



## **Badanie niestabilności skraplania proekologicznego czynnika chłodniczego w minikanalach rurowych**

*Tadeusz Bohdal, Henryk Charun, Waldemar Kuczyński  
Politechnika Koszalińska*

### **1. Wstęp**

W warunkach rzeczywistych na pracę maszyn i urządzeń chłodniczych konwencjonalnych i kompaktowych (z wymiennikami o konstrukcji opartej na wykorzystaniu mini- lub mikrokanalów) mają wpływ zakłócenia wywoływane zarówno poprzez zewnętrzne jak i wewnętrzne oddziaływania. Powodują one zmianę stanu ustalonego. W takich przypadkach występuje dążenie układu do osiągnięcia nowego stanu równowagi stabilnej, który zastąpi stan poprzedni. Zjawiska takie występują bardzo często w praktyce eksploatacyjnej. Przyczyną zakłóceń może być np.: rozruch lub zatrzymanie instalacji, zmiana obciążenia cieplnego wymienników, otwarcie lub zamknięcie zaworów, praca elementów automatyki (szczególnie podczas regulacji dwupołożeniowej) itp. Osobny problem stanowią awarie maszyn i urządzeń, przerwy w dostawie energii napędowej, niedrożności przewodów lub ich uszkodzenie. W ośrodkach dwufazowych, gdzie występuje mieszanina cieczy i pary tego samego czynnika zjawisko dążenia układu do stanu równowagi trwałej może być bardziej złożone od tego, jakie zachodzi w ośrodku jednofazowym. Może

też uaktywnić się zjawisko „*histerezy nukleacji pęcherzyków parowych*” [5] towarzyszącej zjawisku zerowego kryzysu wrzenia [10]. Podobnie w procesie skraplania może wystąpić opóźnienie rozpoczęcia procesu przemiany fazowej, a w układzie pojawi się para przechłodzona czynnika roboczego [8, 9, 15, 16].

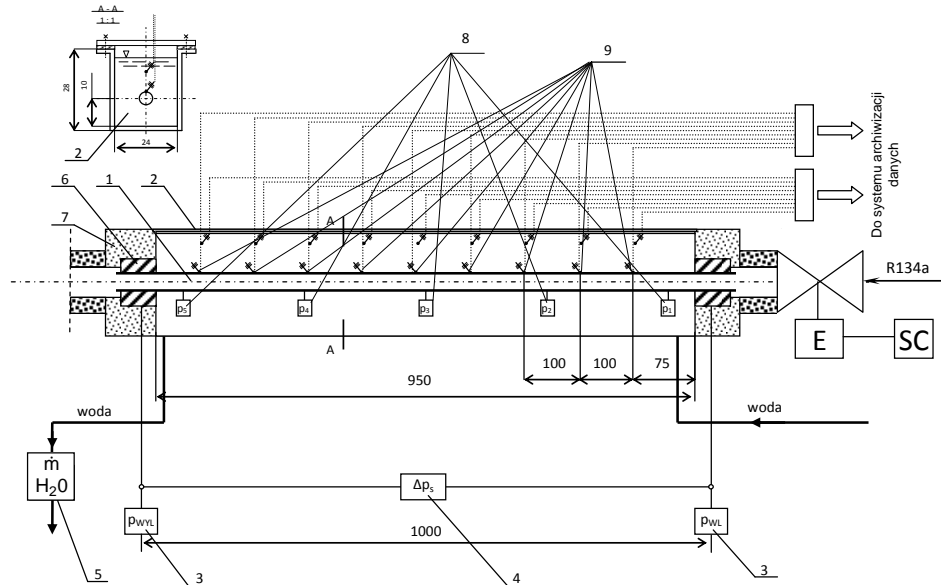
Badania prowadzone w ostatnich latach wykazują, że ośrodki dwufazowe charakteryzują własności falowe [2, 11÷13]. Sygnały wywołanych zakłóceń przemieszczają się w instalacjach energetycznych w postaci falowej z określoną prędkością. Można mówić o prędkości przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia  $v_p$ , o prędkości przemieszczania się sygnału zmiany temperatury ścianki kanału  $v_T$  czy o prędkości strumienia masy  $v_m$  [3, 4, 7]. Prędkości te mają różne wartości i zależą od parametrów ośrodka dwufazowego. Znajomość dynamiki zjawisk zachodzących w ośrodkach dwufazowych jest niezbędna w analizie pracy maszyn i urządzeń energetycznych, zwłaszcza w warunkach braku równowagi trwałej. Jest szczególnie istotna dla zapewnienia bezpiecznej i ciągłej pracy układów. Znajomość następnego stanu układu pozwala właściwie ocenić przyczyny i skutki awarii, zwiększyć stabilność pracy maszyn i urządzeń. Powyższe nabiera szczególnego znaczenia w przypadku miniukładów [1, 14]. Liczba opublikowanych prac dotyczących problemu niestabilności procesu skraplania w minikanalach jest wg aktualnego stanu wiedzy bardzo mała.

Celem niniejszych badań było rozpoznanie tego problemu i stwierdzenie, czy zjawiska rozprzestrzeniania się niestabilności w minikanalach podczas skraplania mogą być porównywalne do tych, które są znane dla kanałów konwencjonalnych. Należy wskazać, że w skraplaczu chłodniczym pracującym w warunkach eksploatacyjnych zaburzenia mogą być generowane *impulsowo* (skokowo) [5] lub *periodycznie* [6]. Przykładowo, skokowe zamknięcie lub otwarcie zaworu na zasilaniu wężownicy skraplacza wywołuje typowe *zaburzenia impulsowe*, które mogą wywołać niestabilności związane np. z rozwojem lub zanikiem skraplania czynnika chłodniczego. W dalszej części opracowania przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu *zaburzeń generowanych periodycznie* na proces skraplania czynnika chłodniczego w minikanalach rurowych skraplaczy kompaktowych.

## 2. Stanowisko badawcze i ogólna metodyka pomiarów

Do wykonania badań eksperymentalnych zaprojektowano stanowisko badawcze, w tym specjalny układ zawierający oprzyrządowany odcinek pomiarowy. Schemat ideowy odcinka przedstawiono na rys. 1. Do odcinka pomiarowego doprowadzano czynnik chłodniczy R404A z agregatu sprężarkowego. Do badań eksperymentalnych wykorzystano minikanaly rurowe o średnicy wewnętrznej,  $d_w = 0,64; 0,90; 1,40; 1,44; 1,92, 2,30$  i  $3,30$  mm oraz długości całkowitej  $L = 950$  mm wykonane ze stali nierdzewnej. Na podstawie pomiarów określono prędkości przemieszczania się zaburzeń, co pozwoliło na przedstawienie oceny wpływu parametrów ośrodka generującego zaburzenia periodyczne na proces skraplania w minikanalach rurowych.

Czynnik chłodniczy R404A skraplał się w przepływie przez odcinek minikanalu. Na zasilaniu odcinka pomiarowego zamontowano zawór elektromagnetyczny włączany lub wyłączany za pomocą sterownika firmy *Siemens* typu *Logo 230R*. Istniała możliwość programowanego generowania zakłóceń zewnętrznych, periodycznych polegających na okresowym otwieraniu i zamykaniu tego zaworu. Zakłócenia periodyczne trwały tak długo, aż uzyskiwano spadek wartości masowego natężenia przepływu czynnika chłodniczego do wartości końcowej równej zero. Na stanowisku badawczym mierzono temperaturę (za pomocą uprzednio przecechowanych czujników termoelektrycznych typu *K* o średnicy termoelektrod  $0,2$  mm) oraz ciśnienie (za pomocą czujników piezorezystancyjnych z przetwornikami) w przekrojach minikanalu, usytuowanych w równych odległościach od siebie. Mierząc czas przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia i temperatury określano wielkości:  $v_p$  – prędkość przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia (tzw. *prędkość fali ciśnieniowej*) oraz  $v_T$  – prędkość fali temperaturowej (tzw. *prędkość frontu skraplania*). Przeprowadzona ewaluacja błędów pomiarowych i obliczeniowych pozwoliła stwierdzić, że wartości  $v_p$  i  $v_T$  wyznaczono z dokładnością  $\pm 6\%$ . Okazało się, że wielkości te były zależne od częstotliwości  $f$  generowania zakłóceń periodycznych, zdefiniowanej odwrotnością sumy czasu zamknięcia i otwarcia zaworu zasilającego odcinek pomiarowy.



**Rys. 1.** Schemat sekcji pomiarowej: 1 – odcinek pomiarowy (minikanał), 2 – kanał pomiarowy chłodzony wodą, 3 – czujniki ciśnienia typu Cerabar T PMP 131 do pomiaru ciśnienia  $p_{wl}$  – wlotowego,  $p_{wyl}$  – wylotowego, 4 – miernik różnicy ciśnienia typu Deltabar S PMD75, 5 – przepływomierz wody chłodzącej, 6 – zamocowanie odcinka pomiarowego (minikanалу), 7 – izolacja miejsca zamocowania minikanалу z instalacją chłodniczą, 8 – zestaw czujników ciśnienia typu Cerabar T PMP 131 zainstalowanych na odcinku pomiarowym, 9 – zestaw czujników do pomiaru temperatury (termopary typu K) zainstalowanych na odcinku pomiarowym, E – elektromagnetyczny zawór odcinający, SC – sterownik czasowy Siemens typu LOGO 230R

**Fig. 1.** Diagram of measuring section: 1 – measuring section (minichannel), 2 – measuring channel cooled with water, 3 – pressure sensors of type Cerabar T PMP 131 for pressure measuring:  $p_{wl}$  – inlet pressure,  $p_{wyl}$  – outlet pressure, 4 – measuring instrument of pressure difference of type Deltabar S PMD75, 5 – cooling water flowmeter, 6 – mounting of measuring section (i.e. minichannel), 7 – isolation of the mounting location of the minichannel on the refrigerating installation, 8 – set of pressure sensors of type Cerabar T PMP 131 that are installed on measuring section, 9 – set of temperature measuring sensors (thermocouples type K) that are installed on measuring section, E – electromagnetic cut-off valve, SC – Siemens time controller of type LOGO 230R

W programie pomiarów założono ten sam czas otwarcia i zamknięcia zaworu zasilającego. W stanie początkowym zawór był otwarty przez 0,1 s i zamknięty również 0,1 s. W kolejnych seriach pomiarowych stosowano stały przyrost czasu otwarcia i zamknięcia zaworu równy odpowiednio: 0,05 s (uzyskano czasookresy otwarcia i zamknięcia zaworu: 0,15/0,15s, 0,20/0,20 s itd.). Czas trwania serii pomiarowej wynosił 90 s.

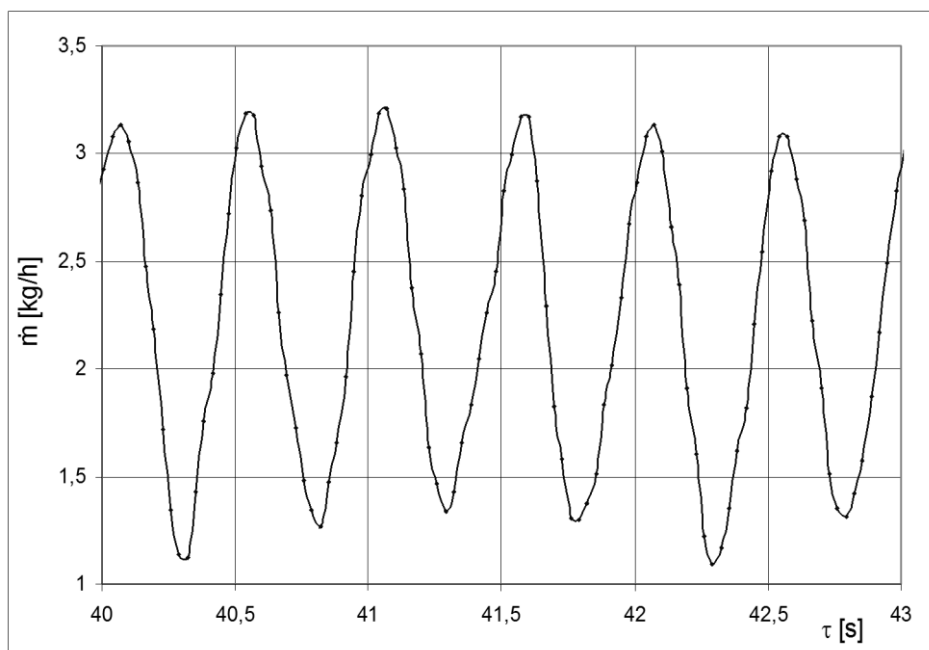
### 3. Wyniki badań eksperymentalnych

Zakłócenia zewnętrzne o charakterze periodycznym przenoszone na proces skraplania czynnika chłodniczego R404A w minikanale rurowym powstawały w wyniku oddziaływania zaworu odcinającego  $E$  na przepływ czynnika chłodniczego. Następstwem tych zaburzeń była pulsacja masowego natężenia przepływu oraz wynikające stąd pulsacje ciśnienia nasycenia  $p_s$  i temperatury ścianki badanego kanału  $T_w$ . Na podstawie protokołów badań eksperymentalnych sporządzono charakterystyki zmiany parametrów procesu skraplania wywołane zaburzeniami periodycznymi. Przykładowe charakterystyki pokazano na rys. 2÷4.

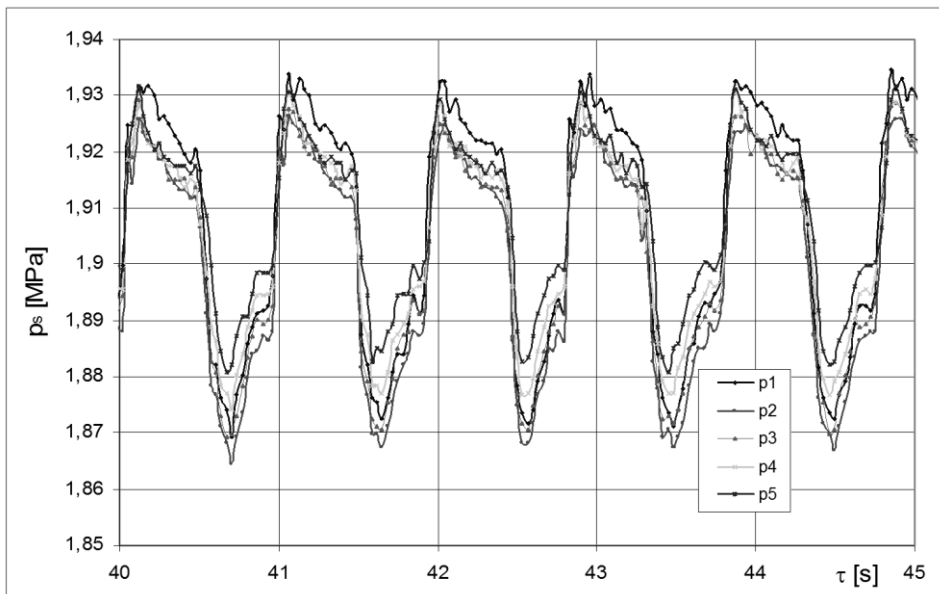
### 4. Analiza wyników badań eksperymentalnych

Analiza wyników badań eksperymentalnych wykazała, że generowane zaburzenia o charakterze periodycznym wywierają znaczący wpływ na zmianę ciśnienia czynnika chłodniczego skraplającego się podczas przepływu w minikanale rurowym. Zaobserwowano opóźnienie w rejestracji wartości ciśnienia czynnika  $p_s$  przez czujniki pomiarowe wzdłuż drogi na odcinku pomiarowym. Świadczy to o skończonej wartości prędkości, z jaką przemieszcza się sygnał zmiany ciśnienia po otwarciu lub zamknięciu zaworu odcinającego. Potwierdzono przy tym, występującą również w kanałach konwencjonalnych, zależność prędkości rozprzestrzeniania się od ich częstotliwości. Na rys. 5 przedstawiono eksperymentalnie określoną zależność prędkości zmiany ciśnienia  $v_p$  od częstotliwości  $f$  zaburzeń generowanych w badanych minikanalach.

Przebieg charakterystyki  $v_T = F(f)$  w zależności od średnicy minikanalów podano na rys. 6. Rys. 7 prezentuje zależność prędkości frontu skraplania  $v_T$  od prędkości  $v_p$  przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia w minikanalach.

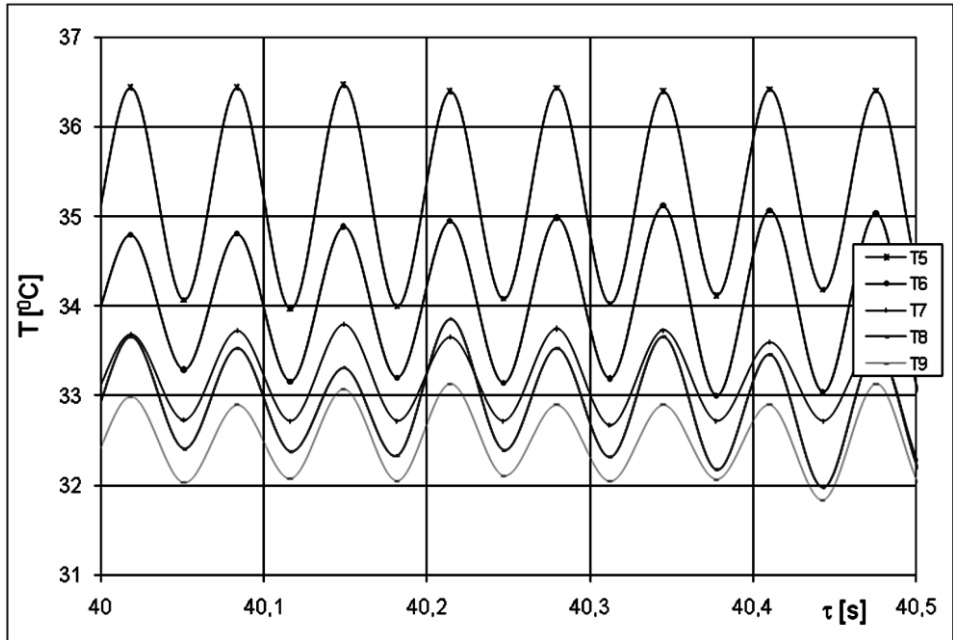


**Rys. 2.** Wyniki badań eksperymentalnych zmiany masowego natężenia przepływu  $\dot{m}$  czynnika chłodniczego R404A w minikanale rurowym o średnicy wewnętrznej  $d_w = 1,44$  mm wywołane niestabilnościami periodycznymi,  $f = 2$  Hz  
**Fig. 2.** Results of the experimental investigations of mass flow rate  $\dot{m}$  of R404A refrigerant in pipe minichannel with internal diameter  $d_w = 1.44$  mm,  $f = 2$  Hz



**Rys. 3.** Wyniki badań eksperymentalnych zmiany ciśnienia  $p_s$  czynnika chłodniczego R404A w minikanale rurowym o średnicy wewnętrznej  $d_w = 1,44$  mm podczas niestabilności periodycznych,  $f = 1$  Hz

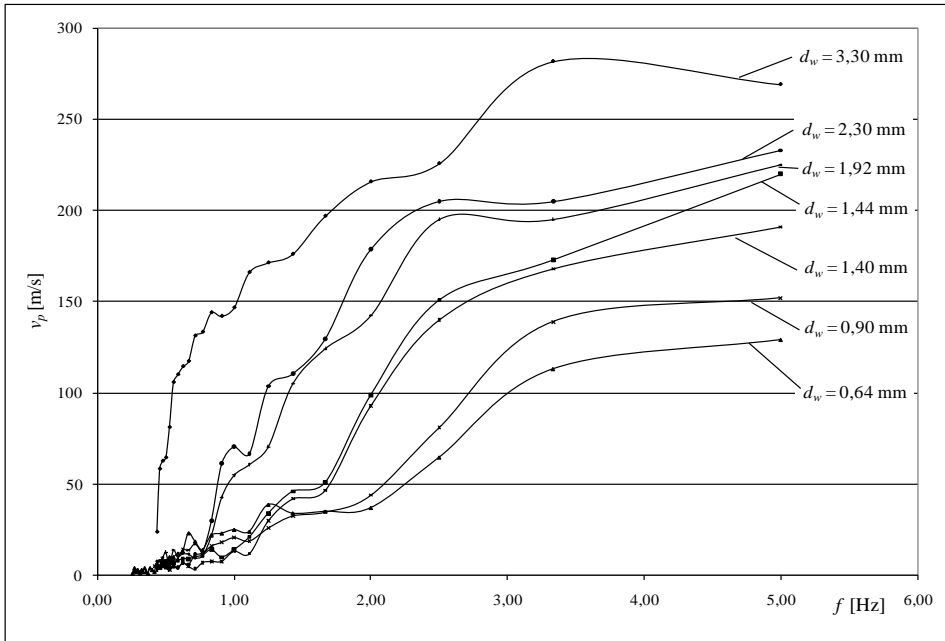
**Fig. 3.** Results of the experimental investigations of pressure change  $p_s$  of R404A refrigerant in pipe minichannel with internal diameter  $d_w = 1.44$  mm,  $f = 1$  Hz



**Rys. 4.** Wyniki badań eksperymentalnych zmiany temperatury  $T_w$  czynnika chłodniczego R404A w minikanale rurowym o średnicy wewnętrznej  $d_w = 1,44$  mm podczas niestabilności periodycznych,  $f = 5$  Hz

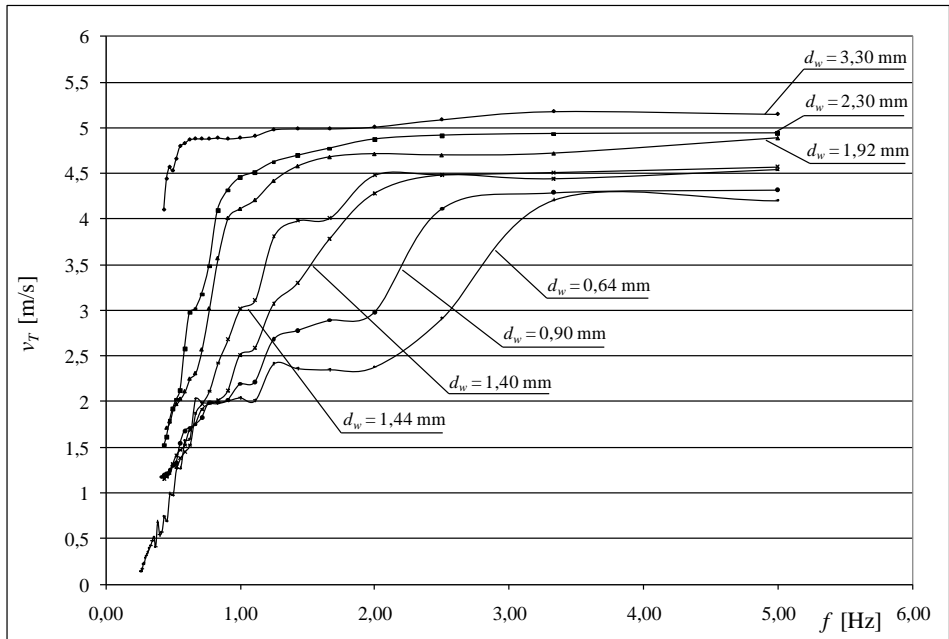
**Fig. 4.** Results of the experimental investigations of the change of temperature  $T_s$  of R404A refrigerant in pipe minichannel with internal diameter  $d_w = 1.44$  mm,  $f = 5$  Hz





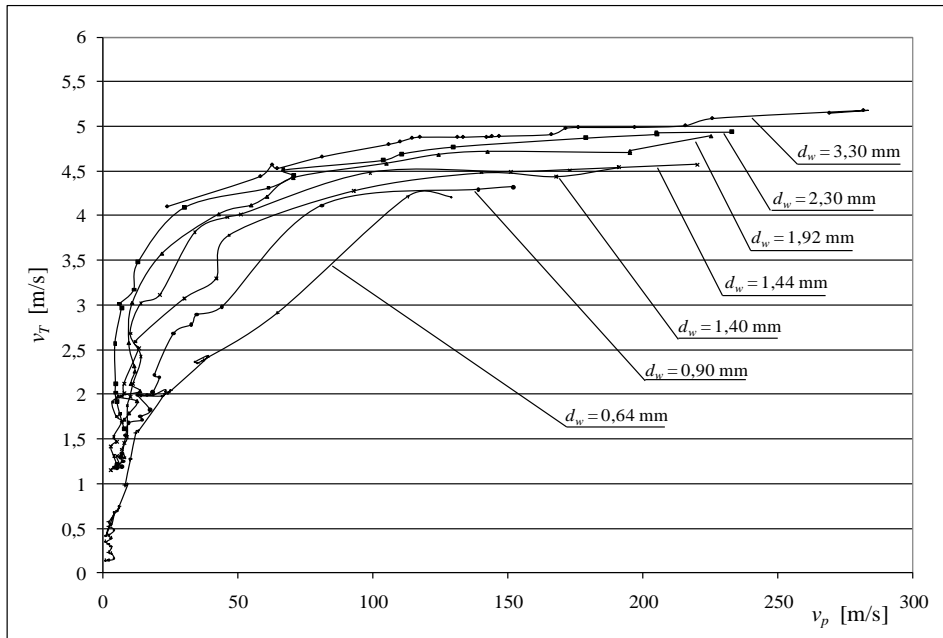
**Rys. 5.** Eksperymentalnie określona zależność prędkości  $v_p$  przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia od częstotliwości  $f$  zakłóceń generowanych periodycznie podczas skraplania czynnika R404A w badanych minikanalach rurowych o średnicy wewnętrznej:  $d_w = 3,30$  mm, 1,44 mm i 0,64 mm

**Fig. 5.** Experimentally determined dependence of velocity  $v_p$  of the displacement of pressure change on frequency  $f$  of periodically generated disturbances during the condensation of R404A refrigerants in pipe minichannels under investigation



**Rys. 6.** Charakterystyka  $v_T = F(f)$  w zależności od średnicy wewnętrznej minikanalu rurowego

**Fig. 6.** Characteristics of  $v_T = F(f)$  depending on the internal diameter of pipe minichannel

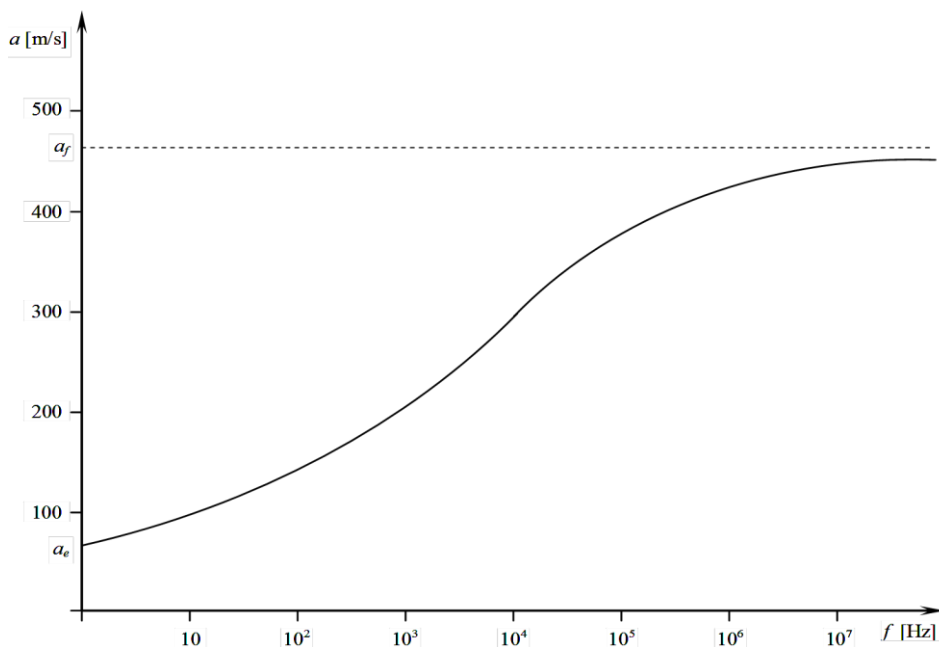


**Rys. 7.** Eksperymentalna zależność prędkości frontu skraplania  $v_T$  od prędkości  $v_p$  fali ciśnieniowej; czynnik R404A,  $d_w = 0,64$  mm

**Fig. 7.** Experimental dependence of the velocity of condensation front  $v_T$  on the velocity  $v_p$  of pressure wave; R404A refrigerant,  $d_w = 0.64$  mm

Analiza wyników badań wykazała zgodność charakteru rozkładu prędkości rozchodzenia się zaburzeń ciśnieniowych  $v_p = F(f)$  w minikanalach, w porównaniu do charakterystyk tego rozkładu uzyskiwanych w kanałach konwencjonalnych. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że występuje jednak zasadnicza różnica o charakterze ilościowym między kanałami konwencjonalnymi i minikanalami. Prędkości graniczne rozprzestrzeniania się zakłóceń w minikanalach uzyskuje się przy znacznie niższych częstotliwościach rzędu  $0,26 \div 5$  Hz, co ilustruje charakterystyka pokazana na rys. 8).

Badania eksperymentalne wykazały związek pomiędzy prędkością rozchodzenia się zaburzeń ciśnieniowych  $v_p$  a wartością średnicy wewnętrznej  $d_w$  minikanalu rurowego. Wraz ze spadkiem średnicy wewnętrznej  $d_w$  następuje zmniejszenie prędkości rozprzestrzeniania się zakłóceń w układzie dwufazowym skraplania czynnika chłodniczego R404A.



**Rys. 8.** Zależność prędkości przemieszczania się zaburzeń ciśnienia od częstotliwości  $f$  w kanałach konwencjonalnych

**Fig. 8.** Dependence of the displacement velocity of pressure disturbances on frequency  $f$  in conventional channels

W podsumowaniu efektów uzyskanych w realizacji badań niestabilności generowanych periodycznie podczas skraplania czynnika chłodniczego R404A w minikanalach stwierdzono, że:

- badania potwierdziły, że przemieszczanie się zaburzeń podczas skraplania czynnika chłodniczego R404A w minikanalach rurowych o średnicach wewnętrznych  $d_w = 0,64; 0,90; 1,40; 1,44; 1,92; 2,30$  i  $3,30$  mm można opisać, podobnie jak dla kanałów konwencjonalnych, za pomocą tzw. prędkości  $v_p$  przemieszczania się fali ciśnieniowej,
- zakłócenia generowane periodycznie wywołują pulsację masywnego natężenia przepływu czynnika chłodniczego R404A, ciśnienia  $p_s$  oraz temperatury ścianki  $T_w$  badanego mini kanału,
- prędkość  $v_p$  zależy od częstotliwości  $f$  zaburzeń generowanych periodycznie,

- zaobserwowano, że wartości prędkości  $v_p$  fali ciśnieniowej występujące podczas skraplania w minikanalach mają podobny charakter rozkładu do tego, który występuje w kanałach konwencjonalnych,
- w odróżnieniu od kanałów konwencjonalnych, wartość prędkości granicznej rozprzestrzeniania zakłóceń ciśnieniowych  $v_p$  uzyskiwana w minikanalach przy znacznie niższych częstotliwościach  $f$  ich generowania,
- ze spadkiem średnicy wewnętrznej  $d_w$  minikanalu następuje zmniejszenie prędkości rozprzestrzeniania się zakłóceń ciśnieniowych  $v_p$ .

*Pracę wykonano w ramach projektu badawczego  
MNiSW nr N N 512 459536*

## Literatura

1. **Agarwal A., Bandhauer T.M., Garimella S.:** *Measurement and modeling of condensation heat transfer in non-circular microchannels*. Int. Journal of Refrigeration. pp. 1÷11. 2010.
2. **Bilicki Z., Kardaś D., Michaelides E.E.:** *Relaxation models for wave phenomena in liquid – vapour bubble flow in channels*, J. Fluids Engineering, No. 120, pp. 369÷377. 1998.
3. **Bohdal T., Łomiak M.:** *Condensation of refrigeration medium under condition of unit disturbances*. An International Journal of Turbulence, Volume 11, pp. 221÷224. 2005.
4. **Bohdal T.:** *Investigation of boiling of refrigerating medium under conditions of impulse disturbances*. An International Journal of Experimental Heat Transfer, Volume 17, No 2, pp. 103÷117. 2004.
5. **Bohdal T.:** *Development of bubbly boiling in refrigeration heat exchangers*. An International Journal of Heat Exchangers, No 1, Volume V, pp. 179÷199. 2004.
6. **Bohdal T., Kuczyński W.:** *Investigation of boiling of refrigeration medium under periodic disturbance conditions*. An International Journal of Experimental Heat Transfer, Volume 18, No 3, pp. 135÷151. 2005.
7. **Bohdal T., Łomiak M.:** *Condensation of refrigeration medium under external disturbances*. JP Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 2, Issue 3 pp. 303÷328. 2008.
8. **Coleman J.W., Garimella S.:** *Two-phase flow regimes in round square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a*. Int. Journal of Refrigeration. Vol. 26, no 1, s. 117÷128. 2003.

9. **Dobson M.K., Chato J.C.:** *Condensation in smooth horizontal tubes*. I. Heat Transfer ASME. Vol. 120, pp. 193÷213. 1998.
10. **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.
11. **Nigmatulin R.I.:** *Dynamics of multiphase media*. Hemisphere. New York 1990.
12. **Nosoko T., Yoshimura P.N., Nagata T., Oyakawa K.:** *Characteristics of two-dimensional waves on a falling liquid film*. Chem. Eng. Sci. Vol. 51 (5), pp. 725÷732. 1996.
13. **Park S.K., Kim M.H., Yoo K.J.:** *Condensation of pure steam and steam-air mixture with surface waves of condensate film on a vertical wall*. Int. J. Multiphase Flow. Vol. 22, No 5, pp. 893÷908. 1996.
14. **Su Q., Yu G.X., Wang H.S., Rose J.W.:** *Microchannel condensation: Correlations and theory*. Int. Journal of Refrigeration. 2009.
15. **Tandon T.N.:** *Heat transfer during forced convection condensation inside horizontal tube*. Int. J. of Refrigeration. Vol. 18, no. 3, pp. 156÷162. 1995.
16. **Webb R.L., Ermis K.:** *Effect of hydraulic diameter on condensation of R134a in flat extruded aluminum tubes*. J. Enhanced Heat Transfer. Vol. 8(2), s. 77÷90. 2001.

## **Investigation of the Instability of the Condensation of Environmentally Friendly Refrigerant in Pipe Minichannels**

### **Abstract**

Under real conditions, the work of conventional and compact refrigerating machines and devices (with exchangers which construction is based on the use of minichannels or microchannels) is subject to a lot of disturbances which are the result of both external and internal impacts. Such phenomena occur very frequently in the operational practice. The cause of disturbances may be the start-up or the stoppage of the installation, a change of the heat load of the exchangers, opening or closing of the valves, the work of automatic control elements etc. Considering the above, investigations on the condensation of the refrigerant in the flow in pipe minichannels in the conditions of external disturbances were conducted. The development or decay of condensation was produced through a unitary change of the parameters of the two-phase system, e.g.

---

the pressure and the mass flux density in the pipe channel. It was confirmed that two-phase media exhibit wave properties, while the disturbances produced displaced with a finite velocity. It was demonstrated that in contrast with conventional channels, the value of the boundary velocity of the displacement of pressure disturbances is obtained in minichannels with substantially lower frequencies of their generation. Investigations were conducted with the use of a compressor refrigerating cycle with the environmentally friendly R404A refrigerant.

