

**Tadeusz BOHDAL**KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I CHŁODNICTWA, POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA  
Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin**Wyznaczanie prędkości przemieszczania się zaburzeń w skraplającym się czynniku chłodniczym**

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. Główne zainteresowania naukowe to wymiana ciepła i pędu podczas przemian fazowych czynników chłodniczych oraz niestabilności im towarzyszące.



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

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań prędkości przemieszczania się zaburzeń w dwufazowym czynniku chłodniczym. Podczas badań na stanowisku pomiarowym w skraplającym się czynniku chłodniczym R404A wywoływano skokową zmianę ciśnienia. Wprowadzone zaburzenie przemieszczało się ze skończoną prędkością, zależną od parametrów ośrodka, a głównie od wartości stopniaapełnienia. Uzyskane wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń według zależności innych autorów.

**Słowa kluczowe:** chłodnictwo, skraplanie, ośrodki dwufazowe, zjawiska falowe, niestabilności.

**Determination of propagation velocity of disturbances in condensing refrigerant****Abstract**

A theoretical and experimental analysis of disturbances propagation and determination of propagation velocity in a two-phase refrigerant was made. During investigations at an experimental facility, a step change of the pressure in a refrigerant R404A flow was induced. The introduced disturbance propagated with a finite velocity depending on the parameters of the medium and on the void fraction especially. The obtained experimental data were compared with the results of calculations based on formulas proposed by other authors.

**Keywords:** refrigeration, condensation, two-phase systems, wave phenomena, instabilities.

**1. Wstęp**

Układ dwufazowy ciecz - gaz, jedno- lub wieloskładnikowy jest zbiorem cząstek substancji o dwóch stanach skupienia, oddzielonych od siebie powierzchnią międzyfazową. Od wewnętrznej struktury układu zależy wzajemne oddziaływanie poszczególnych faz, jak również prędkość przemieszczania się zaburzenia wywołanego przyczyną zewnętrzną lub wewnętrzną. Widać to wyraźnie na przykładzie rozchodzenia się fali dźwiękowej w adiabatycznym układzie dwufazowym. Prędkość fali dźwiękowej zależy przede wszystkim od wartości stopniaapełnienia  $\varphi$  i od ciśnienia mieszaniny dwufazowej. Z analizy danych literaturowych wynika, że ze wzrostem ciśnienia wzrasta prędkość dźwięku w mieszaninie dwufazowej. Tendencja taka występuje jednak do określonej wartości ciśnienia (zależnie od stopniaapełnienia) a następnie, przy odpowiednio wysokich ciśnieniach jest prawie stała i wynosi około 1300 m/s [5].

Podczas rozchodzenia się fali zaburzeń w mieszaninie dwufazowej jednoskładnikowej o parametrach termicznych określonych dla stanów na linii nasycenia, propagacja fali zaburzeń powoduje periodyczną zmianę lokalnych wartości ciśnienia, co z kolei wywołuje ciągły proces przemian fazowych. Na granicy faz następuje lokalnie, przy wzroście ciśnienia, proces kondensacji, zaś przy

obniżeniu ciśnienia proces parowania. Ulegają zmianie lokalne wartości parametrów układu dwufazowego: ciśnienie nasycenia  $p_s$ , temperatura nasycenia  $T_s$ , gęstość  $\rho$ , stopień suchości  $x$ , stopieńapełnienia  $\varphi$  itp. Zjawiska te wywołują „efekt tłumienia” związany z dyssypacją energii oraz zmianą prędkości rozchodzenia się zaburzeń [1, 5, 7].

W dwufazowym układzie w stanie nierównowagowym ma miejsce ewolucja sygnału zaburzeń. Przepływ dwufazowy posiada również dyspersyjne własności falowe, które objawiają się tym, że prędkość rozchodzenia się małych zaburzeń zależy od ich częstotliwości [2, 4]. Eksperymentalne badania przeprowadzone dla przepływów dwufazowych jednoskładnikowych i dwuskładnikowych wykazały, że możliwe są przepływy dwufazowe podkrytyczne w dyszach de Laval, występujące przy wartościach stosunku ciśnień: na wlocie do dyszy i do ciśnienia stacjonarnego około 0,2 i niżej. Należy podkreślić, że dokładne poznanie mechanizmu przemieszczania się zaburzeń w ośrodku dwufazowym jest bardzo istotne ze względu na zapewnienie stabilnej pracy maszyn i urządzeń. Określenie wartości prędkości rozchodzenia się tych zaburzeń odgrywa decydującą rolę w opisie pracy instalacji cieplnych i chłodniczych w warunkach regulacji automatycznej, w zapobieganiu awariom oraz minimalizowaniu skutków ich wystąpienia [3, 5, 7].

**2. Przemieszczenie się zaburzeń w ośrodku dwufazowym**

Prędkość rozchodzenia się zaburzeń w ośrodku dwufazowym zależy od własności fizycznych mieszaniny, wzajemnego udziału fazy ciekłej i gazowej (opisanego stopniemapełnienia  $\varphi$ ) oraz od rodzaju struktury, co ma szczególne znaczenie podczas przepływu w kanałach. Wywołane zaburzenie generowane zmianą ciśnienia przemieszcza się wewnątrz ośrodka dwufazowego w postaci fali ciśnieniowej, której towarzyszy fala zmiany stopniaapełnienia i fala temperaturowa [2, 5]. Może występować także zmiana gęstości strumienia masy w kanale. Zaburzenia tego typu rozchodzą się ze skończoną prędkością, przy czym prędkość fali ciśnieniowej jest równa prędkości dźwięku w ośrodku dwufazowym; o określonych własnościach. Prędkość dźwięku w dyspersyjnym przepływie płynu można określić na podstawie zależności uzyskanych w wyniku rozwiązania przyjętego modelu teoretycznego. Dla modelu jednofazowego, zakładającego przepływ homogeniczny mieszaniny może być stosowana zależność Woods'a [5] w postaci:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varphi \cdot \rho^{*1} + (1 - \varphi) \cdot \rho^*}} \cdot \sqrt{\frac{\varphi}{\rho^{*1} \cdot c^{*12}} + \frac{1 - \varphi}{\rho^* \cdot c^{*2}}}, \quad (1)$$

W przypadku modelu dwupłynowego obowiązuje zależność wyznaczona przez Nguyens'a [6]:

$$c = \frac{1}{\varphi \sqrt{\rho^{*1} + (1 - \varphi) \rho^*}} \cdot \sqrt{\frac{\varphi}{\rho^{*1} \cdot c^{*12}} + \frac{1 - \varphi}{\rho^* \cdot c^{*2}}}, \quad (2)$$

gdzie  $c$  jest prędkością dźwięku w ośrodku dwufazowym określoną przy założeniu przepływu homogenicznego mieszaniny.

W pracy [3] przedstawiono wynik badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych rozchodzenia się zaburzeń w kanale rurowym.

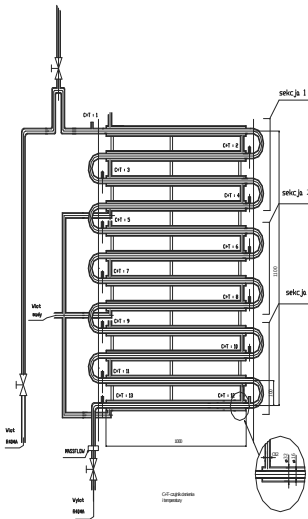
wym w postaci fali ciśnieniowej i fali zmiany stopnia zapełnienia. Badania przeprowadzono dla przepływu mieszaniny wody i powietrza przy temperaturze otoczenia w kanale rurowym o długości  $L = 30$  m i średnicy wewnętrznej  $d = 60$  mm. Wartość ciśnienia  $p$  i stopnia zapełnienia  $\phi$  mierzono w trzech przekrojach na długości kanału. Za pomocą rury uderzeniowej wytwarzano impuls ciśnienia, który przemieszczał się wzdłuż kanału pomiarowego. Pomiaru prowadzono dla różnych struktur przepływu dwufazowego (pierścieniowy, rozwarstwiony, korkowy, kropłowy i pęcherzykowy). Stwierdzono, że zmiana stopnia zapełnienia w czasie jest wynikiem różnej prędkości fali ciśnienia w fazie ciekłej i gazowej. Powoduje to powstawanie dodatkowych efektów falowych na powierzchni rozdziału faz, wynikających z występujących tam naprężeń. Prowadzi to lokalnie do powstawania „korków pary” lub zmniejszenia udziału fazy gazowej w przepływającej cieczy. Zjawisko to jest szczególnie zauważalne dla przepływu rozwarstwowanego. W tym przypadku fala ciśnienia występująca w fazie gazowej (w górnej części kanału poziomego) przemieszcza się znacznie szybciej, niż w mieszaninie dwufazowej (w dolnej części kanału). W pracy [3] podano zestawienie zbiorcze wyników obliczeń teoretycznych (wg zależności 1 i 2) oraz badań eksperymentalnych autorów, w postaci zależności prędkości przemieszczania się impulsu ciśnienia  $v_p$  od stopnia zapełnienia  $\phi$  i rodzaju przepływu dwufazowego. Istotny wpływ na prędkość  $v_p$  wywiera stopień zapełnienia  $\phi$ . W mniejszym stopniu zależy ona od rodzaju przepływu. Uzyskane wyniki wskazują również, że występują stosunkowo duże rozbieżności pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych i obliczeń teoretycznych. W przypadku zastosowania modelu homogenicznego (1) rozbieżności dochodzą do 100%. Lepszą zgodność wyników badań i obliczeń uzyskuje się w przypadku zastosowania modelu dwupłynowego (2), gdzie różnice są znacznie mniejsze (około 30%), chociaż niekiedy dochodzą do 50%.

### 3. Stanowisko do badań eksperymentalnych

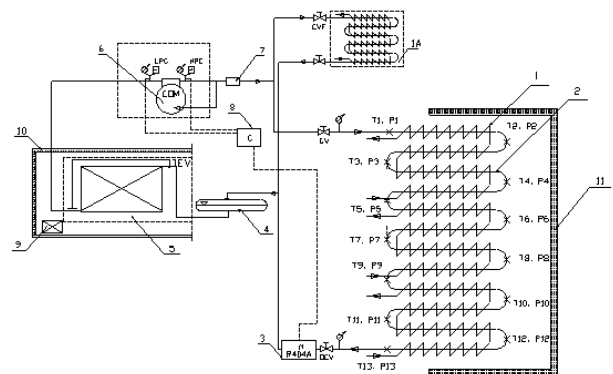
Badania eksperymentalne procesu skraplania zrealizowano wykorzystując specjalnie do tego celu zaprojektowany i wykonany skraplacz modelowy (rys. 1). Był on zbudowany w postaci sekcji wymienników ciepła typu „rura w rurze” o wymiarach rury zewnętrznej  $\phi 35/31$  mm i wewnętrznej  $\phi 15/13$  mm. Odcinki poziomych rur prostych o długości 1000 mm połączono za pomocą kolanków rurowych, co w przypadku przepływu czynnika chłodniczego tworzyło węzownię rurową, typową dla skraplaczy stosowanych w chłodnictwie. Para czynnika chłodniczego skraplała się w przepływie wewnątrz rury miedzianej o średnicy wewnętrznej  $\phi 13$  mm, wskutek chłodzenia wodą przepływającą w przestrzeni międzyrurowej. Rury skraplacza zaizolowano od zewnątrz warstwą otuliny poliuretanowej. Konstrukcja skraplacza pozwalała na wykonanie bilansów energetycznych cząstkowych, obejmujących poszczególne odcinki rur prostych poziomych oraz na długości węzownicy rurowej, powstałej przez połączenie tych odcinków za pomocą kolanków rurowych. Pozwalało to na identyfikację procesu wymiany ciepła na długości węzownicy rurowej, w tym na określenie stref schładzania pary przegrzanej, skraplania właściwego i dochłodzenia kondensatu oraz określenie średnich i lokalnych wartości współczynnika przejmowania ciepła, zwłaszcza dla strefy skraplania właściwego [4, 8].

Badaniom przeprowadzono wykorzystując skraplacz w postaci modelowego wymiennika ciepła, który składał się z rur prostych poziomych, połączonych kolankami w węzownię rurową. Długość węzownicy wynosiła  $L = 15$  m a średnica wewnętrzna  $d = 13$  mm. Przedmiotowy wymiennik włączono do instalacji chłodniczej sprężarkowej, jednostopniowej wypełnionej czynnikiem R404A (rys. 3). Zmianę obciążenia cieplnego skraplacza uzyskiwano wprowadzając zmiany obciążenia w izolowanej komorze chłodniczej 10, w której umieszczono również wentylatorową chłodnicę powietrza (z oprzyrządowaniem) i dodatkowe elementy grzewcze. Para czynnika chłodniczego zasysana była przez sprężarkę i kierowana, po sprężeniu, do skraplacza oraz dalej do

zbiornika cieczy 4. W celu przeprowadzenia pomiarów parametrów czynników chłodniczego i chłodzącego, układ został odpowiednio oprzyrządowany. Pomiar temperatury wykonano za pomocą czujników termoelektrycznych typu  $K$  o średnicy termoelektrod  $\phi 0,2$  mm. Do pomiaru ciśnienia zastosowano czujniki tensometryczne i piezometryczne oraz kontrolne manometry sprężynowe klasy 0,1.



Rys. 1. Schemat ideowy modelowego skraplacza  
Fig. 1. Schematic diagram of the model condenser



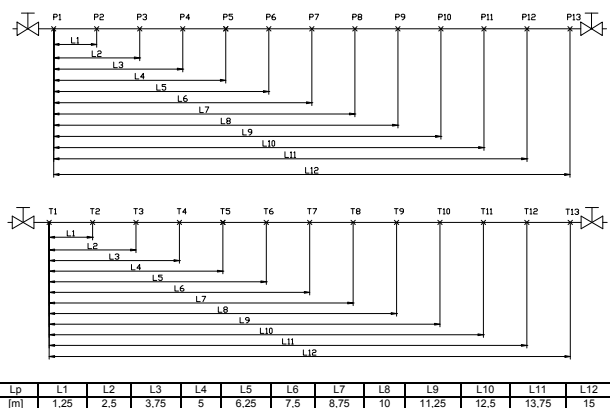
Rys. 2. Schemat ideowy stanowiska badawczego:  
1 – skraplacz modelowy, 1A – skraplacz dodatkowy, 2 – kolanko rurowe, 3 – pomiar natężenia przepływu czynnika chłodniczego, 4 – zbiornik cieczy R404A, 5 – wentylatorowa chłodnica powietrza, 6 – (COM) agregat sprężarkowy typu 4P-10.2Y firmy Bitzer, 7 – odolejacz, 8 – komputerowy układ akwizycji danych, 9 – element systemu regulacji obciążenia cieplnego w komorze, 10 – izolowana komora chłodnicza, 11 – osłona pomieszczenia pomiarowego skraplacza,  $T, P$  – układy czujników do pomiaru temperatury i ciśnienia w wybranych węzłach układu czynnika i wody,  $HPC$  – presostat wysokiego ciśnienia,  $LPC$  – presostat niskiego ciśnienia,  $TEV$  – termostaticzny zawór rozprężny,  $CV$  – zawór regulacyjny pomiarowy,  $CVF$  – zawór regulacyjny zasilający skraplacz dodatkowy,  $OCV$  – zawór regulacyjny wypływuwy  
Fig. 2. Schematic diagram of the experimental facility:  
1 – condenser section, 1A – additional condenser, 2 – tubular elbow, 3 – refrigerant mass flow measurement unit, 4 – R404A liquid vessel, 5 – air fan cooler, 6 – (COM) compressor unit of type 4P-10.2Y produced by Bitzer, 7 – oil separator, 8 – data acquisition computer system, 9 – element of the heat load control system in the refrigeration chamber, 10 – isolated refrigeration chamber, 11 – measurement section shield,  $T, P$  – sets of sensors for temperature and pressure measurements in selected nodes of the refrigerant and water system,  $HPS$  – high pressure control system,  $LPS$  – low pressure control system,  $TEV$  – thermostatic expansion valve,  $CV$  – measuring control valve,  $CVF$  – control valve powered additional condenser,  $OCV$  – outflow valve

Przed zamontowaniem przecechowano wszystkie czujniki pomiarowe temperatury i ciśnienia, sporządzając ich indywidualne charakterystyki. Zastosowano komputerowe karty pomiarowe,

włączone do systemu akwizycji danych 8. Do systemu włączono również elektroniczny przepływomierz czynnika chłodniczego typu *Massflo* firmy *Danfoss*. Masowe natężenie przepływu wody mierzono również przepływomierzem elektronicznym, zaś poziom regulacji przepływu ustalano za pomocą przecechowanego rotametu laboratoryjnego. Wartości temperatury wyznaczano z dokładnością  $\pm 0,02$  °C, ciśnienia  $\pm 10$  Pa, natomiast gęstości strumienia ciepła  $q$  i masy ( $w_p$ ) z dokładnością  $\pm 6\%$ .

#### 4. Wyniki badań eksperymentalnych

Autor przeprowadził badania eksperymentalne przemieszczania się zaburzenia w postaci sygnału zmiany ciśnienia podczas skraplania czynnika chłodniczego R404A w kanale rurowym chłodniczego wymiennika ciepła. Badaniom przeprowadzono wykorzystując skraplacz w postaci modelowego wymiennika ciepła. W węzownicy rurowej wzdłuż drogi przepływu czynnika chłodniczego umieszczono 12 czujników do pomiaru ciśnienia i 12 czujników do pomiaru temperatury (rys. 3).

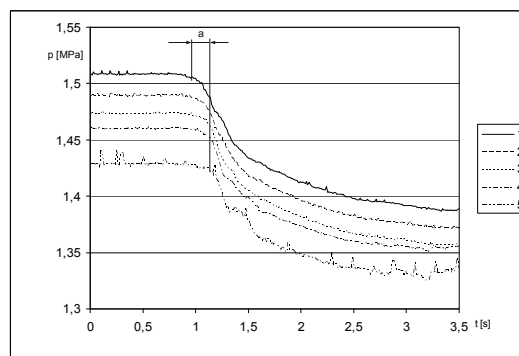


Rys. 3. Schemat idealowy rozmieszczenia czujników pomiarowych temperatury ( $T$ ) i ciśnienia ( $P$ ) na długości węzownicy rurowej skraplacza modelowego (w rozwinięciu)

Fig. 3. A schematic of the set-up of measuring sensors for temperature ( $T$ ) and pressure ( $P$ ) measurements along the tube coil of the model condenser (as uncoiled)

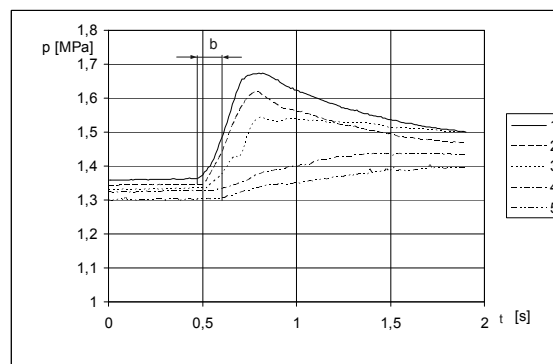
Badania przeprowadzono wywołując gwałtowną zmianę ciśnienia czynnika chłodniczego na dopływie do węzownicy rurowej. W tym celu wykorzystano zawór odcinający umieszczony na dopływie czynnika do skraplacza. Spadek ciśnienia w wymienniku uzyskiwano poprzez przymknięcie zaworu, a wzrost poprzez działanie odwrotne. Wytworzony sygnał zmiany ciśnienia  $\Delta p$  przemieszczał się w skraplającym się czynnikiem chłodniczym wzdłuż węzownicy rurowej z prędkością  $v_p$ . Prowadząc pomiary rejestrowano wartości ciśnienia i temperatury wzdłuż węzownicy rurowej oraz zmiany tych parametrów w czasie. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów stwierdzono, że zaburzenie zewnętrzne powodujące zmianę ciśnienia o wartość  $\Delta p$  przemieszczało się wzdłuż węzownicy rurowej w postaci fali ciśnieniowej i podążającej za nią fali temperaturowej. Fala ciśnieniowa poruszała się z dużą prędkością, rzędu  $v_p = 50 \div 300$  m/s, a fala temperaturowa z prędkością  $v_T = 0,3 \div 0,6$  m/s. Duże różnice wartości prędkości fali ciśnieniowej i temperaturowej wynikają z odmiennego mechanizmu ich przemieszczania się. Prędkość fali ciśnieniowej odpowiada prędkości dźwięku w przepływającej mieszaninie dwufazowej. Jej wartość wynika (przede wszystkim) z wielkości stopnia zapełnienia  $\phi$  czynnika chłodniczego w kanale. Najniższa wartość prędkości fali ciśnieniowej odpowiada wartościom stopnia zapełnienia około  $\phi = 0,5$ . Wartość prędkości fali temperaturowej jest ściśle związana z prędkością przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia oraz zmianą strumienia masy przepływającej mieszaniny dwufazowej. Temperatura mieszaniny dwufazowej jest bowiem funkcją lokalnego ciśnienia w kanale. Istotną rolę odgrywa też bezwładność cieplna, wynikająca z dążenia

układu do nowego stanu równowagi. Na rys. 4 i 5 przedstawiono przykładowo zmiany ciśnienia czynnika chłodniczego na długości węzownicy rurowej podczas przemieszczania się fali odpowiednio spadku i wzrostu ciśnienia w modelowym wymienniku ciepła. Prędkość fali ciśnieniowej wyznaczono dzieląc odległość pomiędzy miejscami pomiaru ciśnienia przez przedział czasu (tzw. „opóźnienie czasowe”), które towarzyszyło przejściu fali ciśnieniowej (odpowiednio odcinki  $a$  i  $b$  na rys. 4 i 5).



Rys. 4. Eksperymentalne przebiegi zmiany ciśnienia czynnika chłodniczego R404A w warunkach spadku ciśnienia skraplania w wymienniku; ( $w_p$ ) = 205 kg/m<sup>2</sup>s,  $q = 13,9$  kW/m<sup>2</sup>,  $v_p = 83,4$  m/s; oznaczenia czujników ciśnienia: 1 – P1, 2 – P3, 3 – P6, 4 – P9, 5 – P12

Fig. 4. Experimental pressure transients for refrigerant R404A under conditions of a decrease of condensation pressure in the heat exchanger; ( $w_p$ ) = 205 kg/m<sup>2</sup>s,  $q = 13,9$  kW/m<sup>2</sup>,  $v_p = 83,4$  m/s; subsequent curves refer to pressure sensors: 1 – P1, 2 – P3, 3 – P6, 4 – P9, 5 – P12

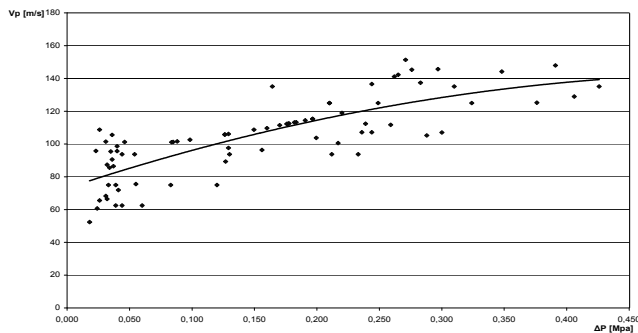


Rys. 5. Eksperymentalne przebiegi zmiany ciśnienia czynnika chłodniczego R404A w warunkach wzrostu ciśnienia skraplania w wymienniku; ( $w_p$ ) = 218 kg/m<sup>2</sup>s,  $q = 11,4$  kW/m<sup>2</sup>,  $v_p = 151,4$  m/s; oznaczenia czujników ciśnienia: 1 – P1, 2 – P3, 3 – P6, 4 – P9, 5 – P12

Fig. 5. Experimental pressure transients for refrigerant R404A under conditions of a rise of condensation pressure in the heat exchanger; ( $w_p$ ) = 218 kg/m<sup>2</sup>s,  $q = 11,4$  kW/m<sup>2</sup>,  $v_p = 151,4$  m/s; subsequent curves refer to pressure sensors: 1 – P1, 2 – P3, 3 – P6, 4 – P9, 5 – P12

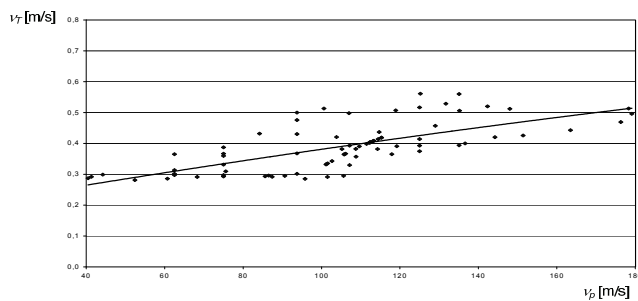
Rys. 6 przedstawia zależność prędkości  $v_p$  od wielkości  $\Delta p$  sygnału zmiany ciśnienia czynnika chłodniczego w węzownicy rurowej. Wraz z przemieszczającym się sygnałem zmiany ciśnienia  $\Delta p$  przemieszczał się front skraplania, ale ze znacznie mniejszą prędkością  $v_T$ , co przedstawiono na rys. 7. Z przedstawionych wyników pomiarów wynika, że ze wzrostem wartości  $\Delta p$  wzrasta prędkość przemieszczania się wywołanego zaburzenia. W badanym zakresie  $\Delta p = 0 \div 0,5$  MPa prędkość  $v_p$  zmieniała się w przedziale  $v_p = 70 \div 140$  m/s. Na rys. 8 porównano uzyskane wyniki badań eksperymentalnych z wynikami obliczeń teoretycznych przeprowadzonych według zależności (1) i (2). Stwierdzono, że dla tych samych parametrów ośrodka dwufazowego, wyższe wartości prędkości przemieszczania się fali ciśnieniowej uzyskuje się prowadząc obliczenia według zależności opisanej wzorem (2) w stosunku do zależności (1). W skrajnym przypadku ( $\phi = 0,5$ ) rozbieżności wynoszą około 20 %. Również zależność (2) lepiej opisuje wyniki badań eksperymentalnych i proponuje się stosować

ją do określania przemieszczania się zaburzeń w skraplającym się czynnikiem chłodniczym w wężownicy rurowej.



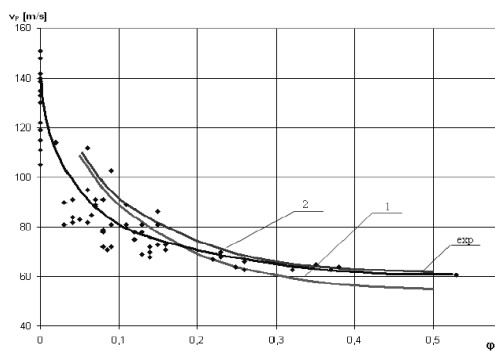
Rys. 6. Eksperymentalna zależność prędkości  $v_p$  przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia od wielkości impulsu wzrostu ciśnienia  $\Delta p$  w przepływie czynnika chłodniczego R404A w wężownicy rurowej

Fig. 6. Experimental dependence of the pressure signal propagation velocity  $v_p$  on the pressure impulse  $\Delta p$  under condensation in flow of refrigerant R404A in a coil tube



Rys. 7. Eksperymentalna zależność prędkości przemieszczania się sygnału zmiany temperatury  $v_T$  od prędkości  $v_p$  przemieszczania się zmiany wzrostu ciśnienia skraplania czynnika chłodniczego R404A w wężownicy rurowej

Fig. 7. Experimental dependence of the temperature signal propagation velocity  $v_T$  on the pressure signal propagation velocity  $v_p$  during condensation in flow of refrigerant R404A in a coil tube



Rys. 8. Zależność prędkości  $v_p$  przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia od stopnia zapełnienia  $\phi$ ;  $(w\rho) = 250 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $q = 12 \text{ kW/m}^2$ ,  $p = 1,4 \text{ MPa}$ ; 1 – obliczenia według zależności (1), 2 – obliczenia według zależności (2), exp – wyniki badań eksperymentalnych

Fig. 8. Dependence of the pressure signal propagation velocity  $v_p$  on the void fraction  $\phi$ ;  $(w\rho) = 250 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $q = 12 \text{ kW/m}^2$ ,  $p = 1,4 \text{ MPa}$ ; 1 – calculated from formula (1), 2 – calculated from formula (2), exp – experimental data

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły falowy charakter rozchodzenia się zaburzeń w ośrodku dwufazowym. Sygnały wywołanych zakłóceń przemieszczają się w instalacjach energetycznych z określoną prędkością. Można wyróżnić prędkość przemieszczania się sygnału ciśnienia  $v_p$  i prędkość

przemieszczania się sygnału temperatury  $v_T$ . Wartości tych prędkości zależą od parametrów ośrodka dwufazowego.

Po wywołaniu zaburzenia jednostkowego następowało przejście fali ciśnieniowej z prędkością  $v_p$  a następnie zmieniała się temperatura czynnika i ścianki kanału. Każdorazowo rejestrowano przejście fali temperaturowej z prędkością  $v_T$  ( $v_T \neq v_p$ ). Model dwupłynowy Nguyens'a stosunkowo dobrze opisuje wyniki badań eksperymentalnych i proponuje się stosować go do określania prędkości przemieszczania się zaburzeń w skraplającym się czynnikiem chłodniczym w wężownicy rurowej.

## 6. Oznaczenia

- $c$  – prędkość dźwięku, m/s,
- $d$  – średnica wewnętrzna kanału, m,
- $L$  – długość wężownicy rurowej, m,
- $p$  – ciśnienie, MPa,
- $\Delta p$  – spadek ciśnienia, MPa,
- $q$  – gęstość strumienia ciepła,  $\text{W/m}^2$ ,
- $T$  – temperatura, K,
- $t$  – czas, s,
- $(w\rho)$  – gęstość strumienia masy,  $\text{kg/m}^2\text{s}$ ,
- $v$  – prędkość fali, m/s,
- $x$  – stopień suchości,
- $\phi$  – stopień zapełnienia,
- $\rho$  – gęstość,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,

### indeksy dolne dotyczą:

- $p$  – ciśnienia,
- $s$  – nasycenia,
- $T$  – temperatury,

### indeksy górne dotyczą:

- ' – cieczy,
- ' – pary.

## 7. Literatura

- [1] Bohdal T., Bilicki Z., Czapp M.: Development of nucleate boiling in an annular clearance. *Int. J Heat and Technology*, 2001, vol. 19-n, No 2, pp. 33-37.
- [2] Bohdal T.: Investigation of boiling of refrigerating medium under conditions of impulse disturbances. *Int. J Experimental Heat Transfer*, 2004, vol. 19, No 2, pp. 103 – 117.
- [3] Falk K., Hervieu E., Gudmundsson J.S.: Pressure pulse and void fraction propagation in two-phase flow: Experiments for different flow regimes. *Proceedings of The 2nd International Symposium On Two-Phase Flow Modelling and Experimentation*, Pisa, Italy, May 23 – 25, 1999, Edizioni ETS, Pisa, vol. I, pp. 629 – 636.
- [4] Kuczyński W., Charun H., Bohdal T.: Influence of hydrodynamic instability on the heat transfer coefficient during condensation of R134a and R404A refrigerants in pipe mini-channels. *Int. J of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, (article in press).
- [5] Nakoryakov 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.
- [6] Nguyen D.L., Winter E.R.F., Greiner M.: Sonic velocity in two-phase system. *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 7, no 3, pp. 321 – 336, 1981.
- [7] 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*, 1996, vol. 22, No 5, pp. 893-908.
- [8] Som S.M., Kimball J.T., Hermanson J.C., Allen J.S.: Stability and heat transfer characteristics of unsteady condensing and evaporating films, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 50, pp. 1927 – 1937.