12 czujników do pomiaru ciśnienia i 12 czujników do pomiaru temperatury. Przedmiotowy wymiennik włączono do instalacji chłodniczej sprężarkowej jednostopniowej pracującej na czynniku R404A. Schemat modelowego wymiennika przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy modelowego wymiennika ciepła

Fig. 1. Diagram of model heat exchanger

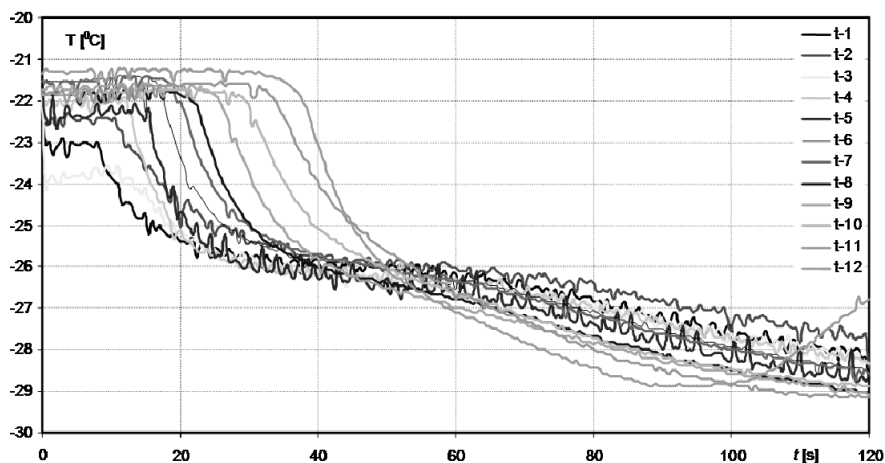
Prowadząc badania związane z rozwojem lub zanikiem wrzenia w przepływie w kanale rurowym wywoływano gwałtowną zmianę parametrów układu dwufazowego, np. ciśnienia lub gęstości strumienia masy. Na przykład rozwój wrzenia czynnika chłodniczego w węzownicy rurowej wywoływano przez otwarcie zaworu odcinającego na dopływie czynnika do węzownicy parownika. Otwarcie zaworu umożliwiało przepływ czynnika przez termostatyczny zawór rozprężny i rozpoczęcie wrzenia w węzownicy. Proces wrzenia rozpoczynał się na początku węzownicy i przemieszczał się wzdłuż jej długości, aż do osiągnięcia zadanego przegrzania pary w króćcu ssawnym sprężarki. Przepływ czynnika chłodniczego R404A poprzedzało przejście sygnału podwyższonego ciśnienia w postaci fali o prędkości v_p . Następnie wraz z przejściem czoła wrzącego czynnika (frontu wrzenia) następowało obniżanie temperatury ścianki wzdłuż węzownicy. Można, więc uznać, że następowało przejście fali temperaturowej, ale z inną już prędkością v_T .

Rys. 2 przedstawia przykładowo przebieg zmiany temperatury ścianki węzownicy rurowej po otwarciu zaworu odcinającego. Można zaobserwować sukcesywne obniżanie temperatury ścianki, jakie towarzyszy przepływowi wrzącego czynnika wzdłuż węzownicy. Rozmieszczone na długości węzownicy czujniki do pomiaru temperatury (oznaczone numerami od 1 do 12) rejestrowały kolejno obniżenie temperatury w czasie. Jako ostatni zareagował czujnik nr 12 umieszczony na końcu węzownicy. On też zarejestrował największy spadek temperatury, co świadczy o braku strefy przegrzania. Proces wrzenia odbywał się więc na całej długości węzownicy. W takim przypadku temperatura czynnika i ścianki kanału były funkcją ciśnienia, które osiągało najniższą wartość na wypływie czynnika z węzownicy rurowej.

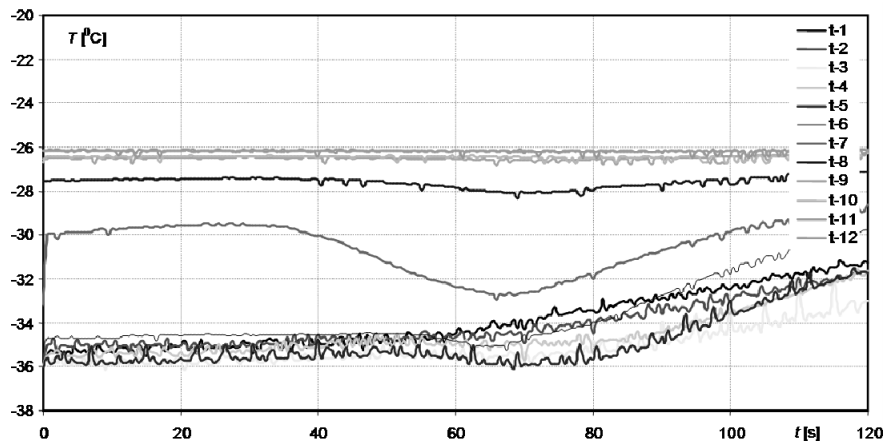
Zamknięcie zaworu odcinającego na dopływie czynnika chłodniczego do węzownicy rurowej powodowało zanik procesu wrzenia. Następowo wtedy zakończenie dopływu czynnika chłodniczego do węzownicy. Jako pierwsze odnotowano przejście sygnału obniżonego ciśnienia w postaci fali o prędkości v_p w kierunku przeciwnym do przepływu czynnika. Następnie obserwowano cofanie się „strefy wrzenia” jako wynik ciągłego odsysania przez sprężarkę pary czynnika, przy czym wzrastała długość „strefy przegrzania”. Wraz z zanikiem wrzenia wzrastała także temperatura ścianki, co objawiało się przejściem fali temperaturowej z prędkością v_T . Na rys. 3 i 4 przedstawiono wyniki pomiarów

rozkładu temperatury i ciśnienia na długości węzownicy rurowej w różnych przedziałach czasu po zamknięciu zaworu odcinającego. W czasie początkowym ($t = 0$) rejestrowano wartości temperatury i ciśnienia typowe dla pracy ustalonej parownika zasilanego przez termostatyczny zawór rozprężny. Wzdłuż długości węzownicy następował spadek ciśnienia, a w strefie wrzenia towarzyszył mu spadek temperatury mieszaniny dwufazowej, natomiast w strefie przegrzania temperatura pary przegrzanej czynnika chłodniczego wzrastała. Po zamknięciu zaworu, na skutek ciągłego odsysania pary przez sprężarkę spadało ciśnienie w węzownicy. Wzrastała też temperatura czynnika oraz powiększała się strefa przegrzania.

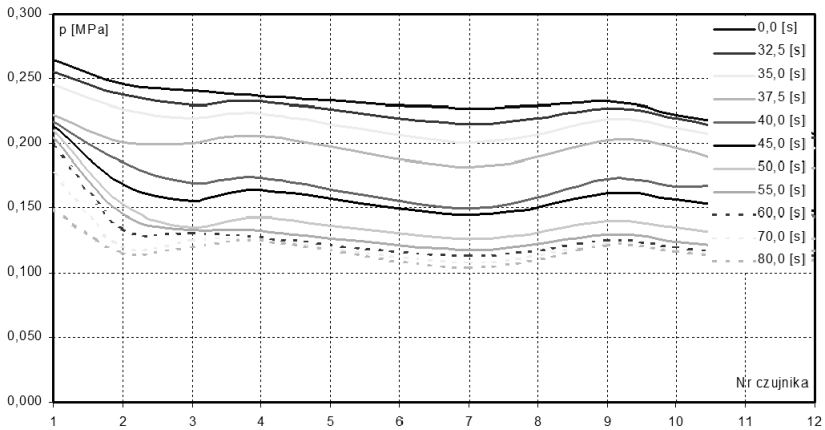
Stwierdzono, że wartości prędkości v_p fali ciśnienia różniły się w przypadku otwarcia i zamknięcia zaworu odcinającego. Tym samym wartościom sygnału zmiany ciśnienia Δp odpowiadały wyższe wartości v_p podczas otwarcia zaworu odcinającego w stosunku do jego zamknięcia (rys. 5). Przyczynę należy upatrywać w różnej wielkości stopnia zapełnienia czynnika chłodniczego φ w węzownicy rurowej. W przypadku otwarcia zaworu sygnał ciśnienia Δp przemieszczał się wewnątrz węzownicy wypełnionej praktycznie parą nasyconą suchą czynnika chłodniczego (ewentualnie z niewielką domieszką kropelek cieczy – mgły $\varphi \approx 0$). W przypadku zamknięcia zaworu sygnał Δp przemieszczał się w układzie dwufazowym o zmiennej zawartości cieczy na drodze od zaworu rozprężnego do końcowego przekroju węzownicy (stopień suchości $x \approx 0,15 \div 1$). Potwierdzają to dane literaturowe o silnej zależności prędkości v_p od stopnia zapełnienia φ [1, 2, 5]. Wartości prędkości przejścia fali ciśnieniowej były ponad dwukrotnie wyższe dla otwarcia zaworu, w porównaniu z przypadkiem zamknięcia, przy tych samych wartościach zmiany ciśnienia Δp .



Rys. 2. Zmiana w czasie temperatury czynnika chłodniczego w węzownicy rurowej po otwarciu zaworu odcinającego
Fig. 2. Change in time of the temperature of refrigerant in coil pipe after opening of cut-off valve

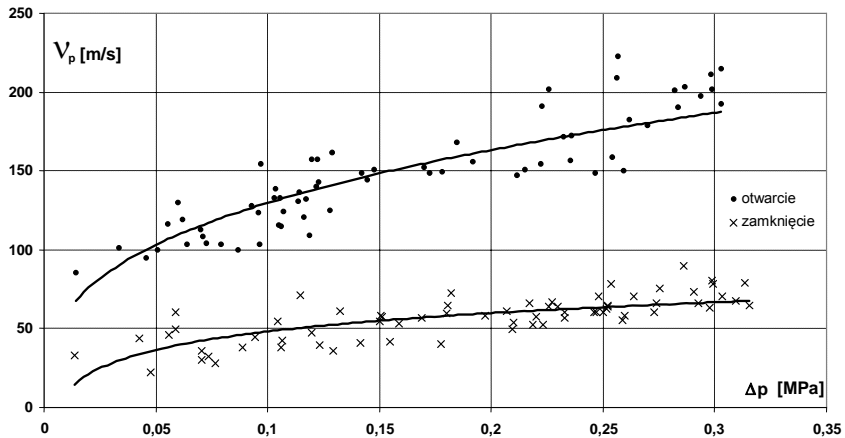


Rys. 3. Zmiana w czasie temperatury czynnika chłodniczego w węzownicy rurowej po zamknięciu zaworu odcinającego
Fig. 3. Change in time of the temperature of refrigerant in coil pipe after shutting of cut-off valve



Rys. 4. Rozkład ciśnienia na długości wężownicy rurowej po zamknięciu zaworu odcinającego

Fig. 4. Pressure distribution on the length of coil pipe after shutting cut-off valve



Rys. 5. Porównanie wyników pomiarów prędkości przemieszczania się sygnału ciśnienia podczas otwarcia i zamknięcia zaworu odcinającego na dopływie czynnika do wężownicy rurowej

Fig. 5. Comparison of the results of the displacement velocity of pressure signal during opening and closing cut-off valve on refrigerant's inlet to coil pipe

Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych opracowano zależność pozwalającą wyznaczać prędkość v_p przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia podczas rozwoju i zaniku wrzenia w węzownicy rurowej (otwarcia i zamknięcia zaworu)

Do opisu wprowadzono liczby kryterialne:

- zastępczą liczbę *Reynoldsa* $Re = \frac{v_p \cdot d}{\eta}$, (1)

- zastępczą liczbę *Eulera* $Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2}$. (2)

Wykorzystując ulepszoną metodę najmniejszych kwadratów [7] uzyskano następującą korelację opisującą przejście fali ciśnieniowej podczas gwałtownej zmiany gęstości strumienia masy czynnika w węzownicy rurowej:

$$Re = A \cdot 10^9 \cdot Eu^{-0,67}. \quad (3)$$

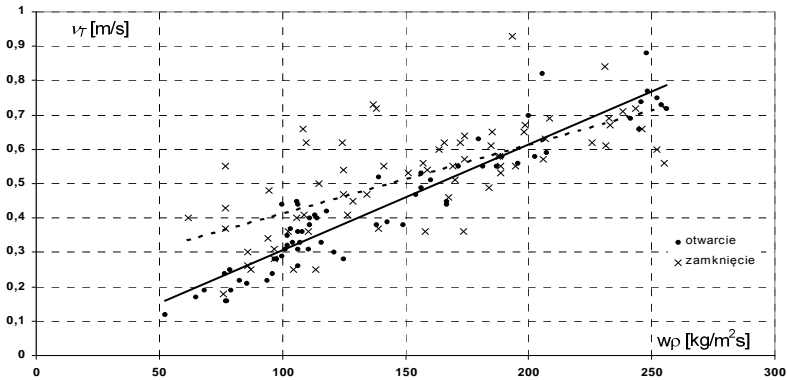
gdzie: $A = 4,27$ dla rozwoju wrzenia, $A = 1,58$ dla zaniku wrzenia.

Korelacja jest słuszna w granicach liczb kryterialnych:

$$Re = (2 \div 14) \cdot 10^6 \text{ oraz } Eu = (4 \div 20) \cdot 10^3. \quad (4)$$

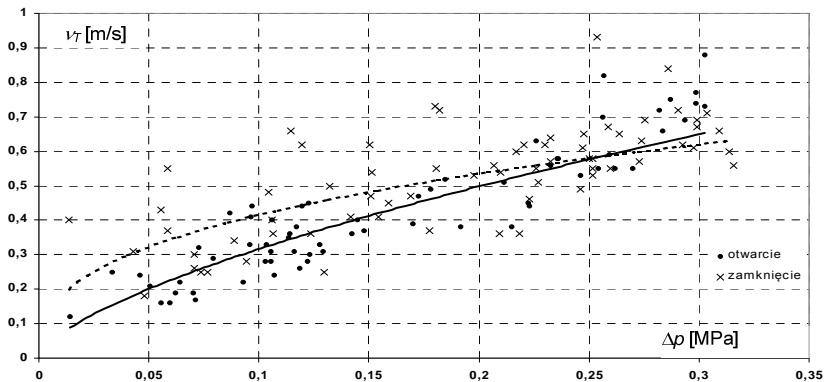
Przejście fali temperaturowej jest ściśle związane z przepływem wrzącego czynnika chłodniczego i nie zależy praktycznie od rodzaju wywołwanego zburzenia. Zależność prędkości v_T fali temperaturowej od gęstości strumienia masy ($w\rho$) pokazano na rys. 6. Wzrost gęstości strumienia masy ($w\rho$) powoduje wzrost prędkości v_T fali temperaturowej (w badanych przypadkach od 0,1 do 0,9 m/s). Spadek lub wzrost ciśnienia Δp , jaki towarzyszy otwarciu lub zamknięciu zaworu wymusza przepływ wrzącego czynnika chłodniczego, co z kolei powoduje przemieszczanie się fali temperaturowej z prędkością v_T . Na rys. 7 przedstawiono zależność prędkości v_T od sygnału ciśnienia Δp . Zjawisko to nie zależy od sposobu realizacji zaburzenia impulsowego. Podczas wywoływania zaburzeń impulsowych (niezależnie od rodzaju zaburzenia) uzyskiwano zbliżone przedziały zmiany sygnału ciśnienia Δp ($\Delta p = 0,02 \div 0,32$ MPa) i odpowiadające im przedziały zmienności prędkości fali temperaturowej v_T ($v_T = 0,1 \div 0,9$ m/s). Różne natomiast były wartości prędkości fali ciśnienia

(znacznie wyższe podczas rozwoju wrzenia przy otwarciu zaworu). Powoduje to, że jednej wartości prędkości fali temperaturowej v_T odpowiadają dwie różne prędkości fali ciśnienia v_p (dla rozwoju i zaniku wrzenia w węzownicy). Potwierdza to jednoznacznie tezę o istnieniu *histerezy*, towarzyszącej procesowi rozwoju i zaniku wrzenia w kanale rurowym.



Rys. 6. Zależność prędkości fali temperaturowej v_T od gęstości strumienia masy (w_p) podczas otwarcia i zamknięcia zaworu

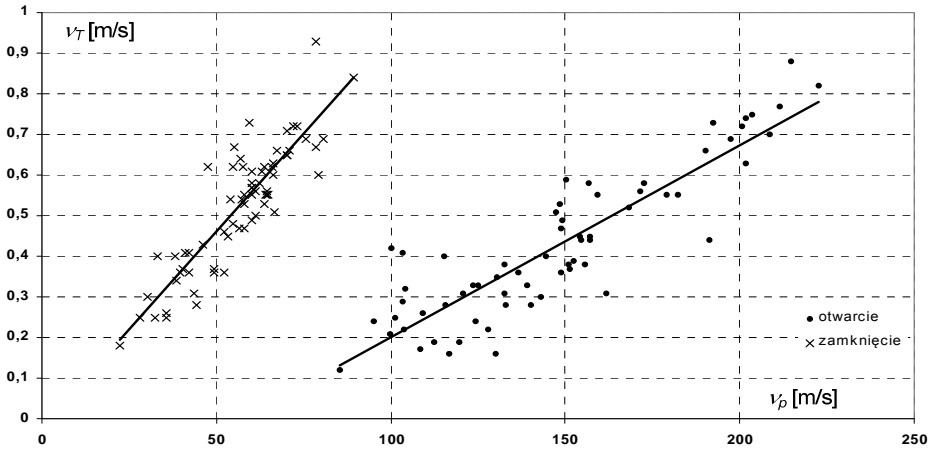
Fig. 6. Dependence of temperature wave velocity v_T from mass flux density (w_p) during valve opening and closing



Rys. 7. Porównanie wyników pomiarów prędkości przemieszczania się fali temperaturowej podczas otwarcia i zamknięcia zaworu

Fig. 7. Comparison of the measurement results of temperature wave displacement velocity during valve opening and closing

Na rys. 8 przedstawiono zależność prędkości v_T fali temperaturowej od prędkości v_p przemieszczania się sygnału ciśnienia podczas otwarcia i zamknięcia zaworu odcinającego.



Rys. 8. Porównanie zależności prędkości fali temperaturowej v_T od prędkości przemieszczania się sygnału ciśnienia v_p podczas otwarcia i zamknięcia zaworu odcinającego

Fig. 8. Comparison of the dependence of temperature wave velocity v_T from pressure signal displacement velocity v_p during cut-off valve opening and closing

3. Podsumowanie

Przeprowadzono badania eksperymentalne wrzenia pęcherzykowego w warunkach zaburzeń impulsowych. Podstawowym celem badań było rozpoznanie, zarejestrowanie i opis zjawisk zachodzących w stanach niestabilnych układu występujących wewnątrz węzownicy rurowej podczas wrzenia w przepływie czynnika chłodniczego. Badania eksperymentalne przeprowadzono w dwóch etapach. W etapie pierwszym wywołano rozwój wrzenia czynnika chłodniczego w węzownicy rurowej poprzez otwarcie zaworu odcinającego na dopływie czynnika do węzownicy rurowej. Otwarcie zaworu umożliwiło przepływ czynnika przez termostacyjny zawór rozprężny (zasilający węzownicę) i rozpoczęcie wrzenia w węzownicy. Proces wrzenia rozpoczynał się na początku węzownicy rurowej i przemieszczał się wzdłuż jej długości, aż do osiągnię-

cia zadanego przegrzania pary na wypływie. Przepływ czynnika w węźownicy poprzedzało przejście sygnału podwyższonego ciśnienia w postaci fali przemieszczającej się z prędkością v_p . Następnie wraz z przejściem czoła wrzącego czynnika (frontu wrzenia) następowało obniżanie temperatury ścianki wzdłuż węźownicy. A zatem następowało przejście fali temperaturowej, ale z prędkością v_T .

W etapie drugim wywoływano zanik wrzenia czynnika chłodniczego w węźownicy rurowej przez zamknięcie zaworu odcinającego na dopływie czynnika do węźownicy rurowej. Podczas tego procesu następowało jako pierwsze przejście sygnału obniżonego ciśnienia w postaci fali o prędkości v_p w kierunku przeciwnym do przepływu czynnika. Obserwowano przy tym cofanie się „strefy wrzenia” jako wynik ciągłego odsysania przez sprężarkę pary czynnika. Wzrastała, zatem długość „strefy przegrzania”. Wraz z zanikaniem wrzenia wzrastała temperatura ścianki, co objawiało się przejściem fali temperaturowej z prędkością v_T .

Uzyskane wyniki badań wykazały, że procesy rozwoju i zaniku wrzenia w węźownicy rurowej posiadają podobny charakter falowy, przy jednoczesnym zróżnicowaniu ich niektórych wielkości fizycznych. Jako wspólną cechę należy uznać falowy charakter przenoszenia się zaburzeń impulsowych w ośrodku dwufazowym z wrzącym czynnikiem. W każdym przypadku wywołania zaburzenia impulsowego (podczas otwarcia lub zamknięcia zaworu) następowało przejście fali ciśnieniowej z prędkością v_p a następnie przepływał czynnik chłodniczy o gęstości strumienia masy ($w\rho$), co objawiało się zmianą temperatury czynnika i ścianki kanału. Każdorazowo rejestrowano również przejście fali temperaturowej z prędkością v_T .

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wartości prędkości fali ciśnieniowej v_p były różne w przypadku rozwoju i zaniku wrzenia (otwarcia i zamknięcia zaworu odcinającego). Tym samym wartościom sygnału zmiany ciśnienia Δp odpowiadały wyższe wartości v_p podczas rozwoju wrzenia w stosunku do przypadku zaniku wrzenia (rys. 5). Podstawową przyczyną takiego stanu są różne wartości stopnia wypełnienia czynnika chłodniczego φ w węźownicy rurowej. W przypadku rozwoju wrzenia sygnał zmiany ciśnienia Δp przemieszczał się wewnątrz węźownicy wypełnionej praktycznie parą nasyconą suchą czynnika chłodniczego (ewentualnie z niewielką domieszką kropeł cieczy – mgły; $\varphi \approx 0$), natomiast w. przypadku zaniku wrzenia sygnał zmiany ciśnienia

Δp przenoszony był w układzie dwufazowym o zmiennej zawartości cieczy na drodze od zaworu rozprężnego do końca wężownicy (stopień suchości $x \approx 0,15 \div 1$). Dane literaturowe potwierdzają silną zależność prędkości v_p od stopnia zapełnienia φ . W badanych przypadkach prędkości przejścia fali ciśnieniowej były ponad dwukrotnie wyższe dla rozwoju wrzenia w porównaniu z zanikiem wrzenia dla tych samych wielkości zmiany ciśnienia Δp . Powyższe warunki procesu wpływają na wielkość zastępczej liczby *Reynoldsa* Re i przebieg eksperymentalnej zależności opisującej rozwój i zanik wrzenia (3).

Literatura

1. **Badur J., Bilicki Z., Kwidziński R.:** *Operacyjna lepkość objętościowa w procesie transportu pędu ekspandującej wody i uderzeniowej kondensacji pary wodnej*. Zeszyty Naukowe IMP PAN, Gdańsk 479/1428/07.
2. **Bilicki Z.:** *Zjawiska falowe w przepływach dwufazowych*. Materiały XIII Krajowej Konferencji Mechaniki Płynów, Częstochowa, 21-26.09.1998, tom 3, 41-60, 1998.
3. **Bohdal T.:** *Investigation of boiling of refrigerating medium under conditions of impulse disturbances*. Int. J. Experimental Heat Transfer, vol. 17, no 2, 103-117, 2004.
4. **Bohdal T., Kuczyński W.:** *Investigation of boiling of refrigeration medium under periodic disturbance conditions*. Int. J. Experimental Heat Transfer, vol. 18, no 3, 135-151, 2005.
5. **Bohdal T.:** *Przyczyny niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych*. Monografia, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2007.
6. **Bohdal T.:** *Analiza niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych. Część I – ocena stanu wiedzy*. Rocznik Ochrona Środowiska. Tom 12, 2010.
7. **Kukielka L.:** *Podstawy Badań Inżynierskich*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2000.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

d	- średnica wewnętrzna kanału rurowego, [m],
Eu	- zastępcza liczba Eulera,
L	- długość kanału, [m],
p	- ciśnienie [Pa], [MPa],
Δp	- spadek ciśnienia [Pa], [MPa],

Re	- zastępcza liczba Reynoldsa,
t	- czas, [s],
T	- temperatura, [°C],
ΔT	- spadek temperatury [K],
v	- prędkość fali, [m/s],
w	- prędkość płynu, [m/s],
x	- stopień suchości,
$(w\rho)$	- gęstość strumienia masy, [kg/m ² s],
φ	- stopień zapełnienia,
η	- kinematyczny współczynnik lepkości, [m ² /s],
ρ	- gęstość, [kg/m ³],

Indeksy dotyczą:

Dolne

p	- ciśnienia,
T	- temperatury,

górne

$prim$	- fazy ciekłej,
bis	- fazy gazowej.

Analysis of Instability in Phase Transitions of Energy Media. Part II – Own Experiments

Abstract

Experimental tests were conducted of bubble boiling under the conditions of impulse disturbances. The chief goal of the examinations was the recognition, registration and description of those phenomena which occur in the unstable states of the system inside a coil pipe during boiling in the flow of the refrigerant. The experimental tests were carried out on two stages. On the first stage, the development was produced of the refrigerant's boiling in a coil pipe by opening the cut-off valve on the refrigerant's inlet to the coil pipe. The opening of the valve enabled the flow of the refrigerant through a thermostatic expansion valve (which feeds the coil pipe) and the commencement of boiling in the coil pipe. The boiling process commenced at the start of the coil pipe and displaced along its length until the desired vapour overheating was achieved on the outflow. The flow of the refrigerant in the coil pipe was preceded by the transition of the signal of an increased pressure in the form of a wave which was displacing with v_p velocity. Next, together with the transition of the front of the

boiling refrigerant (the boiling front) the temperature of the wall along the coil pipe decreased. Therefore, a transition of the temperature wave occurred but with v_T velocity.

On the second stage, a decay was produced of the boiling of the refrigerant in the coil pipe by means of closing of the cut-off valve on the inlet of the refrigerant to the coil pipe. During this process, a transition of the signal of a reduced pressure occurred as first, in the form of a wave with v_p velocity in the opposite direction to the flow of the agent. At the same time, a withdrawal was observed of the "boiling area" as a result of the compressor constantly sucking off the vapour of the refrigerant. Thus, the length of the "overheating area" increased. The wall temperature increased alongside with the decay of boiling, which was manifested in the transition of the wave temperature with v_T velocity.

The research results demonstrated that the processes of the development and decay of boiling in a coil pipe possess similar wave natures, while some of their physical quantities are different. The wave nature of the transfer of impulse disturbances in a diphase medium with a boiling refrigerant is to be considered as a joint feature. In each case when an impulse disturbance was produced (when the valve was being opened or closed), a transition of the pressure wave occurred with v_p velocity, and then the refrigerant flew with mass flux density ($w\rho$), which was manifested in a change of the temperature of the refrigerant and the channel wall. Also, the transition of the temperature wave with v_T velocity was registered each time, as well.

It was established on the basis of the research conducted that the velocity values of the pressure wave v_p were different in the case of the development and decay of boiling (opening and closing of the cut-off valve). Thus, higher values of v_p corresponded to the values of the pressure change signal Δp during the development of boiling in relation to the case of a decay of boiling (Fig. 5). The fundamental reason for this is different values of the void fraction φ of the refrigerant in the coil pipe. As concerns the development of boiling, the signal of pressure change Δp displaced inside the coil pipe which was filled practically with the dry saturated vapour of the refrigerant (possibly with a small admixture of liquid drops: fog $\varphi \approx 0$); at the same time, when boiling decayed, the signal of pressure change Δp was transferred in a diphase system with a variable liquid content on the way from the expansion valve to the end of the coil pipe (quality $x \approx 0.15 \div 1$). Data from the literature confirm a strong dependence of velocity v_p from the void fraction φ . In the cases under examination, the transition velocities of the pressure wave were over two times as high for the development of boiling in comparison with the decay of boiling for the same values of pressure change Δp . The process conditions mentioned above exert an influence on the value of the substitute *Reynold's* number Re and on the course of the experimental dependence which describes the development and decay of boiling (3).

