

Badanie wrzenia w przepływie proekologicznych czynników chłodniczych

*Tadeusz Bohdal, Andrzej Rasmus
Politechnika Koszalińska*

Recenzent: *Krystian Wilk
Politechnika Śląska*

1. Wstęp

Wprowadzone na przełomie lat 40-tych i 50-tych XX wieku czynniki chłodnicze chlorowcopochodne, zwane freonami, spowodowały poważne zmiany w technice chłodniczej. Wyparły one bowiem na trwale używane wówczas czynniki, takie jak chlorek metylu CH_3Cl i dwutlenek siarki SO_2 , ograniczając skutecznie zastosowanie amoniaku NH_3 do urządzeń lądowych o dużych mocach (z czasem wyeliminowano całkowicie amoniak z okrętowych urządzeń chłodniczych). Freon R12 zaczęto stosować powszechnie w urządzeniach o małej i średniej mocy cieplnej, zaś freon R22, w dużych urządzeniach (jako substytut amoniaku). Do układów niskotemperaturowych wprowadzono mieszaninę azeotropową, jako freon R502 oraz freony R13 i R13B1. W układach chłodniczych ze sprężarkami odśrodkowymi znalazły miejsce freony R11 i R21. Przeprowadzono poważnie zaawansowane prace nad zastosowaniem freonu R21 w siłowniach parowych dwuczynnikowych H_2O -R21, zwanych binarnymi. Praktycznie wykorzystywano również inne rodzaje freonów, jak na przykład R142, w odniesieniu do sprężarkowych obiegów pomp ciepła.

Rok 1974 należy uznać jako początek końca, bardzo dobrze zapowiadającej się ery freonów w technice chłodniczej. W tym właśnie roku, amerykańscy uczeni Sherwood Rowland i Mario Molina sformułowali hipotezę o niszczeniu warstwy ozonowej przez chlorowcopochodne węglowodory grupy CFC i HCFC, w szczególności chlorofluorokarbony CFC (w tym freony R11 i R12). Stwierdzono, że chlor zawarty w cząsteczkach chlorofluorokarbonów i hydrochlorofluorokarbonów HCFC (w tym R22) jest katalizatorem w reakcjach niszczenia ozonu i odpowiada za powstawanie tak zwanej „dziury ozonowej”. Określono między innymi, że pojedynczy atom chloru przyczynia się do zniszczenia około 100000 cząstek ozonu.

To spowodowało lawinowe uruchomienie prawnych, proekologicznych działań międzynarodowych. Konwencja Wiedeńska z dnia 22.03.1985 roku wydała decyzję o ochronie stratosferycznej warstwy ozonowej (weszła w życie 22.09.1988 roku; w Polsce obowiązuje od 11.10.1990 r.). Szczególnie znany jest Protokół Montrealski z 16.09.1987 roku, z decyzjami o zasięgu międzynarodowym w zakresie redukcji czynników grupy CFC (postanowienia weszły w życie 1.01.1989 roku). Wszystkie następne konferencje i spotkania międzynarodowe miały na celu zmniejszenie wielkości produkcji różnych rodzajów freonów, terminów ich częściowego i całkowitego wyeliminowania, jak również ograniczeń w eksporcie i imporcie innych substancji zubożających warstwę ozonową. Tym celom służyły, między innymi: Konferencja w Helsinkach-1989r, Spotkanie Londyńskie-1990, Konferencja w Kopenhadze-1990 i wiele następnych.

Na podstawie podjętych decyzji ratyfikowanych przez państwa-strony Protokołu Montrealskiego, chlorofluorokarbon-freon R12 został już praktycznie wyeliminowany z zastosowań w nowo projektowanych urządzeniach chłodniczych (w istniejących-poważnie ograniczony). Z wejściem Polski do Wspólnoty Europejskiej, realnie od 2000 roku, liczyć się należy z ograniczeniem produkcji dużych urządzeń pracujących na freonie R22. Wśród zamienników freonu R12 największą popularność zdobywa obecnie czynnik R134a, freon R22 zastępuje się czynnikiem R404a, zaś R502 wypierany jest przez czynnik R507.

Powszechnie uznawane w literaturze światowej korelacje dotyczące obliczania współczynników przejmowania ciepła i oporów przepływu są na ogół zweryfikowane eksperymentalnie dla dotychczas stosowanych czynników chłorcopochodnych, ewentualnie dla amoniaku lub wody. Dlatego zachodzi uzasadniona konieczność prowadzenia badań dla nowych, ekologicznych czynników [2,8,10,11].

Celem prezentowanych badań podstawowych dla nowych proekologicznych czynników chłodniczych było uzyskanie danych, dotyczących wymiany ciepła i oporów przepływu podczas wrzenia pęcherzykowego w przepływie, w zakresie wrzenia rozwiniętego w kanałach rurowych poziomych oraz pionowych.

2. Stanowisko pomiarowe

Do badań eksperymentalnych wykorzystano stanowisko pomiarowe będące na wyposażeniu Laboratorium Zakładu Termomechaniki i Chłodnictwa Politechniki Koszalińskiej, którego szczegółowy opis zawierają prace [3,4,5]. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys 1.

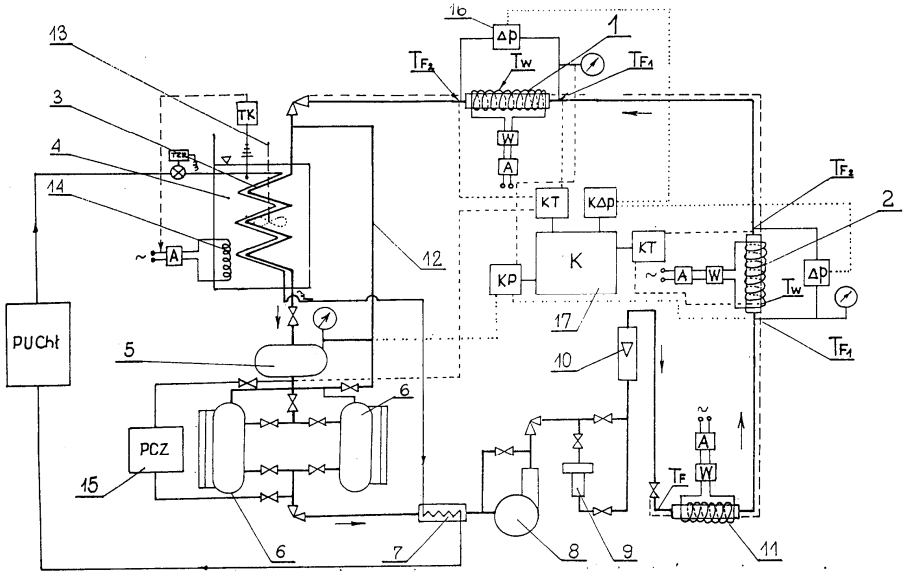
Stanowisko pomiarowe składało się z następujących zasadniczych elementów:

1. układu badawczego zawierającego odcinki pomiarowe wraz z oprzyrządowaniem,
2. układu zasilania instalacji czynnikiem chłodniczym,
3. instalacji energetycznej,
4. instalacji wody chłodzącej,
5. aparatury kontrolno-pomiarowej, współpracującej z komputerowym systemem rejestracji i przetwarzania danych.

Układ badawczy stanowiły dwa odcinki pomiarowe z oprzyrządowaniem. Odcinki pomiarowe wykonano w postaci poziomego i pionowego kanału prostego, o przekroju kołowym i średnicy wewnętrznej 13 mm. Kanały wykonane z miedzi, o długości 0,6 m każdy ogrzewano elektrycznie.

Stację zasilania wyposażono w następujące elementy: skraplacz czynnika chłodniczego 3, zbiornik czynnika chłodzącego skraplacz 4, zbiornik czynnika chłodniczego 5, zbiorniki pomiarowe 6, dochładzacz 7, pompę 8, filtr 9, rotametr 10, wstępny podgrzewacz czynnika chłodniczego 11. Przepływ czynnika chłodniczego w obiegu zapewniała pompa zębata. Maksymalne objętościowe natężenie przepływu czynnika chłodniczego wynosiło 440 l/h ($122 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$). Strumień masy czynnika przepływającego przez układ badawczy był regulowany przez dławienie na stronie tłocznej pompy i przez częściowy upust czynnika chłodniczego na jej stronie ssawną.

Pompa obiegowa zasysała przechłodzony, o kilka kelwinów, czynnik chłodniczy ze zbiorników pomiarowych, do których sphywał on grawitacyjnie ze skraplacza, poprzez zbiornik ciśnieniowy (zastosowano dodatkowe przewody 12, dla wyrównania ciśnienia w układzie sphywu grawitacyjnego). Skraplacz wykonany był w postaci węzownicy, zanurzonej w zbiorniku, z wodnym roztworem glikolu etylenowego. Ciepło odbierane było przez sprężarkowe urządzenie chłodnicze, którego parownik węzownicowy umieszczono w zbiorniku, wokół węzownicy skraplacza. W skład instalacji sprężarkowego urządzenia chłodniczego wchodziły: agregat sprężarkowo-skraplający na czynnik R22, z chłodzeniem wodnym, skraplacz, termostatyczny zawór rozprężny, dochładzacz cieczy, elementy automatyki chłodniczej. Zbiornik chłodziwa skraplacza wyposażono w mieszađło 13 i elementy grzejne 14 służące do zapewnienia żądanej temperatury chłodziwa. Zmianę mocy grzejnej elementów 14 realizowano za pomocą autotransformatora i termometru kontaktowego. Możliwość regulacji temperatury chłodziwa w zbiorniku skraplacza pozwalała na stabilizację temperatury skraplania czynnika chłodniczego i utrzymywaniu na stałym poziomie ciśnienia w skraplaczu i odcinku badawczym. W celu przechłodzenia czynnika chłodniczego zastosowano dochładzacz 7. Przegrzewacz wstępny 11 służył do uzyskiwania żądanej temperatury czynnika na dopływie do odcinka pomiarowego. Czynnik chłodniczy przepływał przez filtr i pochłaniacz wilgoci 9.



Oznaczenia:

- PUC_{Chł} - pomocnicze urządzenie chłodnicze
- W - watomierz
- A - autotransfornator
- Pcz - elektroniczny przepływomierz czynnika chłodniczego
- Δp - elektroniczny przetwornik różnicy ciśnień

- KP - komputerowa karta przetwornika pomiaru ciśnienia
- KΔp - komputerowa karta przetwornika pomiaru różnicy ciśnień
- KT - komputerowa karta przetwornika pomiaru temperatury
- K - komputer z oprzyrządowaniem

Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska pomiarowego: 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 ciśnień, 17 - komputer współpracujący z kartami przetwornikowym do pomiaru temperatury, ciśnienia i różnicy ciśnień

Fig. 1. A schematic diagram of the test facility: 1 - vertical test section with instrumentation, 2 - horizontal 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 compensation pipe, 13 - stirring device, 14 - heating element, 15 - flow meter of type SONOFLO, 16 - pressure difference transducer, 17 - computer that acquires measurement data of temperature, pressure and pressure difference.

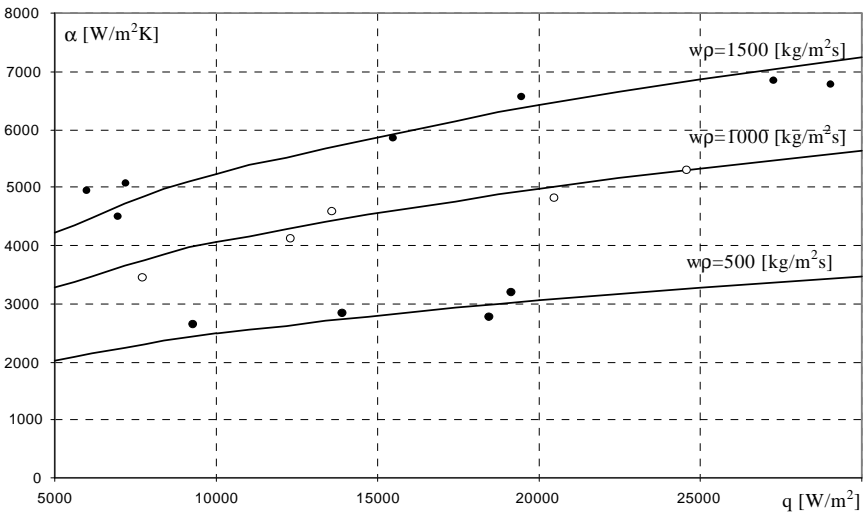
Do pomiaru natężenia przepływu czynnika chłodniczego zastosowano elektroniczny przepływomierz typu *Sonoflo 15* (firmy *Danfoss*), przecechowany uprzednio w pomiarach wstępnych. Istniała także możliwość pomiaru natężenia przepływu czynnika, za pomocą cechowanych zbiorników pomiarowych 16. Rotametr 10 spełniał rolę wskaźnika przepływu. Pomiar ciśnienia i spadku ciśnienia w charakterystycznych przekrojach układu badawczego wykonano za pomocą czujników tensometrycznych. Temperaturę ścianki ogrzewanego odcinka kanału przepływowego oraz temperaturę czynnika mierzono za pomocą termopar miedź - konstantan, o średnicy termoelektrod 0,35 mm i długości 2 mb. Czujniki termoelektryczne do pomiaru temperatury czynnika były zanurzone w cieczy, na długości około 0,7 średnicy wewnętrznej kanału. Spoiny termopar, do pomiaru temperatury ścianki zamontowano na głębokości 0,5 mm od zewnętrznej powierzchni kanału.

Wszystkie wielkości uzyskane z czujników pomiaru temperatury, natężenia przepływu i ciśnienia przetwarzano na sygnały napięciowe i doprowadzano do systemu komputerowego. Jego oprogramowanie zapewniało rejestrację i przetwarzanie danych. Zastosowanie komputerowego systemu wspomagania badań eksperymentalnych ułatwiło planowanie pomiarów, kontrolę ich przebiegu i obróbkę uzyskanych wyników.

Do odcinka pomiarowego można było doprowadzać czynnik chłodniczy w postaci cieczy niedogrzejanej do temperatury nasycenia, cieczy o temperaturze nasycenia lub w postaci mieszaniny dwufazowej. Dostateczną czystość czynnika uzyskano stosując filtr zainstalowany na dopływie do odcinków pomiarowych. Eksperymenty prowadzono utrzymując na stałym poziomie parametry termiczne i przepływowe czynnika.

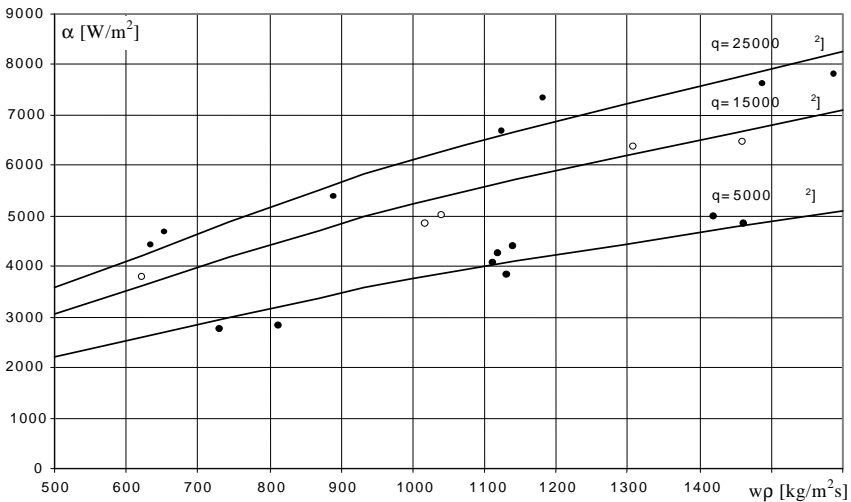
3. Wyniki badań i ich analiza

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych uzyskano wartości wielkości opisujących proces wymiany ciepła i oporów przepływu podczas rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego w kanale pionowym i poziomym. Badania przeprowadzono dla nowych proekologicznych czynników: R134a, R404A i R507. Na rys. 2 i 3 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów w postaci zależności współczynnika przejmowania ciepła α , od gęstości strumienia ciepła q na ścianie grzejnej i gęstości strumienia masy (wp) dla czynnika R507.



Rys. 2. Wyniki pomiarów w postaci zależności $\alpha=f(q)$ przy $w_p=\text{const}$, $T_s=-20^\circ\text{C}$, $x=0,05$, Kanał pionowy

Fig. 2. Results of measurements of the heat transfer coefficient for R507 in the form of $\alpha=f(q)$, for $w_p=\text{const}$, $T_s=-20^\circ\text{C}$, $x=0.05$, vertical channel



Rys. 3. Wyniki pomiarów w postaci zależności $\alpha=f(w_p)$ przy $q=\text{const}$, $T_s=0^\circ\text{C}$, $x=0,1$, R507, Kanał poziomy

Fig. 3. Results of measurements of the heat transfer coefficient for R507 in the form of $\alpha=f(w_p)$, For $q=\text{const}$, $T_s=0^\circ\text{C}$, $x=0.1$ horizontal channel

W oparciu o uzyskane wyniki pomiarów wyznaczono korelację w postaci bezwymiarowych liczb kryterialnych, pozwalająca wyznaczyć współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia pęcherzykowego w przepływie:

$$Nu = A \cdot (Re)^{n_1} \cdot (Fr)^{n_2} \cdot (Ku)^{n_3} \cdot (Bo)^{n_4}, \quad (1)$$

gdzie:

$$Nu - \text{liczba Nusselta}, \quad Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda'}$$

$$Re - \text{liczba Reynoldsa}, \quad Re = \frac{w\rho \cdot (1-x) \cdot d}{\mu' \cdot (1-\phi)}$$

$$Fr - \text{liczba Frouda}, \quad Fr = \frac{(w\rho)^2}{g \cdot d \cdot \rho'^2}$$

$$Ku - \text{liczba Kutateladzego}, \quad Ku = \frac{q \cdot (1-\phi)}{r \cdot \rho'' \cdot w' \cdot (1-x)}$$

$$Bo - \text{liczba wrzenia}, \quad Bo = \frac{q \cdot l}{\rho'' \cdot r \cdot \gamma'}, \quad \text{gdzie } l = \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')}}.$$

Na podstawie przeprowadzonych badań rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego czynników chłodniczych: R134a, R404A i R507 w zakresie:

- temperatury wrzenia $t_0 = -30 \div +10^\circ\text{C}$,
- gęstości strumienia ciepła $q = 0 \div 30\,000 \text{ W/m}^2$,
- gęstości strumienia masy $(w\rho) = 200 \div 1600 \text{ kg/m}^2\text{s}$,
- stopnia suchości $x = 0 \div 0,3$,
- stopnia zapełnienia $\phi = 0 \div 0,95$,
- $Ku = 0,0005 \div 0,02$, $Bo = 5 \div 60$, $Re = 10\,000 \div 100\,000$, $Fr = 0,1 \div 12$,

wyznaczono następujące wartości wykładników potęg we wzorze (1):

$$n_1 = 2.42; \quad n_2 = -0.35; \quad n_3 = 1.38; \quad n_4 = -1.08.$$

Współczynnik A przyjmuje wartości: $A = 4,5 \cdot 10^{-6}$ dla kanału pionowego i $A = 5,1 \cdot 10^{-6}$ dla kanału poziomego. Przedstawioną korelację (1) wyznaczono na podstawie blisko dwustu punktów pomiarowych

W korelacji (1) przyjęto, że zależność pomiędzy stopniem suchości x i stopniem zapełnienia Φ ma postać

$$\Phi = \left(1 + \frac{1-x}{x} \cdot \frac{\rho''}{\rho'} \cdot S \right)^{-1}, \quad (2)$$

gdzie:

S jest poślizgiem wyznaczonym z korelacji Huhna [3]:

$$S=1+0,27 \cdot \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{\rho'}{\rho''} \right)^n \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,12} \cdot \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right)^6 \cdot \left(1 + \frac{5}{0,1+Fr} \right)^m, \quad (3)$$

$$n=0,32 \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,125}, \quad (4)$$

$$m=6,7 \frac{P}{p_{kr}} \left(1 - \frac{P}{p_{kr}} \right)^4, \quad (5)$$

$$\left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,42} \geq S \geq 1 + 0,05 \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,5}. \quad (6)$$

Wyniki obliczeń według korelacji (1) porównano z wynikami badań eksperymentalnych uzyskując zgodność w przedziale $\pm 20\%$ oraz z wynikami obliczeń według korelacji innych autorów.

Całkowity miejscowy spadek ciśnienia w przepływie dwufazowym jest sumą trzech składowych: tarcowego, przyspieszeniowego i hydrostatycznego spadków ciśnienia [7].

W opracowaniu modelu obliczeniowego przyjęto, że tarcowy spadek ciśnienia jest równoważony przez naprężenia styczne τ_w na ścianie kanału:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta z} \right)_{TPF} = \frac{C}{A} \cdot \tau_w, \quad (7)$$

gdzie:

τ_w - naprężenia styczne wywołane przepływem mieszaniny dwufazowej,

$$\tau_w = \frac{\rho'}{2} \cdot \left(\frac{w'}{1-\Phi} \right)^2 \cdot f, \quad (8)$$

f - liczba przepływu

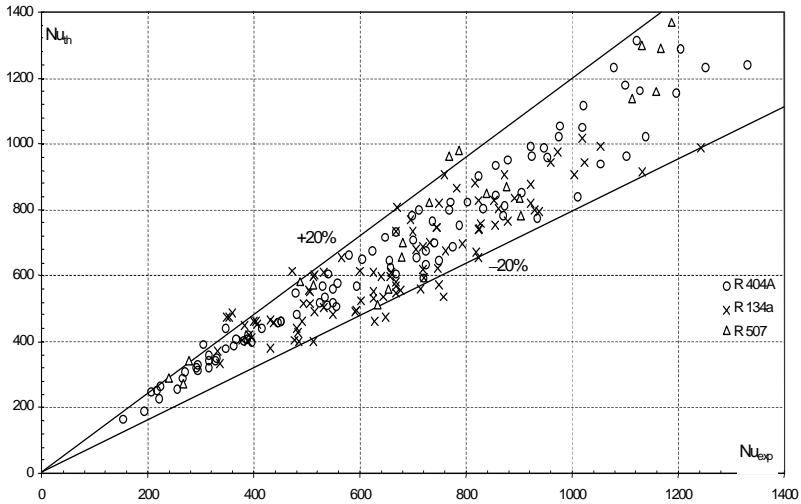
$$4f = 0,316 \cdot \text{Re}_{TP}^{-0,25}, \quad (9)$$

C - obwód zwilżony płynem,

A - pole powierzchni przekroju poprzecznego kanału.

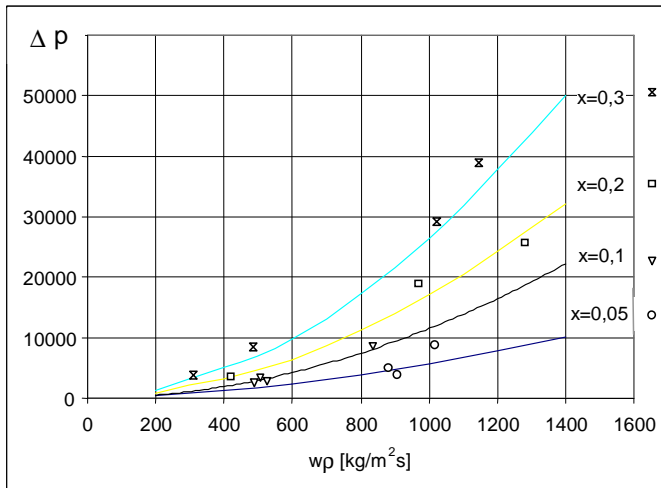
Po uwzględnieniu zależności (8) i (9) średni tarcowy spadek ciśnienia w kanale rurowym o średnicy D i długości Δz wyznacza się ze wzoru:

$$\Delta p_{TPF} = 2 \cdot \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho' \cdot w'^2 \cdot f}{D \cdot (1-\Phi)} dz. \quad (10)$$



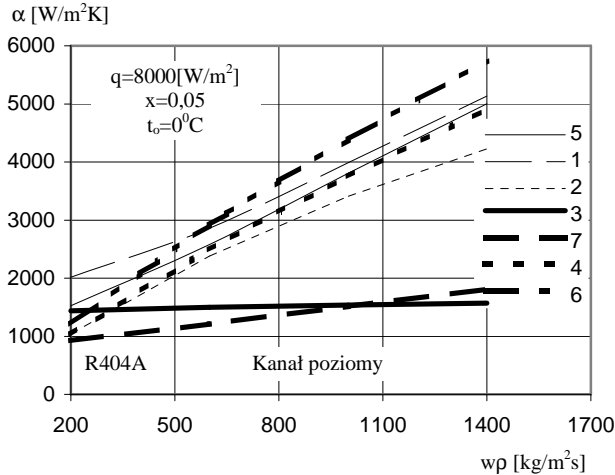
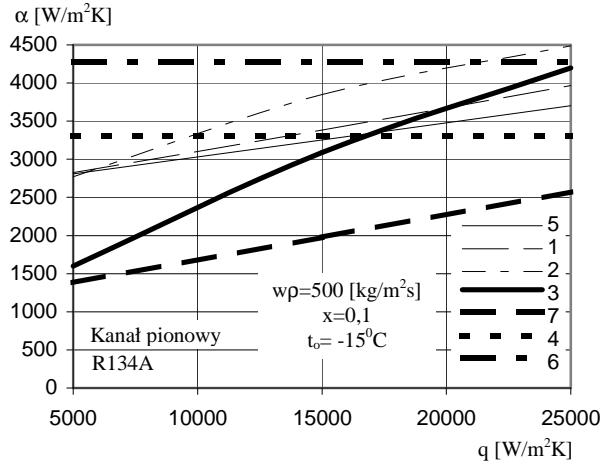
Rys. 4. Porównanie wyników obliczeń liczby Nusselta wg korelacji (1) z wynikami badań eksperymentalnych, kanał poziomy

Fig. 4. The comparison of the computational (based on the correlation (1)) and experimental Nusselts numbers in a horizontal channel



Rys. 5. Porównanie wyników obliczeń oporów przepływu wg korelacji (10) z wynikami badań eksperymentalnych, kanał poziomy, R134a, $T_s=-10^\circ C$, $L=0,6m$, $q=20 kW/m^2$

Fig. 5. The comparison of the computational (based on the correlation (10)) and experimental flow resistance for R134a in a horizontal channel, $T_s=-10^\circ C$, $l=0.6m$, $q=20kW/m^2$.



1 - Bilicki [1], 2 - Bohdal, 3 - Chawła [6], 4 - Dengler i Addoms [7],
5 - Mikielawicz [9], 6 - Troniewski [12], 7 - Schrock i Grossman [7]

Rys. 6. Porównanie wyników obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α według korelacji różnych autorów

Fig. 6. The comparison of the calculated heat transfer coefficient α according to correlations from different authors

Wielkości przyśpieszeniowego i hydrostatycznego spadku ciśnienia wyznaczono z ogólnie stosowanych zależności [8].

Na rys. 4+5 przedstawiono porównanie wyników obliczeń liczby Nusselta, która ujmuje wartość współczynnika przejmowania ciepła α , wg korelacji

(1) i oporów przepływu, z wynikami badań eksperymentalnych. Dla kanału pionowego 65% wartości obliczonych współczynnika α posiadało odchyłkę mniejszą niż $\pm 15\%$, a dla oporów przepływu 98% wyników posiadało taką odchyłkę. W wypadku kanału poziomego uzyskano odpowiednio 72% wyników współczynnika α i 94% wyników obliczeń oporów przepływu z podaną wyżej odchyłką.

Na rys. 6 przedstawiono porównanie wyników obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α według korelacji różnych autorów. Stwierdzono, że uzyskana korelacja z zadowalającą dokładnością pozwala wyznaczać współczynniki przejmowania ciepła α dla rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego w kanałach poziomych i pionowych nowych proekologicznych czynników chłodniczych R134a, R404A i R705.

4. Wnioski

1. Eksperymentalne badania rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego czynników R134a, 404A i R507 w kanałach rurowych: poziomym i pionowym przeprowadzono w zakresie $t_s = -30^\circ\text{C} \div +10^\circ\text{C}$, $(wp) = 100 \div 1600 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q = 3000 \div 30000 \text{ W/m}^2$, $x = 0 \div 0,3$. Opracowanie wyników badań pozwoliło na uzyskanie korelacji do obliczenia współczynnika przejmowania ciepła (1).
2. Wyniki badań porównano z obliczeniami według korelacji różnych autorów. Największą zgodność uzyskano w przypadku korelacji własnej, Mikielewicz i Bilickiego (w zakresie $\pm 20\%$).
3. Sprawdzono przyjętą, do obliczeń wartości lokalnego spadku ciśnienia,, zależność (10) stwierdzając na podstawie badań eksperymentalnych zgodność, z dokładnością $\pm 15\%$.
4. Uzyskana korelacja dla rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego dla nowych, proekologicznych czynników: R134a, R404A i R507 stanowi istotny materiał źródłowy, nie tylko o charakterze aplikacyjnym, ale również przydatnym do pełniejszej weryfikacji modeli teoretycznych opisujących problem przemian fazowych czynnika. Obecnie występuje szczególna luka odnośnie informacji o nowych proekologicznych czynnikach chłodniczych.

Literatura

1. **Bilicki Z.:** Analiza wymiany ciepła podczas wrzenia pęcherzykowego w kanale. Praca doktorska, IMP PAN, Gdańsk 1979
2. **Bilicki Z.:** The relation between the experiment and a theory for nucleate forced boiling. Proceedings of the 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Brussels, June 2 -6, 1997, Volume 2, pp.571-578, Edizioni ETS Pisa
3. **Bohdal T., Charun H., Czapp M., Dutkowski K.:** Wrzenie perspektywicznych czynników w parownikach chłodniczych. Przeglądowe opracowanie monograficzne *Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska* ————— 133

pod redakcją T. Bohdala. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 1999, stron 231

4. **Bohdal T., Rasmus A., Badur J.:** The investigation of bubble boiling of an environment-friendly refrigerant R507. Proceedings of The 2nd International Symposium On Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa, Italy, May 23 - 25, 1999, Edizioni ETS, Pisa, Volume I, pp. 221 - 224
5. **Bohdal T.:** The experimental investigation of the subcooled boiling flow. Proceedings of the 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Brussels, June 2 -6, 1997, Volume 2, pp.601-606, Edizioni ETS Pisa, Italy.
6. **Chawla J.M.:** Warneubergang und Druckabfall in waagerechten Rohren bei der Stromung von verdampfenden Kalmitteln. Kaltetechnik-Klimatisierung 1967, nr 8
7. **Madejski J.:** Wymiana ciepła przy wrzeniu i przepływy dwufazowe. Cz.II, Ośrodek Informacji o Energii Jądrowej, W-wa, 1973
8. **Madejski J.:** Generacja pęcherzyków podczas wrzenia w przepływie. Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk 1993, 384/1341/93
9. **Mikielewicz J.:** Semi - empirical method of determining the heat transfer coefficient for subcooled, saturated boiling in a channel. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol.17, pp. 1129-1134, 1974
10. **Mikielewicz J.:** Modelowanie procesów cieplno-przepływowych. Wydawnictwo Ossolineum, seria Maszyny Przepływowe, tom 17, Wrocław 1995
11. **Rasmus A.:** Heat transfer flow boiling - theoretical model. Recent Advances in Heat Transfer. B. Sunden and A. Žukauskas (Editors) 1992, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, pp.176 - 188
12. **Troniewski L.:** Metoda obliczania procesu odparowania w rurach w obszarze konwekcyjnym. Zeszyty Naukowe WSI Opole, nr 35, Mechanika Z.9, Opole 1977

The investigation of flow boiling of environment-friendly refrigerants

Abstract

Halogen-derivative refrigerants - CFC or HCFC freons used so far - are known to cause destruction of the ozone layer and considerably increase the greenhouse effect. Declarations of the Montreal Protocol in 1987 (and decisions enclosed in the reports from meetings of the undersigned in subsequent years up to the VII Vienna Conference in 1995) have already found their way to legislation of most countries over the world. New technologies successfully eliminate CFC compounds, elimination of HCFCs is a more long-term process. Among substitutes for freon R12, it seems that the medium known as R134a is the most popular, whereas freon R22 is replaced by R404a, and freon R502 is superseded by R507.

The correlations to evaluate heat transfer coefficients and flow resistance, well-recognised in the literature world-wide, were experimentally validated only for

halogen-derivative refrigerants used so far. Therefore, it is necessary to conduct investigations for new environment-friendly refrigerants.

The paper describes experimental investigations of heat transfer and flow resistance during bubble boiling of environment-friendly refrigerating media - R134a, R404A and R507 - in horizontal and vertical straight tubes. The investigations were carried out for a new environment-friendly refrigerant R507.

Based on the obtained results, the following correlation, elaborated for other ecological refrigerants [3] to calculate the heat transfer coefficients during bubble boiling in channel flow, was validated:

$$Nu = A \cdot (Re)^{2,42} \cdot (Fr)^{-0,35} \cdot (Ku)^{1,38} \cdot (Bo)^{-1,08}, \quad (1)$$

where $A=4.5 \times 10^{-5}$ for a vertical channel, $A=5.1 \times 10^{-5}$ for a horizontal channel.

The correlation (1) was considered for the following range of parameters:

- boiling number $t_b = -30 \div +10^0\text{C}$,
- heat flux density $q = 3000 \div 30\,000 \text{ W/m}^2$,
- mass flux density (w_p) = $100 \div 1600 \text{ kg/m}^2\text{s}$,
- dryness fraction $x = 0 \div 0,3$,
- void fraction $\phi = 0 \div 0,95$,
- $Ku = 0,0005 \div 0,02$, $Bo = 5 \div 60$, $Re = 10\,000 \div 100\,000$, $Fr = 0,1 \div 12$.

It was found that results of calculations from the correlation (1) agree with experimental data within a discrepancy margin of $\pm 20\%$.

During the analysis of pressure drop in two-phase flow which is a resultant of three kinds of pressure drop - frictional, accelerational and hydrostatic, it was assumed that the frictional pressure drop is due to wall shear stress and can be written as follows

$$\left[\frac{dp}{dz} \right]_{\text{TPF}} = \frac{C}{A} \cdot \tau_w, \quad (7)$$

where : - τ_w is the wall shear in two-phase flow (an assumption was made that the increase of shear stress is caused by the increase of the two-phase flow velocity, compared to the velocity of one-phase flow of the same flow rate w_p),

- C denotes the channel circumference,
- A is the channel cross-sectional area.

The accelerational and hydrostatic pressure drop were calculated from generally accepted relationships. It was found that relation (7) for the local pressure drop agrees with experimental data with a discrepancy not exceeding $\pm 15\%$.

The obtained experimental data allow the elaboration of correlations to calculate heat transfer coefficients and flow resistance during bubble boiling in channel flow. The results of calculations based on the own correlations are compared with the results obtained from correlations worked out by other authors.