

**Politechnika Koszalińska**  
**Wydział Mechaniczny**  
**Katedra Energetyki**

**Rozprawa Doktorska**

**Badanie niestabilności dynamicznych skraplania  
proekologicznych czynników chłodniczych  
w minikanalach rurowych**

**mgr inż. Aleksander Denis**

**Promotor: dr hab. inż. Waldemar Kuczyński**

**Koszalin 2020**

Składam serdeczne podziękowania

Promotorowi Panu **dr hab. inż. Waldemarowi Kuczyńskiemu**  
profesorowi Politechniki Koszalińskiej

oraz

Panu **dr inż. Henrykowi Charunowi**

Za opiekę naukową, życzliwość i poświęcony czas.

## Spis treści

Wykaz oznaczeń.....	7
<b>1. Wstęp .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Analiza wyboru rodzaju czynnika chłodniczego wg standardów aktualnych i perspektywicznych w oparciu o Raport Bitzera .....</b>	<b>13</b>
2.1. Wstęp .....	13
2.2. Charakterystyka stosowanych aktualnie czynników chłodniczych .....	16
2.2.1. Naturalne czynniki chłodnicze .....	21
2.2.2. Syntetyczne czynniki chłodnicze poprzedniej generacji .....	23
2.2.3. Syntetyczne czynniki chłodnicze nowej generacji.....	24
2.3. Podsumowanie .....	29
<b>3. Przegląd stanu wiedzy dotyczący wpływu niestabilności na proces skraplania w przepływie .....</b>	<b>31</b>
3.1. Charakterystyka procesu skraplania w przepływie w warunkach oddziaływań niestabilności .....	31
3.2. Niestabilności przemiany fazowej skraplania.....	37
3.2.1. Niestabilności statyczne .....	37
3.2.2. Niestabilności dynamiczne procesu skraplania .....	38
3.3. Niestabilności skraplania w minikanałach rurowych .....	42
3.4. Podsumowanie .....	45
<b>4. Geneza, cel i zakres tematu pracy.....</b>	<b>47</b>
4.1. Geneza tematu pracy .....	47
4.2. Hipoteza pracy.....	47
4.3. Cel pracy .....	47
4.4. Zakres i spodziewany wpływ uzyskanych wyników .....	48

---

4.5. Plan koncepcja realizacji celu pracy.....	49
<b>5. Badania eksperymentalne .....</b>	<b>51</b>
5.1. Cel badań eksperymentalnych .....	51
5.2. Stanowisko pomiarowe .....	51
5.3. Metodyka badań eksperymentalnych.....	54
5.4. Zakres i metoda pomiarów eksperymentalnych .....	55
<b>6. Wyniki badań eksperymentalnych skraplania proekologicznych czynników chłodniczych w warunkach periodycznych zakłóceń dynamicznych .....</b>	<b>61</b>
6.1. Wyniki badań wpływu zakłóceń na zmiany natężenia przepływu, ciśnienia i temperatury podczas skraplania w pojedynczych minikanalach rurowych .....	61
6.2. Wyniki badań eksperymentalnych określenia prędkości propagacji niestabilności generowanych periodycznie podczas skraplania nowych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych .....	66
6.2.1. Wyniki badań dotyczących określenia prędkości przemieszczania się niestabilności ciśnieniowych $v_p$ .....	68
6.2.2. Wyniki badań dotyczących określenia prędkości przemieszczania się niestabilności temperaturowych $v_T$ .....	81
6.2.3. Wyniki badań eksperymentalnych w zakresie długości strefy skraplania .....	88
6.3. Podsumowanie wyników badań eksperymentalnych .....	93
<b>7. Modelowanie fizyczne procesu skraplania w przepływie w minikanalach rurowych w warunkach niestabilności dynamicznych generowanych periodycznie .....</b>	<b>97</b>
7.1. Wprowadzenie .....	97
7.2. Modele funkcji regresji dla badanych czynników chłodniczych .....	102

---

7.2.1. Model regresyjny periodycznych niestabilności ciśnieniowych.....	102
7.2.2. Model regresyjny periodycznych niestabilności temperaturowych.....	104
7.2.3. Uogólniony model regresyjny dla czynników R404A, R507 i R448A ..	106
7.2.4. Uogólniony model regresyjny dla czynników R134a, R1234yf i R1234ze .....	109
7.3. Podsumowanie .....	112
<b>8. Podsumowanie.....</b>	<b>113</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>117</b>
<b>ZAŁĄCZNIK nr 1.....</b>	<b>131</b>
<b>ZAŁĄCZNIK nr 2.....</b>	<b>143</b>
<b>ZAŁĄCZNIK nr 3.....</b>	<b>167</b>
<b>ZAŁĄCZNIK nr 4.....</b>	<b>187</b>
<b>ZAŁĄCZNIK nr 5.....</b>	<b>197</b>
<b>Streszczenie .....</b>	<b>203</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>205</b>



## Wykaz oznaczeń

### Litery łacińskie

$A$	- pole powierzchni [ $m^2$ ]
$A_{osc.}$	- amplituda względna oscylacji masowego natężenia przepływu
$a$	- parametr skali
$a$	- wartość skoku
$a$	- współczynnik równania stanu gazu
$a$	- wykładnik potęgi równania regresji
$b$	- współczynnik równania stanu gazu
$b$	- wykładnik potęgi równania regresji
$C$	- wartość stałej równania regresji
$c$	- prędkość dźwięku [ $m/s$ ]
$c$	- wartość początkowa
$c$	- wartość średnia
$c$	- wykładnik potęgi równania regresji
$C_p$	- ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu [ $kJ/(kg \cdot K)$ ]
$C_{p.r.}$	- ciepło właściwe czynnika chłodniczego przy stałym ciśnieniu [ $kJ/(kg \cdot K)$ ]
$C_{p.w.}$	- ciepło właściwe wody przy stałym ciśnieniu [ $kJ/(kg \cdot K)$ ]
$d_h$	- średnica hydrauliczna [ $m$ ]
$f$	- częstotliwość [ $Hz$ ]
$G$	- strumień masy czynnika chłodniczego [ $kg/(m^2 \cdot s)$ ]
$k$	- liczba falowa [ $1/m$ ]
$k$	- współczynnik kształtu
$L$	- odległość od wlotu do minikanału [ $m$ ]
$L_i$	- długość strefy skraplania [ $m$ ]
$\Delta l$	- odległość między czujnikami [ $m$ ]
$\dot{m}_{H_2O}$	- masowe natężenie przepływu wody chłodzącej [ $kg/h$ ]
$\dot{m}_r$	- masowe natężenie przepływu czynnika chłodniczego [ $kg/h$ ]
$\dot{m}_{ust}$	- masowe natężenie przepływu czynnika chłodniczego w stanie ustalonym [ $kg/h$ ]
$\dot{m}_{w.w.}$	- masowe natężenie przepływu wody przez wymiennik wstępny [ $kg/h$ ]
$t$	- czas [ $s$ ],
$\Delta t$	- przesunięcie czasowe [ $s$ ]
$\Delta t$	- przyrost czasu otwarcia/zamknięcia zaworu [ $s$ ]
$T$	- temperatura [ $K$ ]
$T_i$	- temperatura wody chłodzącej w i-tym przekroju kanału [ $K$ ]
$T_k$	- temperatura skraplania [ $K$ ]
$T_{kr}$	- temperatura krytyczna [ $K$ ]
$T_s$	- temperatura nasycenia [ $K$ ]
$\Delta T^+$	- bezwymiarowy spadek temperatury
$T_r$	- temperatura pary czynnika chłodniczego na wlocie do wymiennika wstępnego [ $^{\circ}C$ ]
$T_{ści}$	- temperatura ścianki zewnętrznej minikanału [ $^{\circ}C$ ]
$T_{w.wej}$	- temperatura wody chłodzącej na wlocie do wymiennika
$T_{w.wyj.}$	- temperatura wody chłodzącej na wylocie z wymiennika
$\Delta T$	- amplituda temperatury [ $K$ ]

$\Delta T_w$	- przyrost temperatury wody chłodzącej w wymienniku wstępnym
$p$	- ciśnienie [MPa]
$p_s$	- ciśnienie nasycenia [MPa]
$p_k$	- ciśnienie skraplania [MPa]
$p_{kr}$	- ciśnienie krytyczne [MPa]
$\Delta p$	- amplituda ciśnienia [MPa]
$\Delta p$	- spadek/wzrost ciśnienia [MPa]
$\Delta p^+$	- bezwymiarowy spadek ciśnienia
$R$	- uniwersalna stała gazowa [J/(mol·K)]
$R$	- współczynnik istotności
$Re_{TPF}$	- bezwymiarowa liczba <i>Reynolds'a</i> dla przepływu dwufazowego
$r$	- ciepło skraplania czynnika chłodniczego [kJ/kg]
$r_0$	- promień minikanalu [m]
$S$	- entropia [J/K]
$S$	- poślizg międzyfazowy
$V$	- objętość [m <sup>3</sup> ]
$v$	- objętość właściwa [m <sup>3</sup> /kg]
$\bar{v}$	- prędkość średnia [m/s]
$v_f$	- prędkość fazowa [m/s]
$v_r$	- prędkość równowagowa [m/s]
$v_T$	- prędkość przemieszczania się niestabilności temperaturowych [m/s]
$v_T^+$	- bezwymiarowa prędkość sygnału zmiany temperatury
$v_p$	- prędkość przemieszczania się niestabilności ciśnieniowych [m/s]
$v_p^+$	- bezwymiarowa prędkość sygnału zmiany ciśnienia
$v_{zr}$	- prędkość zamrożona [m/s]
$w$	- prędkość mieszaniny dwufazowej [m/s]
$\dot{Q}_i$	- lokalny strumień ciepła [kW]
$\dot{Q}_j$	- strumień ciepła jawnego [kW]
$\dot{Q}_{ot.}$	- straty ciepła do otoczenia [kW]
$\dot{Q}_{w.w.}$	- strumień ciepła wymiennika wstępnego [kW]
$q$	- gęstość strumienia ciepła [kW/m <sup>2</sup> ]
$q_i$	- gęstość lokalnego strumienia ciepła [kW/m <sup>2</sup> ]
$\bar{q}_i$	- średnia wartość lokalnej gęstości strumienia ciepła [kW/m <sup>2</sup> ]
$x$	- stopień suchości pary
$x_i$	- lokalny stopień suchości pary
$x_{wej}$	- stopień suchości na wlocie to sekcji pomiarowej
$\Delta x$	- zmiana stopnia suchości
$y$	- wartość funkcji

### Litery greckie

$\alpha$	- współczynnik przejmowania ciepła [W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha_i$	- lokalny współczynnik przejmowania ciepła [kW/m <sup>2</sup> K]
$\delta$	- niezakłócony promień wewnętrznej powierzchni filmu kondensatu
$\theta$	- czas relaksacji [s]
$\lambda$	- długość fali [m]



---

$\lambda_g$	- graniczna długość fali [m]
$\rho$	- gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{kr}$	- gęstość krytyczna [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	- napięcie powierzchniowe [J/m <sup>2</sup> ]
$\nu$	- kinematyczny współczynnik lepkości [m <sup>2</sup> /s]
$\varphi$	- współczynnik wypełnienia
$\varpi$	- częstość kołowa zakłóceń [rad/s]
$\varpi_g$	- graniczna częstość kołowa zakłóceń [rad/s]

**Indeksy dolne dotyczą**

<i>l</i>	- cieczy
<i>o</i>	- początek, otwarcie zaworu
<i>z</i>	- koniec, zamknięcie zaworu
<i>v</i>	- gazu
<i>TPF</i>	- przepływ dwufazowy



## 1. Wstęp

Racjonalne zużycie energii w warunkach zrównoważonego rozwoju społeczeństw można bezpośrednio sprowadzić do przesłanek technologicznych, na bazie których rozwijane są i będą konstrukcje o zmniejszonej energo- i materiałochłonności, a jednocześnie przyjazne środowisku dzisiaj i w następnych pokoleniach. Problemy ograniczonych zasobów oraz ochrony środowiska dotyczą nie tylko energetyki, ale wszystkich dziedzin gospodarki narodowej. Szczególnym jej działem jest szeroko pojęta technika chłodnicza i klimatyzacyjna.

W dziedzinie chłodnictwa i klimatyzacji wdrażane są od połowy XX wieku technologie zmierzające do miniaturyzacji urządzeń, polegające na konstruowaniu maszyn i urządzeń o porównywalnych z rozwiązaniami konwencjonalnymi mocy cieplnej, lecz o wyższej gęstości strumienia energii i sprawności oraz niższej materiałochłonności. Przykładem są kompaktowe wymienniki ciepła, zwłaszcza parowniki i skraplacze, stosowane w układach energetycznych, których konstrukcja oparta jest na zastosowaniu mikro- i minikanalów o średnicy hydraulicznej mniejszej niż 3 mm.

Szczególne znaczenie mają kompaktowe skraplacze chłodnicze. Dotychczasowy stan wiedzy na temat przenoszenia pędu i energii w takich wymiennikach motywuje do prowadzenia intensywnych badań w wielu ośrodkach światowych i polskich. Podstawową trudnością jest fakt, że nie można w sposób bezwarunkowy przenosić dotychczas stosowanych metod obliczeniowych określonych dla kanałów konwencjonalnych, do projektowania kanałów o małej średnicy, w których realizowany jest dwufazowy proces skraplania w przepływie (zwłaszcza w przypadku nowych proekologicznych czynników chłodniczych). Według oceny aktualnego stanu wiedzy brak jest zadowalających, uogólnionych metod obliczeniowych skraplania w mini- i mikrokanalach w warunkach ustalonych. Tym bardziej słabo jest rozpoznany przebieg procesu skraplania w warunkach nieustalonych.

Przemiana fazowa skraplania realizowana w rzeczywistych urządzeniach chłodniczych odbiega znacząco od ustalonego procesu równowagowego. Na takie warunki składają się oddziaływania generowane zarówno wewnątrz instalacji, jak i te poza nią, które zakłócają proces skraplania w przepływie minikanalami.

---

Problemy dotyczące realizacji skraplania w minikanalach rurowych nowych proekologicznych czynników chłodniczych są tematem niniejszego opracowania. Wyniki badań powinny dostarczyć informacji dotyczących rozpoznania zjawisk towarzyszących skraplaniu w minikanalach w warunkach niestabilnych, ich opisu jakościowego oraz ilościowego. Wnioski wynikające z analizy teoretycznej i eksperymentalnej zjawisk powinny wpłynąć na rozwój dotychczasowego stanu wiedzy. Szczególnie istotne znaczenie odgrywa wpływ zakłóceń o charakterze dynamicznym. Publikowane dotychczas prace innych autorów odnoszą się do zastosowania czynników, które zgodnie z aktualnymi uregulowaniami prawnymi uległy lub podlegają wycofaniu z użytkowania.

Opracowując zakres zagadnień rozpatrywanych w rozprawie doktorskiej wzięto pod uwagę szczególnie te, które mogą mieć również charakter aplikacyjny, tzn. będą pomocne projektantom miniaturowych, kompaktowych skraplaczy chłodniczych. W prowadzonych badaniach uwzględniono takie problemy, jak: wpływ rodzaju czynnika chłodniczego na mechanizm skraplania w warunkach niestabilnych, określenie prędkości propagacji fal zakłóceń przemieszczających się w procesie dwufazowym skraplania, możliwości ich modelowania w zakresie wymiany pędu i energii. W szczególności istotnym jest odniesienie uzyskanych wyników eksperymentalnych oraz modelowych do tych, które uprzednio uzyskano dla wycofywanych z użytkowania czynników chłodniczych.

## 2. Analiza wyboru rodzaju czynnika chłodniczego wg standardów aktualnych i perspektywicznych w oparciu o Raport Bitzera

### 2.1. Wstęp

Pojęcie kanałów o małej średnicy, do których należą minikanaly, wywodzi się z klasyfikacji zaproponowanej przez autorów prac [42,43,55÷58]. Zaproponowali oni, aby kanały o średnicy hydraulicznej  $d_h$  mniejszej niż 0,2 mm nazywać mikrokanalami, w zakresie  $d_h = 0,2 \div 3$  mm minikanalami, zaś w przypadku średnicy większej od 3 mm – kanałami konwencjonalnymi. W pracach [76,82,85,95,113] autorzy podali klasyfikację wymienników ciepła zbudowanych na bazie kanałów o różnej średnicy hydraulicznej. Jeżeli średnica hydrauliczna kanałów wymiennika wynosi  $d_h = 100 \mu\text{m} \div 1$  mm, wtedy nosi on nazwę *mesowymiennik* ciepła, gdy  $d_h = 1 \mu\text{m} \div 100 \mu\text{m}$  jest to *mikrowymiennik*, natomiast dla  $d_h > 6$  mm – *wymiennik konwencjonalny*. Wprawdzie klasyfikacja kanałów stosowanych w wymiennikach ciepła nie jest oparta na precyzyjnych kryteriach można jednak stwierdzić, że w przypadku  $d_h < 1 \div 6$  mm mamy do czynienia z tzw. kompaktowymi wymiennikami ciepła (mini wymiennikami). Dla wymienników kompaktowych stosuje się także kryterium:  $A/V > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , gdzie A – pole powierzchni wymiany ciepła, V – objętość gabarytowa wymiennika [42].

Prowadzone dotychczas badania w różnych ośrodkach światowych i krajowych dotyczyły w większości przypadków oceny procesu skraplania w warunkach ustalonych (stabilnych) zarówno w kanałach konwencjonalnych, jak i minikanalach z zastosowaniem wycofywanych już czynników chłodniczych. W ramach niniejszego opracowania dokonano porównania wyników otrzymanych uprzednio przez autora [74,75,78÷85], a dotyczących skraplania wybranych czynników chlorowcopochodnych w warunkach niestabilności dynamicznych w minikanalach rurowych z ich substytutami [73,76].

Należy podkreślić, że niestabilności przepływu dwufazowego powstające podczas skraplania czynnika w przepływie mogą mieć charakter wewnętrzny (wynikający np. ze zmiany struktury przepływu) lub zewnętrzny (będący skutkiem dynamicznych oddziaływań otoczenia). O przepływie niestabilnym wewnętrznie

mówimy wówczas, gdy źródło zakłóceń przepływu jest nierozłącznie związane ze zmianą parametrów układu. Jeżeli znane są parametry stanu układu, wtedy można w relatywnie prosty sposób określić, kiedy mogą pojawić się niestabilności wewnętrzne [3,16,43,49,99,110]. Takie oddziaływania powodują wprawdzie określone skutki, ale można przewidywać, w jaki sposób układ powróci do nowego stanu ustalonego (niekoniecznie takiego samego, jaki był w momencie wystąpienia niestabilności wewnętrznej). Oddziaływania tego typu mają, zatem charakter deterministyczny. Znacznie inny jest wymiar i oddziaływanie zakłóceń dynamicznych. Przyczyną niestabilności dynamicznych w układzie są oddziaływania cieplne lub dynamiczne zwykle o charakterze stochastycznym, natomiast skutki takich niestabilności można przewidzieć tylko z określonym prawdopodobieństwem, zatem są to oddziaływania typowo probabilistyczne [30,83,84,120÷122].

Zakłócenia powodujące dynamiczne niestabilności procesu skraplania w przepływie rozpatruje się, jako jednostkowe, albo periodyczne [18,20÷22,82,85]. Zakłócenia jednostkowe są spowodowane zazwyczaj gwałtowną, jednorazową zmianą parametrów układu, (np. gwałtowne zamknięcie lub otwarcie zaworu zasilającego) [85]. Zakłócenia periodyczne są wywoływane cyklicznymi zmianami parametrów układu, np. przez cykliczne zamykanie i ponowne otwieranie zaworu zasilającego, wynikające z pracy automatyki, hydrodynamicznego oddziaływania pracy maszyn i urządzeń energetycznych itp. [13,14,32,45,73÷85,112].

Stopień rozpoznanie wpływu przedstawionych wyżej zakłóceń na proces skraplania w minikanalach rurowych nowych proekologicznych czynników chłodniczych można uznać za niezadowalający. Prowadzone dotychczas badania teoretyczne i eksperymentalne pozwoliły na rozpoznanie i opis zjawisk procesu skraplania w warunkach niestabilnych dla już wycofanych lub aktualnie eliminowanych z użytkowania czynników chłodniczych. Natomiast w przypadku ich substytutów istnieje wyraźna luka informacyjna dotycząca tego zagadnienia.

Należy podkreślić, że niestabilności procesu skraplania wywołane przez zakłócenia, zwłaszcza te dynamiczne, mają charakter falowy. Wobec powyższego mogą znacząco wpływać na pracę maszyn i urządzeń energetycznych (w tym urządzeń chłodniczych). Zapewnienie bezpieczeństwa pracy takich układów jest ważne ze względów eksploatacyjnych, ponieważ mogą one prowadzić do całkowitego unieruchomienia urządzenia lub awarii.

Badania prowadzone dla wycofywanych czynników chłodniczych pozwoliły określić nie tylko wpływ niektórych parametrów na powstawanie niestabilności przepływu dwufazowego skraplania, ale również skutki tych oddziaływań. Przejawiają się one, między innymi, zakłóceniem procesu wymiany ciepła w strefie dwufazowej, wzrostem oporów przepływu, a to z kolei prowadzi do spadku wydajności kompaktowych wymienników ciepła i wzrostu nakładów energetycznych związanych z transportem czynnika [7,8,11,12,17,19,31]. Wśród wielkości, które mają istotny wpływ na niestabilności należy wymienić zmiany: gęstości strumienia masy, gęstości strumienia ciepła, ciśnienia, temperatury, itp.

Falowy charakter niestabilności związany jest ze zjawiskami propagacji zmiany parametrów układu (np. propagacja fali ciśnieniowej i propagacja fali zmiany temperatury czynnika). Dużą rolę odgrywa znajomość wartości prędkości rozprzestrzeniania się falowych zmian tych parametrów [5,6,12,15,15÷19, 50÷54].

Na podstawie powyższych informacji wstępnych dotyczących niestabilności podczas skraplania dotychczas stosowanych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych można założyć, że powyższe niepożądane zjawiska wystąpią również podczas skraplania ich substytutów w warunkach przepływów niestabilnych. Według rozpoznania źródeł literatury oraz na podstawie własnych wstępnych badań można stwierdzić, że bezpośrednio przeniesienie dotychczasowych wyników analizy niestabilnego procesu skraplania w minikanalach na nowe proekologiczne czynniki chłodnicze może być obarczone znacznym błędem i w praktyce nie należy stosować bezwarunkowo tej metody [2,60,75,79, 80,83,108÷110]. Wprawdzie mechanizm procesu skraplania jest zbliżony dla wszystkich czynników chłodniczych, jednak warunki w jakich jest on realizowany powodują istotne odchylenia od przyjętych założeń. Zatem, jeżeli procesowi skraplania w minikanalach towarzyszą zakłócenia dynamiczne o charakterze falowym, wtedy właściwa ocena jakościowa i ilościowa tego procesu dla nowych, proekologicznych czynników chłodniczych nie będzie możliwa bez uprzedniego rozpoznania mechanizmu przenoszenia energii i pędu.

Wyniki badań nad niestabilnościami występującymi podczas skraplania w minikanalach rurowych wykonane dla dotychczas stosowanych czynników chłodniczych dowodzą, że mogą stanowić one poziomem odniesienia dla ich proekologicznych zamienników.

W ramach realizacji rozprawy doktorskiej eksperymenty takie przeprowadzono dla przemiany fazowej skraplania w minikanalach rurowych w przypadku izomerów fluorowanych z grupy R1234, zwłaszcza R1234yf oraz R1234ze, będących substytutami wycofywanego z użytkowania czynnika R134a. Czynnik R1234yf jest proponowany jako zamiennik R134a w układach chłodniczych i klimatyzacyjnych, natomiast R1234ze jest dedykowany dla sprężarkowych pomp ciepła.

## 2.2. Charakterystyka stosowanych aktualnie czynników chłodniczych

Dobór odpowiedniego czynnika chłodniczego był, jest i będzie podstawowym zagadnieniem w dziedzinie techniki chłodniczo-klimatyzacyjnej. Cynniki chłodnicze stosowane są głównie w maszynach i urządzeniach energetycznych, takich jak: układy chłodnicze i klimatyzacyjne, pompy ciepła, układy typu ORC, układy odzysku ciepła i wiele innych. Jednak liczba odpowiednich substancji chemicznych nie jest zbyt duża, jakby mogło się wydawać. Sytuacja legislacyjna, a w szczególności wymogi dotyczące dopuszczenia czynników chłodniczych do stosowania w różnego typu instalacjach znacząco zawężają ilość tych czynników, możliwych do wykorzystania. Nie dość, że wymagania stawiane czynnikom chłodniczym są bardzo wysokie, to dodatkowo podlegają one ciągłym zmianom. Trudno jest zatem przewidzieć, czy czynnik obecnie uważany za najlepiej dopasowany do danej instalacji nie będzie musiał zostać zastąpiony innym, w trakcie jej długoletniej pracy.

Historia rozwoju czynników roboczych dla urządzeń chłodniczych, klimatyzacyjnych i pomp ciepła trwa już przeszło 100 lat. Przez pierwsze 50 lat stosowano cynniki chłodnicze chlorowcopochodne, zwane umownie freonami. Nazwa „*freon*” dotyczyła zaledwie kilku czynników produkowanych przez amerykańskie firmy chemiczne (w tym przypadku chodzi o *Kinetic Chemicals Inc.* z siedzibą w Wilmington, USA), jednak ze względów ekologicznych zdecydowano o zakazie stosowania wszystkich czynników chlorowcopochodnych [35, 108,109]. Główną rolę w tych działaniach odegrały dwa akty prawne o zasięgu ogólnosiwiatowym:

- Protokół Montrealski z 1987 roku [115],
- Postanowienia Szczytu Ziemi w Rio de Janeiro z 1992 roku [114],

Na mocy Protokołu Montrealskiego, z późniejszymi postanowieniami jego sygn-



tariuszy, uzgodnionymi podczas następujących spotkań (m.in. Helsinki – 1989, Londyn – 1990, Wiedeń – 1995), wprowadzono zakaz stosowania czynników chłorowcopochodnych, w tym freonów. Najbardziej destrukcyjne w swoim oddziaływaniu na środowisko okazały się czynniki o symbolach CFC-R11 (w skrócie R11), CFC-R12 (w skrócie R12) oraz HCFC-R22 (w skrócie R22), ponieważ były one w głównej mierze odpowiedzialne za degradację stratosferycznej warstwy ozonowej [114,115].

Podczas międzynarodowych spotkań wypracowano również metodologię oceny destrukcyjnego oddziaływania czynników chłodniczych na środowisko naturalne. Zdefiniowano dwa podstawowe wskaźniki:

- ODP (*Ozone Depletion Potential*) – potencjał degradacji warstwy ozonowej, odniesiony do freonu R11, dla którego przyjęto ODP = 1,
- GWP (*Global Warming Potential*) – globalny potencjał tworzenia efektu cieplarnianego, odniesiony do dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>, dla którego przyjęto GWP = 1.

Oczywiście, dwa powyższe wskaźniki to najważniejsze obecnie spośród wielu dostępnych metod porównywania szkodliwości ekologicznej czynników chłodniczych. Jednak to właśnie wskaźniki ODP i GWP są najczęściej stosowane w treści wiążących dokumentów prawnych.

Oprócz wspomnianych wyżej współczynników GWP oraz ODP, w literaturze stosuje się również:

- HGWP (*Halocarbon Global Warming*) – globalny potencjał tworzenia efektu cieplarnianego, odniesiony do freonu R11, dla którego HGWP = 1,
- TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*) – całkowity równoważnik efektu cieplarnianego, ujmujący wpływ bezpośredni i pośredni warunków tworzenia efektu cieplarnianego (tzn. uwzględniający oddziaływanie związane z emisją samego czynnika oraz emisją na potrzeby produkcji energii).

Oprócz definicji danych wskaźników ważny jest również horyzont czasowy do jakiego są one odnoszone. Dla wskaźników ODP oraz GWP przyjmuje się domyślnie jako ITH (*Integral Time Horizon*) = 100 lat. Niekiedy przyjmuje się ITH = 500 lat. Określenie horyzontu czasowego danego czynnika chłodniczego, wskazuje się umieszczając jego wartość w indeksie dolnym, np. GWP<sub>100</sub>.

Podpisanie i ratyfikowanie Protokołu Montrealskiego uświadomiło społec-

ności międzynarodowej szkodliwość stosowania czynników chłodniczych typu CFC/HCFC. Skutkiem tego były wzmożone prace nad znalezieniem proekologicznych zamienników (substytutów) dla stosowanych dotychczasowo związków chemicznych, o odpowiednich właściwościach chłodniczych. W czasach sprzed Protokołu Montrealskiego o wyborze czynnika chłodniczego decydowały głównie jego własności termodynamiczne. Po podpisaniu Protokołu, ważną rolę zaczęły odgrywać ekologiczne skutki jego długotrwałego stosowania, objawiające się potencjałem do degradacji warstwy ozonowej i tworzenia efektu cieplarnianego.

Pod koniec XX wieku główny nacisk przy wyborze czynnika chłodniczego kładziono na niską wartość współczynnika ODP. Na przestrzeni wielu lat trwały prace nad znalezieniem i wprowadzeniem do użytkowania proekologicznych substytutów czynników R12 oraz R22. Wynikiem tych działań było opracowanie nowych typów czynników określonych symbolem HFC (hydrofluorowęglowodory), do których należy m. in. R23 i najbardziej rozpowszechniony R134a.

Właściwości czynnika o symbolu R134a były mocno zbliżone do R12. Nowy czynnik był przystosowany do pracy w szerokim zakresie urządzeń chłodniczych o małej i średniej wydajności chłodniczej oraz nisko- i średniotemperaturowych pomp ciepła, a także w obiegach ORC (Organic Rankine Cycle) [28,67,68,105].

Do grupy HFC zalicza się również czynnik R404A w postaci wysokotemperaturowej mieszaniny, będącej zamiennikiem R22. Cynniki chłodnicze z grupy HFC charakteryzują się wprawdzie zbliżoną do 0 wartością wskaźnika degradacji warstwy ozonowej ODP, ale jednocześnie mają bardzo wysokie wartości wskaźnika tworzenia efektu cieplarnianego  $GWP_{100}(R404A) = 3922$  oraz  $GWP_{100}(R134a) = 1430$  [116].

Na Konferencji Narodów Zjednoczonych, zwanej Szczytem Ziemi, który odbył się w Rio de Janeiro [114], w której uczestniczyli przedstawiciele 172 krajów świata, podpisano pięć ważnych dokumentów dotyczących ochrony środowiska. Jednym z nich była tzw. Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie Zmian Klimatu. Główny nacisk położono w tym dokumencie na zwiększającą się koncentrację gazów cieplarnianych, zwanych *F – gazami* lub gazami fluorowanymi, którym przypisano odpowiedzialność za zmiany klimatu. W tym samym czasie znacząco zwiększał się udział rynkowy R134a, o stosunkowo wysokim wskaźniku GWP. Wykonane jednak ówczesne badania, uzasadniające

jego stosowanie w maszynach i urządzeniach energetycznych nie uwzględniały wzrostu jego stężenia w powietrzu atmosferycznym. Szacuje się, że w okresie od 1994 do 2002 roku nastąpił przyrost stężenia czynnika R134a w powietrzu atmosferycznym od 0 do 25 ppt (cząstek na trylion) [127]. Na podstawie tych badań wykazano również, że przykładowo w czasie 14 lat eksploatacji samochodu osobowego (w krajach Unii Europejskiej) emisja czynnika R134a, pochodząca z układu klimatyzacji pojazdu jest równoznaczna emisji około 2 ton CO<sub>2</sub>, co odpowiada przejechaniu przez pojazd dodatkowych 13 tys. km [77]. Był to jeden z powodów, dla których podjęto decyzję o wyeliminowanie tego *F – gazu* z użytkowania.

Negatywny wpływ gazów cieplarnianych na środowisko stał się jednym z ważniejszych problemów, z którym muszą zmierzyć się współczesne społeczeństwa. Postanowienia stowarzyszeń i konferencji międzynarodowych przyjęły jako cel powstrzymania tego procesu [124,125,129]. Pierwszą, istotną legislacją dotyczącą gazów cieplarnianych obowiązującą w krajach Unii Europejskiej było Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady Europy nr 842/2006 z 17 maja 2006 roku w postaci Dyrektywy 2006/40/EC [125]. Dokument ten dotyczy planów eliminacji tzw. *fluorowanych gazów cieplarnianych*, a w szczególności: wodorofluorowęglowodorów, perfluorowęglowodorów, heksafluorku siarki oraz innych czynników zawierających w swym składzie fluor. Postanowienia o ograniczonym zakresie stosowania tych czynników chłodniczych dotyczyły m.in. czynników R134a, R404A, R32, R152a oraz R245fa. Regulacje wymuszały konieczność opracowania nowych czynników chłodniczych, spełniających określone wymagania w zakresie proekologicznego oddziaływania na środowisko.

Z dniem 1.01.2017 wprowadzono zakaz stosowania czynnika chłodniczego R134a w układach klimatyzacyjnych, instalowanych w nowo produkowanych pojazdach silnikowych [124]. Zgodnie z tymi wymaganiami, w instalacjach klimatyzacyjnych wyżej wymienionych pojazdów można korzystać wyłącznie z czynników o wskaźniku GWP nie wyższym niż 150, przy zachowaniu zerowego wskaźnika ODP [124].

Proponowane rozwiązania prawne nie zawsze są możliwe do bezpośredniej implementacji. Dowodem na niestabilność międzynarodowego stanu prawnego w zakresie fluorowanych gazów cieplarnianych jest uchylene Rozporządzenia nr 842/2006 r. [39,125] oraz wielokrotne zmiany w nowym Rozporządze-

niu Parlamentu Europejskiego i Rady nr 517/2014 z dnia 16 kwietnia 2014 roku [124]. Nowe akty prawne zakładają, że w horyzoncie czasowym do 2050 r. uzyska się redukcję emisji gazów cieplarnianych o 80 ÷ 90%, w stosunku do ich poziomu z 1990 r. Spełnienie tego celu powinno zahamować efekty globalnego ocieplenia oraz ograniczyć wzrost średniej temperatury ziemskiej do poziomu 2 K.

Jednym z celów pośrednich międzynarodowej polityki klimatycznej, w tym wypadku do roku 2030, jest redukcja emisji fluorowanych gazów cieplarnianych o 2/3 w stosunku do poziomu z 2010 r. Głównym narzędziem do uzyskania tej redukcji ma być międzynarodowa zgoda na zaniechanie ich dalszego stosowania. Największe znaczenie mają postanowienia dotyczące stacjonarnych urządzeń chłodniczych oraz pomp ciepła. Zakaz wprowadzania tych gazów do obrotu dotyczy kolejno:

- od 1.01.2020 r. – stacjonarnych urządzeń chłodniczych, które zawierają czynniki HFC o wskaźniku GWP = 2500 lub większym (lub których działanie jest od nich zależne);
- od 1.01.2022 r. – wieloagregatowych, scentralizowanych układów chłodniczych do zastosowań komercyjnych o mocy znamionowej 40 kW lub większej, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane o wskaźniku GWP = 150 lub większym (lub których działanie jest od nich zależne), z wyjątkiem obiegów chłodniczych I stopnia w układach kaskadowych, w których można stosować fluorowane gazy cieplarniane o wskaźniku GWP = 1500 lub większym;
- od 1.01.2025 r. – pojedynczych, dzielonych układów chłodniczych zawierających mniej niż 3 kg fluorowanych gazów cieplarnianych o wskaźniku GWP = 750 lub większym.

Zgodnie z międzynarodowymi uregulowaniami prawnymi w zakresie ograniczenia szkodliwego oddziaływania czynników roboczych na stratosferyczną warstwę ozonową oraz globalny efekt cieplarniany, konieczne będzie stosowanie w niedalekiej przyszłości czynników charakteryzujących się wskaźnikiem ODP = 0 oraz wskaźnikiem GWP < 150.

Właściwości czynników chłodniczych są ściśle związane z metodą ich produkcji, pochodzeniem oraz składem chemicznym. Raport firmy Bitzer [116] klasyfikuje je w następujący sposób:

- naturalne czynniki chłodnicze,
- syntetyczne czynniki chłodnicze poprzedniej generacji.

### 2.2.1. Naturalne czynniki chłodnicze

Do naturalnych czynników chłodniczych zalicza się następujące związki chemiczne:

- dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ),
- podtlenek azotu ( $\text{N}_2\text{O}$ ),
- amoniak ( $\text{NH}_3$ ; R717) oraz mieszaniny amoniakalne (np. R723),
- węglowodory: propan (R290), butan (R600), izobutan (R600a), propen (R1270),
- mieszaniny azeotropowe trójskładnikowe typu R124/R142b/R600a, o różnym udziale masowym składników.

**Dwutlenek węgla** (oznaczany symbolami  $\text{CO}_2$  lub R744) jest tanim i objętym względem większości materiałów konstrukcyjnych związkiem chemicznym, a dzięki dużej wartości ciepła parowania posiada wysoką jednostkową wydajność chłodniczą. Jednak jego własności termodynamiczne (punkt krytyczny:  $t_{kr} = 31^\circ\text{C}$  oraz  $p_{kr} = 7,4 \text{ MPa}$ ) wymagają najczęściej stosowania obiegu nadkrytycznego (lub transkrytycznego), tzn. po opuszczeniu sprężarki czynnik dopływa do chłodnicy pary przegrzanej (nie do skraplacza, jak w obiegach podkrytycznych), a proces skraplania możliwy jest dopiero po zdławieniu czynnika. Z racji wysokiej straty energii procesu dławienia, aby uzyskać zadowalającą efektywność energetyczną COP (*Coefficient of Performance*) obiegu, układy nadkrytyczne wymagają stosowania dodatkowych elementów, takich jak: rozprężarki, strumienice oraz regeneracyjne wymienniki ciepła. Ponadto, z racji niskiej temperatury krytycznej oraz możliwości powstawania fazy stałej czynnika (tzw. suchego lodu), układy zasilane  $\text{CO}_2$  wymagają dodatkowych zabezpieczeń, układu pomocniczego na czas postoju oraz skomplikowanego systemu sterowania [7].

**Podtlenek azotu ( $\text{N}_2\text{O}$ )** jest nieorganicznym, niepalnym, bezbarwnym i bezwonnym gazem stosowanym w medycynie jako anestetyk (znieczulacz). Z racji niskiego punktu krytycznego ( $36^\circ\text{C}$ ;  $7,2 \text{ MPa}$ ), podobnie jak  $\text{CO}_2$ , wymaga nadkrytycznego obiegu chłodniczego. Jednak jego punkt potrójny jest położony zdecydowanie niżej ( $-91^\circ\text{C}$ , a dla  $\text{CO}_2$  tylko  $-57^\circ\text{C}$ ) dzięki czemu pozwala opero-

wać w zdecydowanie niższych temperaturach. Mimo nieco większej efektywności niż CO<sub>2</sub> (około 16%) i niższemu ciśnieniu (około 19%), jego efektywność odbiega jednak od nowoczesnych fluorowanych czynników chłodniczych. Ponadto współczynnik GWP wynosi aż 240 [116].

**Amoniak (NH<sub>3</sub>; R717)** oraz jego mieszaniny znajdują zastosowanie przede wszystkim w instalacjach chłodniczych o dużej wydajności (przemysł spożywczy, farmaceutyczny, chemiczny, budowlany oraz naftowo-gazowy) oraz w wysokotemperaturowych pompach ciepła [126]. Jego wskaźniki wynoszą odpowiednio ODP = 0 oraz GWP < 1. Najpopularniejszą mieszaniną na bazie amoniaku jest czynnik R723, składający się w 60% z amoniaku oraz w 40% z eteru dimetylowego (DME) o charakterze azeotropowym [93,94]. Mimo, że jego zalety jak ekologiczność, niska cena oraz szeroka dostępność znane są od przeszło 100 lat, to jego toksyczność, palność oraz wysokie wymagania, co do materiałów konstrukcyjnych oraz szczelności instalacji skutecznie eliminują go z zastosowań konsumenckich. Natomiast w przypadku maszynowni dużych obiektów, przemysłowych obiektów chłodniczych jest on skutecznie wykorzystywany [126].

**Węglowodory: propan (R290), butan (R600), izobutan (R600a), propen (R1270)** posiadają dobre właściwości termodynamiczne. Ich główną zaletą jest łatwa produkcja, powszechny dostęp oraz niska cena. Ze względu na trudności zachowania odpowiednich warunków bezpieczeństwa w instalacji (węglowodory są palne) stosowane są obecnie tylko w małych układach. Dzięki temu, nawet w przypadku wycieku całego czynnika, jego stężenie nawet w małym pomieszczeniu nie przekroczy dolnej granicy palności [116].

**Mieszaniny azeotropowe trójskładnikowe typu R124/R142b/R600a**, w rzeczywistości zawierają tylko jeden czynnik naturalny – R600a. Pozostałe składniki – R124 oraz R142b klasyfikowane są jako *F-gazy*. Należy zatem mieć na uwadze wartości wskaźników ODP i GWP pozostałych jej składników: ODP(R124) = 0,022; GWP(R124) = 480; ODP(R142b) = 0,065 oraz GWP(R142b) = 2000. Stosując odpowiednie proporcje składników możliwe jest spełnienie wymagań co do wartości współczynnika GWP [116].

### 2.2.2. Syntetyczne czynniki chłodnicze poprzedniej generacji

Do tej grupy zalicza się następujące czynniki chłodnicze:

- R134a,
- R407C,
- R410A,
- R404A.

Najbardziej rozpowszechnionym w tej grupie jest **czynnik R134a**, dla którego wartość GWP = 1430. Czynnik R134a (1,1,1,2 tetrafluoroetan) jest jednorodnym czynnikiem chłodniczym powszechnie dotychczas wykorzystywanym w klimatyzacji (głównie samochodowej) oraz w średnio- i wysokotemperaturowych przemysłowych, handlowych oraz domowych (zamrażarki, chłodziarki, pompy ciepła) systemach chłodniczych. Stosowany jest również, jako składnik niektórych mieszanin oraz nośnik aerozoli medycznych i technicznych. Był stosowany, jako zamiennik zwłaszcza czynnika R12, a obecnie jest zastępowany przez R1234yf oraz R1234ze.

Nie mniejszą rolę w przemyśle chłodniczym odgrywa **R404A** (GWP = 3922). R404 jest mieszaniną (52%<sub>mas</sub> R143a – 1,1,1 trifluoroetan, 44% R125 - pentafluoroetan i 4% R134a, masowo) bardzo popularną w przemysłowych układach chłodniczych o średniej wydajności (mroźnie, chłodnie) oraz bardzo często występuje (obok R407C) w maszynowniach chłodniczych obsługujących np. sklepy wielkopowierzchniowe. Stosowany jest również w transporcie chłodniczym oraz dużych instalacjach klimatyzacyjnych. Był stosowany jako zamiennik czynników R502 oraz R22, a obecnie jest zastępowany przez R507 oraz R448A.

**R407C** (GWP = 1774) jest mieszaniną (23%<sub>mas</sub> R32 - difluorometanu, 25% R125 i 52% R134a, masowo), stosowaną głównie w małych instalacjach domowych i w instalacjach komercyjnych, takich jak: agregaty wody lodowej, centrale wentylacyjne, klimatyzatory, pompy ciepła oraz wysoko- i średniotemperaturowe urządzenia chłodnicze.

**R410A** (GWP = 2088) to mieszanina (50% R32 i 50% R125) stosowana głównie w handlowych i domowych urządzeniach niskotemperaturowych, takich jak: pompy ciepła, klimatyzatory, agregaty wody lodowej czy centrale wentylacyjne. Był stosowany, jako zamiennik R22.

Należy jednak podkreślić, że czynniki R407C, R410A oraz R404A, jako

mieszaniny zeotropowe - ze względu na różne właściwości fizyczne poszczególnych składników przemiany fazowe nie przebiegają izotermicznie; szerokość zakresu temperatur dla przemian nazywana jest *poślizgiem temperaturowym*. Występowanie poślizgu temperaturowego jest jedną z głównych przyczyn niestabilności podczas przemian fazowych.

Syntetyczne czynniki chłodnicze poprzedniej generacji, pomimo dobrych właściwości technicznych oraz szerokiej dostępności i względnie niskiej cenie, jako fluorowane gazy cieplarniane zostały zakwalifikowane do wycofania z użytkowania [116].

### 2.2.3. Syntetyczne czynniki chłodnicze nowej generacji

Eliminacja stosowanych do tej pory czynników chłodniczych wymusza wprowadzenie na ich miejsce nowych, proekologicznych zamienników. Najczęściej proponowane są następujące czynniki chłodnicze:

- izomery R1234, w tym:
  - R1234yf – zamiennik R134a dedykowany do zastosowania w samochodowych instalacjach klimatyzacyjnych,
  - R1234ze(E) – zamiennik R134a dedykowany do zastosowania w instalacjach pompy ciepła,
- R152a – zamiennik R134a,
- R452A – zamiennik R134a,
- R32 – zamiennik R410A,
- R442A – zamiennik R404A i R507,
- R507 – obecnie stosowany zamiennie z R404A,
- R448A – zamiennik R404A.

Wszystkie czynniki chłodnicze posiadają indywidualne właściwości fizyczne i termodynamiczne, które różnią się niekiedy diametralnie między sobą. Najważniejszymi z nich są:

- ciśnienie nasycenia,
- ciepło parowania,
- ciśnienie oraz temperatura punktu krytycznego,
- ciśnienie oraz temperatura punktu potrójnego,



- normalna temperatura wrzenia,
- zeotropowość mieszaniny wieloskładnikowej,
- oddziaływanie z materiałami konstrukcyjnymi oraz substancjami smarnymi.

**Ciśnienie nasycenia**  $p_s$  dla czynnika jednorodnego jest funkcją temperatury nasycenia  $t_s$ , zaś dla mieszaniny zeotropowej zależy również od jej składu. Ciśnienie nasycenia odpowiadające temperaturze górnego źródła ciepła decyduje m. in. o grubości ścian przewodów hydraulicznych układu chłodniczego oraz gęstości czynnika w stanie gazowym, która wraz z **ciepłem parowania** decyduje o gabarytach wymienników ciepła oraz ich wewnętrznym podziale na strefy: ciekłą, parową oraz dwufazową. Te same parametry decydują również o prędkości przepływu oraz ilości czynnika w układzie, wymaganych, aby osiągnąć daną wydajność.

Parametry **punktu krytycznego** ograniczają maksymalną temperaturę obiegów podkrytycznych (skraplanie następuje bez konieczności obniżenia ciśnienia poniżej wartości krytycznej). Natomiast dla nieco bardziej skomplikowanych obiegów transkrytycznych istnieje możliwość powstania fazy stałej w sytuacjach serwisowych, bądź awaryjnych.

**Normalna temperatura wrzenia** ogranicza minimalną temperaturę obiegów, ponieważ ze względów technicznych w instalacjach opartych na czynnikach chłodniczych nie powinno występować podciśnienie.

Podczas doboru czynnika chłodniczego należy również uwzględnić jego oddziaływanie na materiały konstrukcyjne oraz substancje smarne tak, aby zapewnić bezpieczną i stabilną pracę instalacji na długie lata.

W odniesieniu do wymienionych wyżej parametrów można zidentyfikować właściwości poszczególnych czynników chłodniczych, co umożliwia określenie zakresu ich przydatności do zastosowania w określonych instalacjach [116].

- **Izomery R1234**

Fluorowane izomery propenu zawierające związki nienasycone (o podwójnym wiązaniu typu węgiel – węgiel) są zaliczane do grupy olefin lub alkenów [23,60,72]. Identyfikuje się je za pomocą symbolu R (*refrigerant*) oraz zamiennie symbolami: HFO (*hydrofluoroolefiny*), HFA (*hydrofluoroalkeny*) oraz HFC (*hydrofluorowęglowodory*). W szczególności, w odniesieniu do zastosowań w techni-

ce chłodniczej wyróżnia się dwa izomery, to znaczy: 2, 3, 3, 3 – tetrafluoropropen ((R1234yf) oraz 1, 3, 3, 3 – tetrafluoropropen, czyli R1234ze(E) [2,48]. Niektóre fluorowane izomery zwane są też stereoizomerami, z oznaczeniami przedstawionymi w Załączniku 1 w tablicy Z.1.1. Natomiast w tablicy Z.1.2. przedstawiono niektóre charakterystyczne właściwości termodynamiczne wymienionych izomerów fluorowanych.

**Czynnik R1234yf** proponowany jest do zastosowania w instalacjach klimatyzacyjnych pojazdów silnikowych, zamiast obecnie stosowanego czynnika chłodniczego R134a. W pracach autorów [2,48] przedstawiono krytyczne uwagi o zakresie wykorzystania izomerów podanych w tablicach Z.1.1. i Z.1.2. Stwierdzono, że proponowane fluorowane izomery propenu: R1225, R1234 oraz R1243 wykazują różne niekorzystne właściwości. Ze względu na właściwości palne izomerów R1243 autorzy odradzają ich zastosowanie, natomiast dla czynników z grupy R1225 – podnoszone są obawy w zakresie właściwości toksycznych.

**Czynniki R1234ze(E)** oraz **R1234ze(Z)** należą do tej samej grupy bazowej stereoizomerów fluorowanych, jednak mają różniące się właściwości. Izomer R1234ze(Z) powstaje, jako produkt uboczny podczas produkcji czynnika R1234ze(E). Wykaz nowych czynników chłodniczych R1234yf i R1234ze(E) został ujęty w raporcie dotyczącym tych czynników opracowanym przez firmę Bitzer (17 wydanie) [116]. W Załączniku 1 w tablicy Z.1.3. zawiera porównanie tych czynników zamieszczone w raporcie. Czynnik HFO-1234ze różni się od HFO-1234yf budową molekularną. Jego właściwości termodynamiczne pozwalają na wykorzystaniem go, jako czynnik chłodniczy. R1234ze jest czynnikiem niepalnym oraz posiada grupę bezpieczeństwa A2L, przy czym ma również bardzo niski potencjał tworzenia efektu cieplarnianego  $GWP = 6$  oraz  $ODP = 0$ . Objętościowa wydajność chłodnicza oraz ciśnienie robocze stanowią około 75% wartości ustalonych dla HFO-1234yf [23,60,72]. A zatem czynnik HFO-1234ze(E) stanowi potencjalny zamiennik dla R134a w układach o wysokiej temperaturze parowania. W jego przypadku zaleca się stosowanie olejów poliestrowych POE i PAG. W Załączniku 1 w tablicy Z.1.4 przedstawiono charakterystyczne właściwości izomeru R1234ze(E), natomiast na rysunku Z.1.1 wykres  $lgp - h$  dla czynnika R1234ze(E)

- **Czynnik R152a**

Czynnik R152a jest proponowany, jako zamiennik R134a, do którego jest bardzo podobny pod względem wartości jednostkowej, objętościowej wydajności chłodniczej (95% tej osiągniętej przez R134a), ciśnienia roboczego (90% tego osiągniętego przez R134a) i efektywności energetycznej. Dzięki korzystniejszemu masowemu natężeniu przepływu oraz gęstości pary, spadek ciśnienia w przepływie jest o 40% niższy niż w przypadku R134a. Czynnik R152a znajduje od wielu lat zastosowanie jako składnik niektórych mieszanin, natomiast nie wykorzystuje się go jako jednorodnego czynnika chłodniczego (z powodu małej zawartości fluoru R152a jest palny – klasa bezpieczeństwa A2). Szczególną jego zaletą jest bardzo niski wskaźnik potencjału tworzenia efektu cieplarnianego ( $GWP = 124$ ). W tabelicy Z.1.5. przedstawiono podstawowe właściwości R152a, a na rys. Z.1.2 wykres  $lgp-h$  (Załącznik 1).

Względy bezpieczeństwa wymagają stosowania odpowiednich rozwiązań technicznych oraz każdorazowej analizy ryzyka związanego z wykorzystaniem czynnika R152a. Dlatego mało prawdopodobne jest stosowanie R152a w układach klimatyzacji samochodowej.

- **Czynnik R450A**

R450A to niepalna mieszanina zeotropowa czynników chłodniczych R134a ( $42\%_{\text{mas}}$ ) oraz R1234ze(E) ( $58\%_{\text{mas}}$ ) o wskaźniku  $GWP = 2604$  oraz  $ODP = 0$ , stosowana jako zamiennik czystego R134a w średniotemperaturowych instalacjach chłodniczych i klimatyzacyjnych, takich jak: pompy ciepła, agregaty wody lodowej, dystrybutory do napojów, pozostałe urządzenia handlowe. Stosowany jest także jako czynnik w układach kaskadowych z  $CO_2$  (na I stopniu kaskady). W tabelicy Z.1.6 przedstawiono podstawowe właściwości R450A, a na rys. Z.1.3 wykres  $lgp-h$  dla tego czynnika (Załącznik 1)

- **Czynnik R32**

Czynnik R32 proponowany jest jako zamiennik R410A. Jest to czynnik jednorodny, wykorzystywany głównie, jako składnik mieszanin HFC. Od niedawna znalazł również zastosowanie, jako wydajny czynnik chłodniczy w instalacjach klimatyzacyjnych bytowych i komercyjnych nowej generacji o niskim wskaźniku GWP. Czynnik R32 jest klasyfikowany do grupy A2L (o niskim stopniu palności), głów-

nie do instalacji AC zaprojektowanych specjalnie dla niego, z uwagi na wysokie ciśnienie robocze wymagające odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych. R32 cechują się wartości ODP = 0 oraz GWP = 675. W tablicy Z.1.7 przedstawiono podstawowe właściwości R152a, a na rys. Z.1.4 wykres *lgp-h* (Załącznik 1).

- **Czynnik R442A**

R442A, znany również jako RS-50, jest mieszaniną HFC przeznaczoną do niski- i średniotemperaturowych zastosowań chłodniczych, m.in. w chłodnictwie handlowym. Może być stosowana jako zamiennik dla instalacji wykorzystujących R22, R404A lub R507 np. w chłodnictwie handlowym i transportowym. W tablicy Z.1.8 przedstawiono podstawowe właściwości R152a, a na rys. Z.1.5 wykres *lgp-h* (Załącznik 1).

- **Czynnik R448A**

R448A jest mieszaniną zeotropową opracowaną do stosowania, jako zamiennik dla freonów R22 i R404A (R507) w istniejących instalacjach lub jako czynnik docelowy w nowoprojektowanych układach. Stosowany jest na szeroką skalę w chłodnictwie do niskich, średnich i wysokich wartości temperatury. Charakteryzuje się niskim współczynnikiem GWP oraz wysoką sprawnością energetyczną. Wykorzystywany jest w chłodnictwie przemysłowym: chłodniach, mroźniach oraz w chłodnictwie komercyjnym, m.in. w gastronomicznych instalacjach chłodniczych. Zastosowanie R448A wymaga wymiany oleju oraz wymiany i regulacji niektórych podzespołów w instalacji według odpowiednich procedur. Posiada wskaźniki: ODP = 0 oraz GWP = 1386. W tablicy Z.1.9 przedstawiono podstawowe właściwości R152a, a na rys. Z.1.6 wykres *lgp-h* (Załącznika 1).

- **Czynnik R507**

R507 jest mieszaniną 1,1,1,2 trifluoroetanu i pentafluoroetan o składzie chemicznym: 50%<sub>mas</sub> R125 i 50% R143a. Jest jednym z najbardziej popularnych, syntetycznych czynników chłodniczych, powszechnie wykorzystywanych w chłodnictwie przemysłowym tj. w: chłodniach handlowych, mroźniach oraz w chłodnictwie komercyjnym, m.in. w instalacjach chłodniczych w sklepach. Stosowany również w centralach klimatyzacyjnych oraz w transporcie chłodniczym. Ze względu na

swój skład (mieszanina azeotropowa) może być stosowany do sprężarek odśrodkowych oraz w układach pompowych (parowniki zalane). Z uwagi na przepisy dotyczące ochrony klimatu, jego zastosowanie jest obecnie ograniczane na rzecz innych czynników chłodniczych o niższym wskaźniku GWP takich, jak np.: R407F, R448A (Solstice N40), R744 itd. Obecnie jest zamiennikiem dla wycofanych już z obrotu czynników R404A, R502 lub R22 (lub ich zamienników), ale jego zastosowanie wymaga wymiany oleju na POE oraz wymiany niektórych podzespołów w instalacji wg odpowiednich procedur. W tabelicy Z.1.10 przedstawiono podstawowe właściwości R507, a na rys. Z.1.7 wykres  $lgp-h$  (Załącznik 1).

### 2.3. Podsumowanie

Użycie izomerów R1234 oraz czynnika chłodniczego R448A, jako substytutów obecnie najczęściej stosowanych czynników chłodniczych R134a i R404A, powinna poprzedzić szczegółowa analiza wszystkich ich właściwości. Jednym z istotnych elementów tej analizy jest określenie wpływu niestabilności o charakterze dynamicznym na procesy przemian fazowych tych substytutów. W szczególności istotnym jest weryfikacja tego typu badań przeprowadzonych dla czynników R134a i R404A w odniesieniu do dedykowanych dla nich proekologicznych zamienników. Eksperymenty dotyczące R134a i R404A prowadzone były dla przemiany fazowej skraplania realizowanej w minikanalach rurowych, które stanowią obecnie podstawę w budowie elementów wymiany ciepła w maszynach i urządzeniach energetycznych [82,85].



### 3. Przegląd stanu wiedzy dotyczący wpływu niestabilności na proces skraplania w przepływie

#### 3.1. Charakterystyka procesu skraplania w przepływie w warunkach oddziaływań niestabilności

Przemiany fazowe skraplania lub wrzenia realizowane są w obszarze pary nasyconej mokrej – w zakresie między lewą i prawą krzywą graniczną (na rys. 3.1). Teoretycznie, dla jednorodnego czynnika chłodniczego, przemiana fazowa skraplania przebiega w warunkach ustalonych, jako izobaryczno-izotermiczna. Oznacza to, że dla określonego ciśnienia nasycenia  $p_s = \text{const}$  zachowany jest stały poziom temperatury nasycenia  $T_s$ , przy czym  $T_s = f(p_s)$ . Tego typu proces teoretyczny rozpoczyna się w stanie pary nasyconej suchej ( $x = 1$ ) – na prawej krzywej granicznej i realizowany jest do stanu cieczy nasyconej ( $x = 0$ ) – na lewej krzywej granicznej. Podczas realizacji niepełnej przemiany skraplania, jego stan końcowy może znajdować się w obszarze pary nasyconej mokrej, przy określonym stopniu suchości ( $x = 0 \div 1$ ). Parę nasyconą mokrą traktuje się, jako typowy gaz rzeczywisty, natomiast parę przegrzaną można modelować w przybliżeniu jako gaz doskonały (jeżeli jego stan leży w niezbyt dużym oddaleniu od prawej krzywej granicznej  $x = 1$ ). Do opisu parametrów stanu gazu rzeczywistego stosuje się termiczne równanie stanu. Wśród stosowanych w praktyce termicznych równań stanu gazu rzeczywistego wymienia się:

równanie *van der Waalsa*:

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2}, \quad (3.1)$$

równanie *Dieterici*:

$$p = \frac{RT}{v - b} \exp\left[-\frac{a}{RTv}\right], \quad (3.2)$$

równanie *Berthelota*:

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2 T}, \quad (3.3)$$

równanie *Redlicha-Kwonga*:

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{T^{0.5}v(v + b)}, \quad (3.4)$$

gdzie  $a$  i  $b$  są określane z warunków stabilności gazu rzeczywistego w punkcie krytycznym lub doświadczalnie (dla danego rodzaju gazu rzeczywistego) [6,7, 9,19,21].

Mechanizm przemiany fazowej czynnika roboczego jest procesem skomplikowanym, zależnym od jego właściwości i założeniu, że układ może pozostawać w stanach stabilnych lub niestabilnych. Towarzyszące tworzeniu się nowej fazy ciekłej lub gazowej niestabilności, mogą zakłócić przebieg tego procesu w taki sposób, że jego rzeczywisty obraz będzie znacznie odbiegał od modelu teoretycznego. W analizie jakościowej wpływu różnych parametrów na przemiany fazowe wrzenia lub skraplania czynników roboczych można wykorzystać najprostszą wersję termicznego równania stanu gazu rzeczywistego *van der Waalsa* w postaci wielomianu trzeciego stopnia:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right) \cdot (v - b) = RT, \text{ a stąd } pv^3 - (pb + RT)v^2 + av - ab = 0. \quad (3.5)$$

Ze względu na temperaturę  $T$ , jako parametr w równaniu (3.5) uzyskać można trzy jego rozwiązania (rys.3.1):

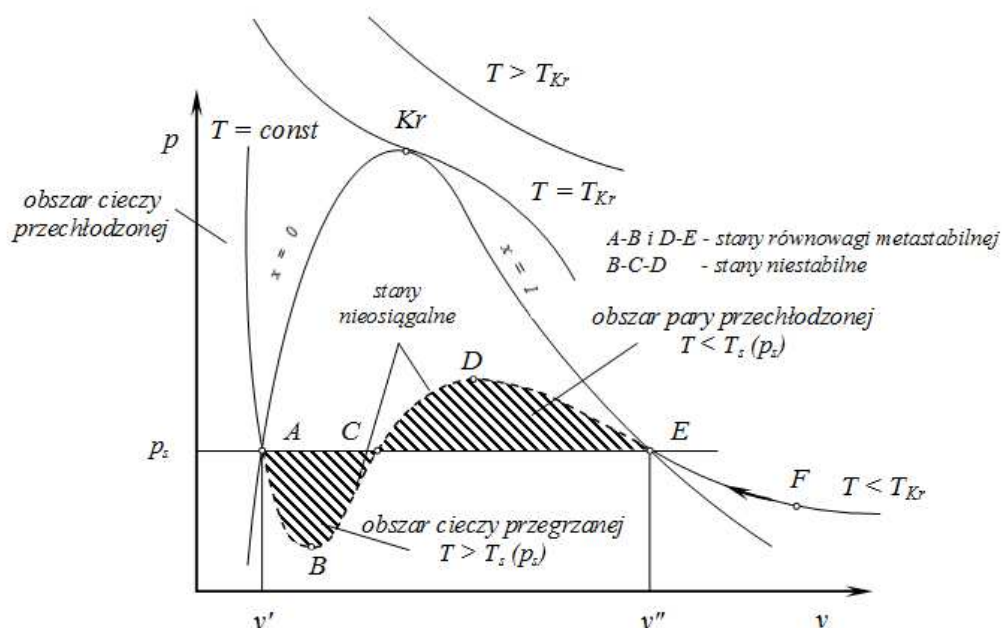
- trzy pierwiastki rzeczywiste, którym odpowiada przebieg izotermy  $T = const$ . Z dwoma wartościami ekstremum (punkty  $B$  i  $D$ ) w obszarze pary nasyconej mokrej,
- jeden pierwiastek potrójny, w którym izoterma  $T_{Kr} = const$  ulega przegięciu w punkcie krytycznym  $Kr$ ,
- dwa pierwiastki zespolone i jeden rzeczywisty, gdy przebieg izotermy w obszarze  $T > T_{Kr}$  ma charakter monotoniczny.

Podkreślić należy, że równanie *van der Waalsa* powstało po wprowadzeniu dwóch poprawek do termicznego równania stanu gazu doskonałego *Clapeyrona*, dotyczących uwzględnienia objętości własnej cząsteczek gazu i oddziaływań międzycząsteczkowych, czyli tzw. *covolumenu* oraz ciśnienia kohezijnego w objętości gazu rzeczywistego. Ograniczają one co prawda opis ilościowy zmiany stanu gazu rzeczywistego, jednak umożliwiają poprawną interpretację jakościową jego zachowania w różnych stanach zarówno w obszarze pary, jak i cieczy [22,90].

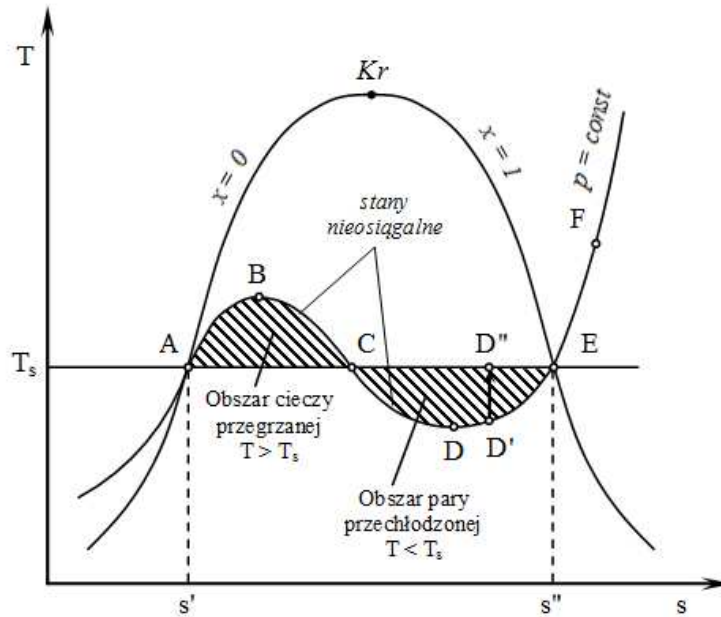
Izoterma  $T = const$  ( $T < T_{Kr}$ ) pokazana na rys. 3.1 opisuje ciągłą przemianę czynnika roboczego od stanu cieczy nasyconej  $A$  do stanu pary przegrzanej



$F$  (lub odwrotnie). Analizując przebieg tej izotermy należy brać pod uwagę i oddzielnie rozpatrywać jej kolejne odcinki. Odcinek  $F-E$  tej izotermy obrazuje rzeczywisty proces sprężania izotermicznego w zakresie pary przegrzanej. Po osiągnięciu stanu pary nasyconej (punkt  $E$ ), rzeczywisty proces sprężania nie przebiega zgodnie z izotermą *van der Waalsa*  $E-D-C-B-A$ , lecz zgodnie z odcinkiem linii prostej  $E-A$ . Punkt  $E$  obrazuje stan czynnika, w którym osiąga on ciśnienie nasylenia  $p_s$  (jest to początek procesu skraplania). Z analizy teoretycznej równania *van der Waalsa* wynika, że proces skraplania jest przemianą izotermiczno-izobaryczną ( $T = const$ ;  $p_s = const$ ) w zakresie od stanu  $E$  do stanu  $A$ . Istnieje jednak możliwość (w pewnych określonych przypadkach) realizacji procesu skraplania wzdłuż odcinka  $E-D$ , gdy proces przebiega dostatecznie wolno w obszarze stanów równowagi metastabilnej. Dla ułatwienia analizy tego zjawiska można zastosować interpretację przebiegu izobary *van der Waalsa* w układzie współrzędnych  $T-s$  (rys. 3.2). Izotermy i izobary w obu tych układach współrzędnych pokrywają się na odcinku prostej  $E-A$  (proces jest izobaryczno-izotermiczny).

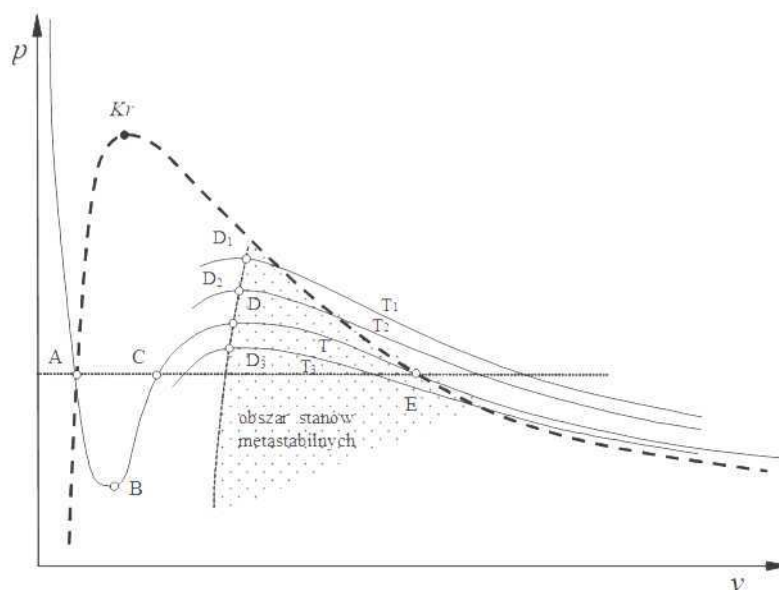


Rys. 3.1. Interpretacja graficzna przebiegu izotermy *van der Waalsa* w układzie współrzędnych  $p-v$  [5,6,21]



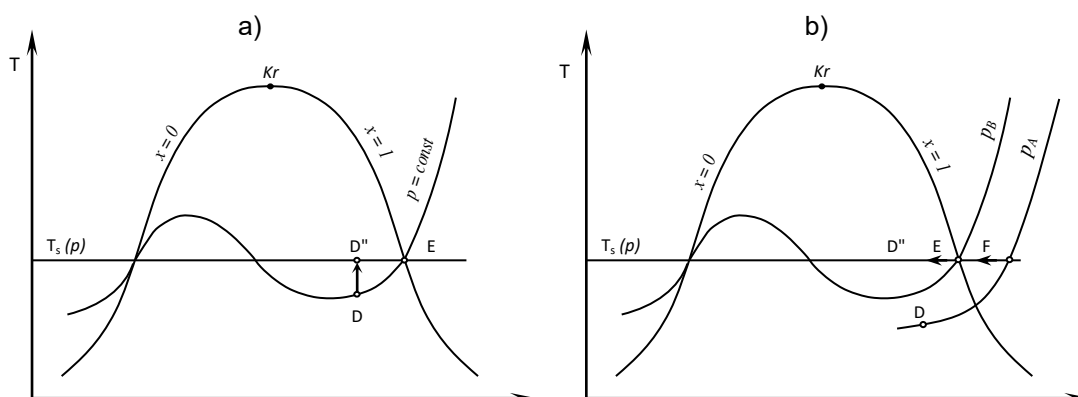
Rys. 3.2. Interpretacja graficzna izobary *van der Waalsa* w układzie współrzędnych  $T$ - $s$  [5,6,21]

Na rys. 3.2 obserwuje się, że realizacja przemiany fazowej skraplania wzdłuż linii  $E$ - $D'$ , przy stałym ciśnieniu  $p_s = const$ , wiąże się ze spadkiem temperatury pary i wejściem w obszar pary nasyconej mokrej przechłodzonej, dla której  $T < T_s(p)$ . Ten odcinek izobary, wraz z przynależnym mu obszarem, obrazuje stany pary przechłodzonej znajdujące się w równowadze metastabilnej. Przemiany  $B$ - $D$  oraz  $D$ - $B$  (rys.3.2) wynikające z rozwiązania równania *van der Waalsa* nie mogą być zrealizowane w warunkach równowagowych. Nie ma bowiem możliwości zrealizowania takiego procesu, w którym następowałby równoczesny spadek ciśnienia i objętości właściwej czynnika roboczego. Możliwa jest natomiast realizacja przemiany fazowej, której przebieg pokrywa się z odcinkiem izobary  $E$ - $D'$  w warunkach równowagi metastabilnej, dla której temperatura wynosi  $T < T_s$ . Proces ten jednak musi się odbywać odpowiednio wolno. Jakiegokolwiek zakłócenie tego procesu spowoduje natychmiastowe przejście parametrów czynnika do stanu  $D''$  równowagi stabilnej. Dalej proces będzie przebiegał już zgodnie z odcinkiem  $D''$ - $A$ . Proces skraplania może być realizowany nie tylko wzdłuż izoterm  $T$ , ale również  $T_1, T_2, T_3, \dots$ , w charakterystycznych stanach metastabilnych (rys. 3.3). Linia łącząca punkty  $D$  ( $D_1, D_2, D_3, \dots$ ), określa granicę możliwych do uzyskania stanów równowagi metastabilnej pary mokrej przechłodzonej.



Rys.3.3. Interpretacja możliwości występowania obszaru stanów równowagi metastabilnej podczas skraplania [5,6,21]

Oceniając wpływ niektórych parametrów na proces skraplania, można rozpatrywać różne zakłócenia tego procesu, występujące w instalacjach rzeczywistych. Podczas procesu skraplania prowadzonego pod stałym ciśnieniem  $p_s = const$  może nastąpić gwałtowna zmiana temperatury, interpretowana graficznie jako „skokowe przeniesienie” stanu pary czynnika roboczego w obszar metastabilny (stan  $D$ ) – rys. 3.4a. Powrót do stanu równowagi stabilnej (stan  $D''$ ) może nastąpić dopiero po upływie czasu *relaksacji*, kiedy zainicjowany zostanie proces skraplania właściwego czynnika roboczego. Wpływ gwałtownej zmiany ciśnienia na proces skraplania, przy stałej temperaturze, przedstawia rys. 3.4b.



Rys. 3.4. Wpływ zakłócenia w postaci skokowej zmiany: a) temperatury ( $p = const$ ), b) ciśnienia ( $T = const$ ) na zmianę stanu czynnika podczas skraplania [21]

Wystąpienie zakłóceń przebiegu przemiany fazowej, pokazanych na rys 3.4, może objawiać się w postaci oscylacyjnych zmian lokalnych parametrów układu. Zjawisko to obrazuje falowy charakter ośrodka dwufazowego i może przyjmować postać np. akustycznej fali ciśnieniowej przemieszczającej się wraz z falami zakłóceniami [13-15,19÷22,25,100,131÷133].

Jakościowy opis przemian fazowych wskazuje, że procesy rzeczywiste, mające miejsce w maszynach i urządzeniach energetycznych znacznie odbiegają od procesów idealnych (wzorcowych). Istotny wpływ na wystąpienie takich stanów mają oddziaływania o charakterze zakłóceniovym.

Niestabilności wpływające destabilizująco na stan układu mogą mieć charakter zewnętrzny lub wewnętrzny. Jeżeli zakłócenia powstają w wyniku wzajemnego oddziaływania, na przykład współpracujących ze sobą elementów instalacji, wówczas mamy do czynienia z *zakłóceniami zewnętrznymi*. Zakłócenia wewnętrzne powstają wskutek oddziaływań związanych z przebiegiem mechanizmu przemiany fazowej, zmianami struktury przepływu oraz właściwościami czynnika. Źródłem *zakłóceń wewnętrznych* może być także gradient temperatury na ściance kanału, który jest jednym z kryteriów tworzenia się nowej fazy.

Jak już wspomniano w rozdziale 2.1.2, mieszaniny wieloskładnikowe, zwłaszcza zeotropowe, podlegają zakłóceniom wewnętrznym spowodowanymi zjawiskiem poślizgu temperaturowego.

Jeżeli założy się teoretycznie, że przemiana fazowa skraplania w przepływie w kanale ma być prowadzona w warunkach ustalonych, stabilnych, to taki układ pozostaje w lokalnej równowadze termodynamicznej. W procesie skraplania oznacza to m.in., że początek procesu nastąpi przy określonych parametrach układu, które mogą być powtarzalne. W procesach rzeczywistych (nieodwracalnych) występują oddziaływania wywołujące niestabilności przemiany fazowej. Układ może wtedy wchodzić w obszary stanów metastabilnych, *quasistabilnych* lub niestabilnych. Trzeba zaznaczyć, że przemianom fazowym zachodzącym w warunkach rzeczywistych zawsze towarzyszą pewne zakłócenia, przy czym ich skala oddziaływań wpływa na rodzaj niestabilności układu [6,7].

## 3.2. Niestabilności przemiany fazowej skraplania

### 3.2.1. Niestabilności statyczne

Niestabilności statyczne występują wtedy, gdy źródłem zakłóceń jest zmiana parametrów stanu układu [15], np. oscylacyjne oddziaływania nukleacyjne. W odróżnieniu od niestabilności dynamicznych, zanik procesu związanego z niestabilnościami statycznymi ma swoje źródło w zakończeniu wzrostu oscylacji w wyniku zmiany kierunku przepływu [3÷6]. Zatem informacje o zmianie stanu ustalonego pozwalają przewidzieć, kiedy nastąpi początek procesu niestabilności statycznej (układ ma więc charakter deterministyczny). Niestabilności statyczne prowadzą najczęściej do innego, nowego stanu ustalonego lub też do okresowej oscylacji parametrów wokół tego stanu. Analiza stanu wiedzy w tym zakresie wykazała, że wzrost fluktuacji niestabilności statycznych osiąga wartości skończone, co jest wynikiem osiągnięcia przez układ tzw. *amplitudy cyklu granicznego*. Z założenia amplituda ta nie może być większa od połowy średnicy hydraulicznej rozpatrywanego kanału [65,74,82,134,140].

Oddziaływania o charakterze nukleacyjnym związane są ze „wzrostem” i gwałtownym odparowaniem pierwszych kropli pojawiających się w procesie skraplania. Pojawienie się pojedynczych kropli, które tworzą w kanale tzw. *mostki cieczowe* (rys. 3.8) mogą spowodować wystąpienie tzw. *periodycznych niestabilności statycznych*. Objawiają się one oscylacyjnymi, dwukierunkowymi „odbiciami” przepływu czynnika roboczego. Odnotowuje się okresy występowania tego zjawiska wynoszące od 20 sekund do nawet 4 godzin. Czas zależny jest od średnicy hydraulicznej kanału [82,134].

Innym rodzajem niestabilności statycznych są powszechnie znane w literaturze zakłócenia *Ledineggo* [16,69,87,147]. Objawiają się one, m.in. w postaci nagłego spadku natężenia przepływu, jako odpowiedzi układu na zwiększenie oporów przepływu mieszanin dwufazowych. Konsekwencją jest spadek ciśnienia związany z przemianą fazową, który powoduje oddziaływania o charakterze zakłóceniovym występujące w określonym stanie układu. W ujęciu termodynamicznym oznacza to całkowity spadek ciśnienia (będący sumą tarcowego, przyspieszeniowego i dynamicznego spadku ciśnienia) zmniejsza się wraz ze wzrostem przepływu [34,82]

W miniukładach mogą także wystąpić niestabilności, charakterystyczne jedynie dla tego typu kanałów. Przykładowo, jak podaje [87], gdy średnica hydrauliczna minikanalu spełnia kryterium:

$$d_h < 0.3 \sqrt{\sigma / (\rho_l - \rho_v)}, \quad (3.6)$$

gdzie:

$\sigma$  – napięcie powierzchniowe,

$\rho_l$  i  $\rho_v$  – gęstości fazy ciekłej i gazowej,

to niestabilności o charakterze statycznym są wynikiem oddziaływania napięcia powierzchniowego.

Oddziaływania o charakterze statycznym mogą w sposób bezpośredni powodować wystąpienie zakłóceń dynamicznych.

### 3.2.2. Niestabilności dynamiczne procesu skraplania

W przypadku, gdy głównymi przyczynami zakłóceń układu są oddziaływania cieplne lub hydrodynamiczne, powodujące wyraźne efekty inercyjne, wówczas zakłócenia przepływu należą do tak zwanych niestabilności dynamicznych. Oddziaływania te mogą być przenoszone w ośrodkach dwufazowych za pomocą różnych mechanizmów, a w szczególności przez:

- fale akustyczne – niestabilności o charakterze ciśnieniowym [5,6];
- fale zmiany gęstości strumienia masy – będące skutkiem oscylacyjnych zmian stopnia zapełnienia, czyli tzw. niestabilności masowe [46,88,89,91, 142,146];
- fluktuacje temperatury ścianki kanału, będące wynikiem niestabilności termicznych [1,90,111,144].

Rozprzestrzenianie się zaburzeń w ośrodkach dwufazowych w postaci fal ciśnieniowych, temperaturowych lub falowe zmiany strumienia masy czynnika roboczego powodują powstawanie niestabilności o tzw. *charakterze falowym*. Samo pojęcie „fala” jest zdefiniowane, jako zaburzenie rozprzestrzeniające się w ośrodku lub przestrzeni. Fale przenoszą energię z jednego miejsca do drugiego, bez transportu materii. W przypadku fal mechanicznych cząsteczki ośrodka, w którym rozchodzi się fala, oscylują wokół położenia równowagi. Matematycznie fala stanowi rozwiązanie równania falowego. Jest to dowolna funkcja różniczo-

walna spełniająca to równanie. Rozwiązania równania falowego tworzą przestrzeń liniową, która jest tzw. *przestrzenią Hilberta*. Jako bazę tej przestrzeni można wybrać drgania podstawowe w postaci przebiegów harmonicznym (dla prostokątnego układu współrzędnych), a w wypadku innych symetrii zjawiskami właściwymi stają się inne bazy (jak np. harmoniki sferyczne czy bardziej skomplikowane funkcje specjalne). Dowolne rozwiązanie równania falowego, to znaczy dowolną falę, można przedstawić, jako sumę szeregu funkcji bazowych, a więc przebiegów harmonicznym. Na tym polega zasada analizy harmonicznym wprowadzonej przez *Fouriera*. Fale harmoniczne opisuje się za pomocą zmiennych w postaci: częstotliwość, pulsacja, długość fali, amplituda fali, okres oraz faza. W ośrodkach dwufazowych podstawą odniesienia dla rozpatrywania właściwości falowych układu jest analiza ruchu falowego ośrodka jednofazowego, określonego w gazodynamice (będącej działem mechaniki płynów). Z analizą tą związane jest zagadnienie przenoszenia zaburzeń ze skończoną prędkością w płynie „ściśliwym”. „Ściśliwość” płynu oznacza jego podatność na zmiany objętości, odpowiadające wywołanym zmianom ciśnienia [22]. W gazodynamice-akustyce prędkość rozprzestrzeniania się fali zakłóceńowej jest opisywana za pomocą jednego równania cząstkowego hiperbolicznym, tzw. równania falowego. Opisuje ono zmiany ciśnienia  $p$  (lub prędkości), przy której dochodzi do „zadławienia” przepływu. Jest to prędkość dźwięku, opisana następującą postacią termodynamiczną [3÷6,21,22,24,92,101,132]:

$$c = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s^{\frac{1}{2}}, \quad (3.7)$$

gdzie:

$\left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s$  - jest parametrem charakteryzującym ściśliwość płynu (zmianą gęstości  $\rho$  spowodowaną przyrostem ciśnienia  $p$ ).

W przeciwieństwie do ośrodków jednofazowych, w przepływach wielofazowych uwzględnia się efekt nieodwracalności zachodzących procesów. Zmiana jednego parametru powoduje zmianę innych, które określają między innymi, prędkość przemieszczania się zakłóceń w tych ośrodkach [3÷6,19÷21]. Modelowanie takich przepływów wiąże się, z uwzględnieniem *dyssypacji* energii oraz *dyspersyjności* tych ośrodków. Pod nazwą „dyssypacja” rozumie się występowa-

nie procesów nieodwracalnych, które prowadzą do produkcji entropii i w konsekwencji do tłumienia przemieszczających się w przepływie zaburzeń [3÷6,82,134], natomiast „dyspersyjność” ośrodka dwufazowego oznacza zależność funkcyjną prędkości rozprzestrzeniania się zaburzeń od ich częstotliwości.

Wymienione właściwości przepływów dwufazowych pary i cieczy mają związek z naruszeniem stanu równowagi termodynamicznej. Wewnętrzne procesy, dążące do przywrócenia równowagi układu przebiegają na tyle długo, że czas ich trwania (czas relaksacji) staje się bliski czasowi zmian zachodzących w ośrodku podczas przepływu. Procesy relaksacyjne prowadzą w konsekwencji do dyspersyjności ośrodka, w którym za rozprzestrzenianie się zaburzeń odpowiada tzw. prędkość fazowa:

$$v_f(\varpi) = \frac{\varpi}{k(\varpi)}, \quad (3.8)$$

gdzie:

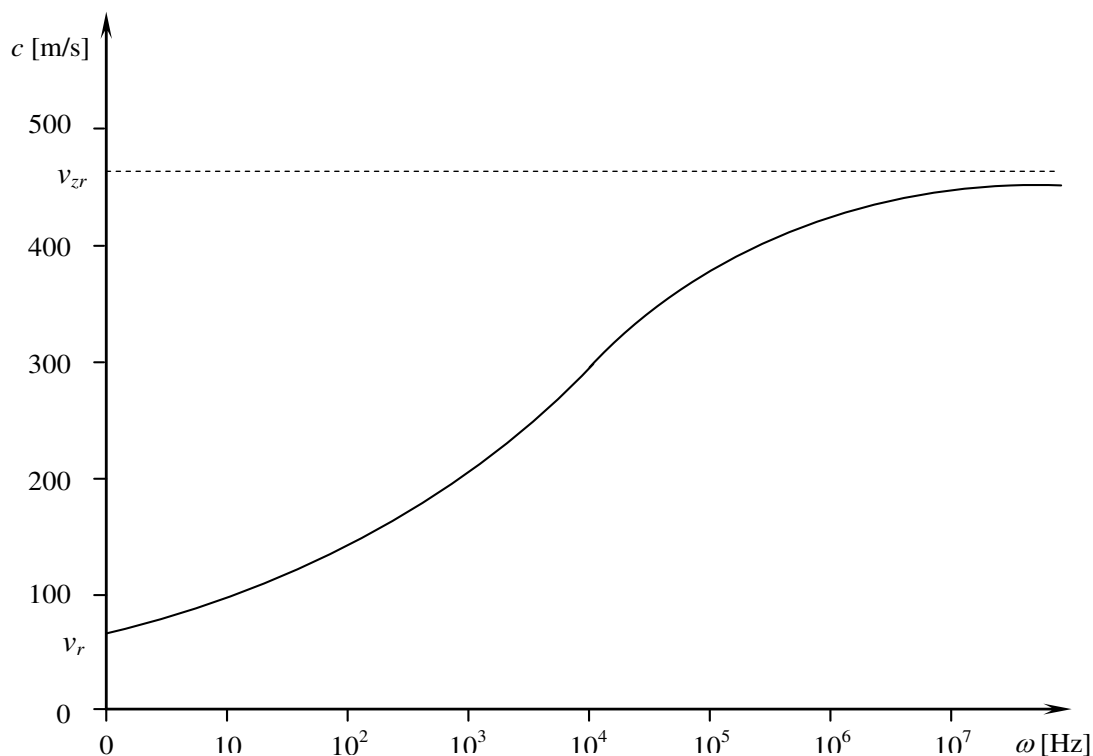
$\varpi$  – częstość kołowa występujących zakłóceń,

$k$  – liczba falowa definiowana jako  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,

$\lambda$  – długość fali.

Jeśli częstotliwość występujących zaburzeń jest mała ( $\varpi \rightarrow 0$ ), to mówimy o prędkości równowagowej  $v_r = v_f(\varpi \rightarrow 0)$ . Prędkość ta określa stan, w którym czas  $\tau = 1/\varpi$  zachodzących zmian w przepływie jest dużo większy od czasu relaksacyjnego ( $\tau \gg \theta$ ) [31÷33]. W sytuacji, gdy występują zaburzenia o wysokich wartościach częstotliwości ( $\varpi \rightarrow \infty$ ) mamy do czynienia z prędkością zamrożoną  $v_{zr} = v_f(\varpi \rightarrow \infty)$ . Stan układu charakteryzuje się krótkim czasem relaksacji ( $\tau \ll \theta$ ) dążącym do zera co powoduje, że układ nie jest w stanie „nadażyć” za wywołanymi zmianami. Schemat rozkładu prędkości zamrożonej i równowagowej przedstawiono na rysunku 3.5.





Rys. 3.5. Przebieg zależności dyspersyjnej dla przepływu dwufazowego w kanałach konwencjonalnych [82,85]

W praktyce nie jest możliwe wygenerowanie zakłóceń o nieskończenie dużej częstotliwości. Oprócz tego, zwiększając częstotliwość następuje generowanie coraz krótszych fal. Fakt ten wymusza konieczność wyznaczenia granicy stosowalności prędkości zamrożonej  $v_{zr}$ . Została ona opisana długością fali rozprzestrzeniających się zaburzeń w ośrodku dwufazowym. Opracowanie teoretyczne oraz badania eksperymentalne [82,101] wykazały, że przy częstotliwościach większych od  $\varpi_g = \frac{2\pi}{\theta}$  system dwufazowy może być traktowany, jako zamrożony, dla  $\theta = 1 \div 0,01$  s. Częstotliwość graniczna  $\varpi_g$  odpowiada długości granicznej fali zaburzeń  $\lambda_g = 1 \div 0,1$  m, przy prędkości fazowej  $v_f = 10$  m/s. W przepływach dwufazowych prędkość zamrożona  $v_f$  utożsamiana jest również z prędkością dźwięku lub równoważną prędkością krytyczną [40].

Zjawiska falowe występujące w przepływach wielofazowych charakteryzują się następującymi cechami [3÷6,21]:

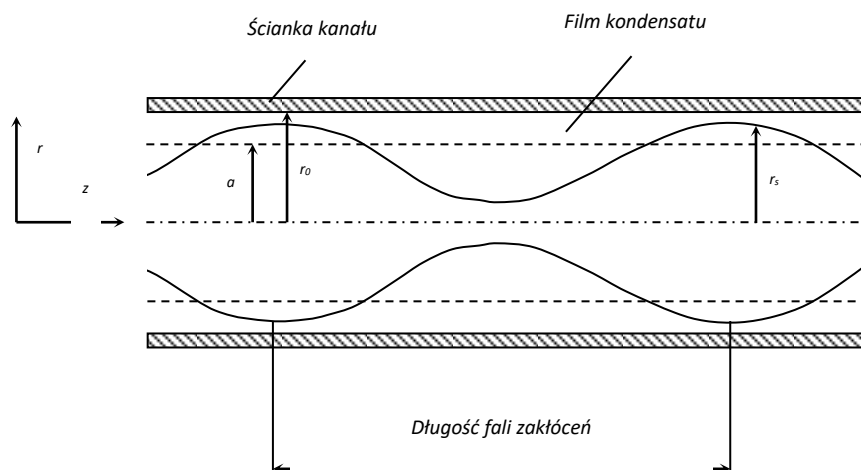
- prędkości rozprzestrzeniania się zaburzeń ciśnieniowych oraz temperaturowych są bezpośrednio zależne od częstotliwości i wielkości ich występowania,
- w ośrodku dwufazowym rozchodzenie się zaburzeń następuje wolniej, niż

- w ośrodkach jednofazowych cieczy lub pary,
- zjawiska falowe mają wpływ na udział objętościowy obu faz podczas skraplania,
  - dyssypacja energii w ośrodkach dwufazowych powoduje tłumienie rozprzestrzeniania się zaburzeń, stąd w tych ośrodkach nie mamy do czynienia z klasycznymi formami stacjonarnych fal uderzeniowych, charakterystycznych dla ośrodków jednofazowych,
  - istnieje możliwość wystąpienia tzw. przepływu pseudokrytycznego, który nie ma miejsca w układzie jednofazowym.

### 3.3. Niestabilności skraplania w minikanalach rurowych

W przypadku przemiany fazowej skraplania w mini- i mikrokanalach, zarówno pojedynczych, jak i kanałach równoległych (multiportach), mechanizm powstawania niestabilności dynamicznych i statycznych oraz ich oddziaływanie udokumentowano w wystarczającym stopniu dla stosowanych obecnie czynników chłodniczych [82]. Równocześnie odnotowuje się znaczącą lukę informacyjną dotyczącą niestabilności przemiany fazowej skraplania substytutów tych czynników realizowanej w tego rodzaju układach.

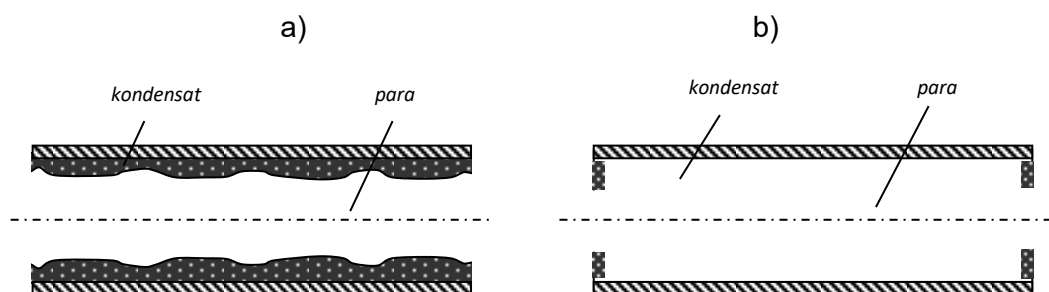
Niestabilności przemiany fazowej skraplania w minikanalach są ściśle związane z tzw. „oddziaływaniami kapilarnymi” (ang.: *capillary force*). Zjawisko to jest wynikiem oddziaływań fazy parowej na powierzchnię filmu kondensatu. Przepływająca w rdzeniu kanału para, która przemieszcza się z inną niż ciecz prędkością wywołuje hydrodynamiczne oddziaływania na powierzchni rozdziału faz. Powoduje to wzrost naprężeń powierzchniowych na granicy rozdziału faz i wystąpienie niestabilności w postaci tzw. „zafalowania” warstwy kondensatu (rys. 3.6) [38,47,134]



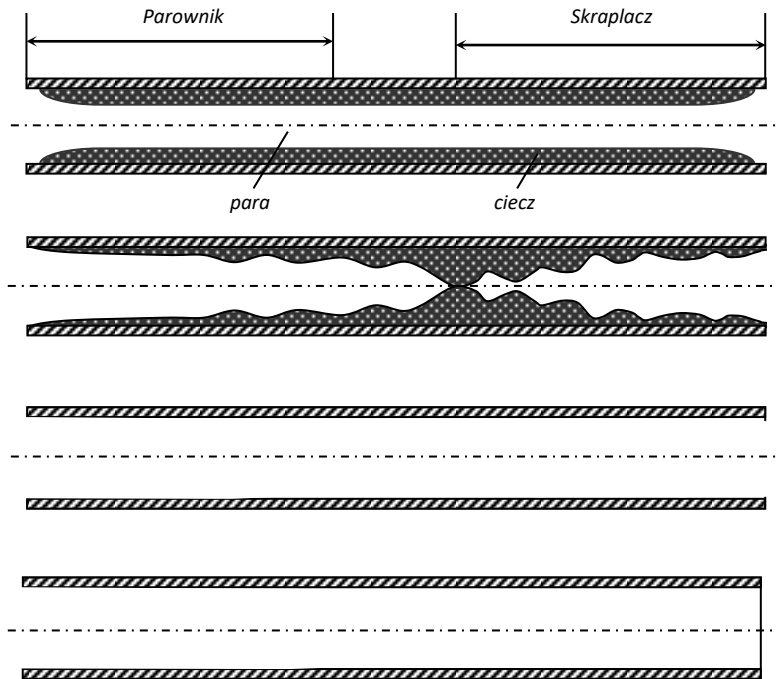
Rys. 3.6. Graficzna interpretacja zafalowania warstwy kondensatu [82,134]

Należy podkreślić, że w przypadku kanałów o małych średnicach (minikanalów), oddziaływania kapilarne mają znaczący wpływ na przemianę fazową, a do opisu tego zjawiska stosuje się tzw. model niestabilności *Rayleigha*.

Według opracowań [29,41,51,52], powierzchnia warstwy kondensatu jest zawsze niestabilna. Objawia się to w postaci fal powierzchniowych warstwy ciekłej. W wyniku tego „zafalowania”, grubość filmu kondensatu może osiągnąć wielkość równą połowie średnicy hydraulicznej kanału. W konsekwencji zaczną powstawać tzw. *mostki cieczowe*, których formowanie się jest w minikanalach źródłem niestabilności opisanych, jako: *pierścieniowy przepływ kapilarny* (ang.: *capillar-collar-flow*), *pęcherzykowy przepływ kapilarny* (ang.: *capillary-bubble-flow*) (rys. 3.7) i *kapilarne blokowanie przepływu* (ang.: *capillary blocking*) (rys. 3.8) [27,96÷98,128,130]. Zjawiska te są ściśle związane z prędkością przepływu fazy parowej w rdzeniu kanału.



Rys. 3.7. Graficzna interpretacja: a) *pierścieniowego przepływu kapilarnego* oraz b) *pęcherzykowego przepływu kapilarnego* [82,134]



Rys. 3.8. Graficzna interpretacja faz kapilarnego blokowania się przepływu [82,134]

Z *pierścieniowym przepływem kapilarnym* mamy do czynienia wtedy, gdy warstwa kondensatu jest cienka, a przepływająca z dużą prędkością para w osi kanału powoduje oscylacyjne zafalowanie powierzchni fazy ciekłej. Periodyczność przepływu fazy parowej powoduje, że przepływ następuje przy zachowaniu stałej długości fali zakłóceńowej na powierzchni kondensatu.

Przyrost warstwy fazy ciekłej, wynikający ze wzrostu stopnia kondensacji, który powoduje zmniejszenie prędkości przepływającej fazy parowej, prowadzi w minikanalach do gwałtownego wystąpienia tzw. *mostków cieczowych*. Jest to wynik połączenia filmu kondensatu w miejscach, w których jego „zafalowanie” osiąga maksymalną wartość amplitudy, równą połowie średnicy hydraulicznej minikanalu. *Mostki cieczowe* dzielą przepływającą fazę parową tworząc tzw. *pęcherze*. Prowadzi to do *pęcherzykowego przepływu kapilarnego*. W sytuacji, gdy siła napędowa przepływu kondensatu nie jest wystarczająco duża, aby pokonać opory przepływu, wówczas dochodzi do jego zablokowania. Zjawisko to jest znane jako tzw. *blokada kapilarna* i występuje w minikanalach rurowych o dowolnym kształcie pola przekroju poprzecznego. Jest to wynikiem znacznie mniejszej prędkości filmu kondensatu w minikanalach, niż w kanałach konwencjonalnych [29,41,50,51].

### 3.4. Podsumowanie

Analiza literatury z zakresu wpływu niestabilności dynamicznych na proces skraplania w przepływie, prowadzi do stwierdzenia, że oddziaływania o charakterze falowych niestabilności dynamicznych mają duży wpływ na problemy eksploatacyjne pracy maszyn energetycznych, w systemach automatyki chłodniczej i ciepłej oraz w systemach zasilania. Są to zjawiska niepożądane, mogące prowadzić do awarii lub zniszczenia tych układów. Często są przyczyną tzw. uderzeń hydraulicznych lub cieplnego zmęczenia materiału. Rozpoznanie i określenie występowania tych zjawisk ma duże znaczenie dla zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa pracy urządzeń i instalacji [21,22,82,85].

Kolejnym, istotnym zagadnieniem jest stwierdzenie, że prędkość fazy parowej w minikanalach jest na tyle niewielka, że nie dochodzi do rozpadu filmu kondensatu w wyniku hydrodynamicznych oddziaływań w obszarze objętym przepływem w kierunku przeciwnym do pierwotnego. W związku z tym, pojawienie się *mostka cieczowego* w minikanale prowadzi automatycznie do *blokady kapilarnej* oraz wystąpienia tzw. „*martwego*” obszaru w strefie przechłodzenia skroplin. Wynika to z gwałtownej kondensacji pęcherzy parowych w kierunku zgodnym z przepływem czynnika, czego skutkiem jest wystąpienie tzw. *korka cieczowego*. Takie wystąpienie *blokady kapilarnej* w procesie skraplania prowadzi do chwilowego zatrzymania przepływu. Zjawisko to ma znaczący wpływ na wydajność cieplną procesu skraplania w minikanalach, ponieważ zmniejsza się długość efektywnej strefy wymiany ciepła. Zmniejszeniu ulega długość obszaru przemiany dwufazowej. Zjawisko to występuje jedynie w kanałach o średnicy mniejszej niż 5 mm i jest ściśle związane z prędkością fazy gazowej [34,92].

Istotnym jest również stwierdzenie, że o ile niestabilności dynamiczne dla przepływów w minikanalach zostały zadowalająco rozpoznane i opisane dla dotychczas stosowanych czynników chłodniczych, to brak jest obecnie dostępnych informacji dotyczących wpływu tego rodzaju zakłóceń na dwufazową przemianę skraplania w minikanalach dla substytutów tych czynników, w odniesieniu do niestabilności o charakterze oscylacyjnym.



## 4. Geneza, cel i zakres tematu pracy

### 4.1. Geneza tematu pracy

Jak już wspomniano w rozdziale 2.2, era zastosowań czynników chłodniczych chlorowcopochodnych (zwanymi powszechnie freonami) bezpowrotnie przeszła już do historii, a obecna polityka klimatyczna Unii Europejskiej zakłada minimalizację destruktywnego wpływu nowych czynników chłodniczych na środowisko. W związku z powyższym, w najbliższym czasie w wielu instalacjach chłodniczych nastąpi wymiana czynnika chłodniczego R134a na R1234yf lub R1234ze oraz czynnika R404A na R507 lub R448A. Koniecznym zatem jest gruntowne poznanie wszystkich właściwości eksploatacyjnych nowych czynników chłodniczych, w tym wpływu niestabilności o charakterze dynamicznym na proces przemiany fazowej skraplania. W szczególności dotyczy to procesu skraplania realizowanego w minikanalach rurowych.

### 4.2 Hipoteza pracy

Wyniki badań analitycznych oraz eksperymentalnych skraplania w minikanalach mają pozwolić na udzielenie odpowiedzi na następujący problem:

- jaki jest wpływ niestabilności o charakterze dynamicznym na proces przemiany fazowej skraplania w minikanalach rurowych proekologicznych czynników chłodniczych oznaczonych symbolami R1234ze(E), R1234yf, R507A i R448a przewidzianych jako zamienniki dla dotychczas stosowanych R134a i R404A; oraz wymagającą weryfikacji hipotezę:
- częstotliwość generowania niestabilności dynamicznych podczas skraplania proekologicznych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych powoduje zmiany prędkości ich przemieszczania oraz wpływa na wielkość strefy skraplania właściwego.

### 4.3. Cel pracy

Celem niniejszej rozprawy jest określenie wpływu niestabilności o charakterze dynamicznym na proces przemiany fazowej skraplania w minikanalach rurowych

dla nowych, proekologicznych czynników chłodniczych przewidzianych, jako zamienniki dla dotychczas stosowanych czynników R134a i R404A.

Badaniami procesu przemiany fazowej skraplania w przepływie w minikanalach objęto następujące czynniki chłodnicze: R1234yf, R1234ze, R507A oraz R448A. Proces przemiany fazowej zrealizowano w warunkach skraplania ustalonego i nieustalonego w przepływie przez minikanaly rurowe o średnicy hydraulicznej w zakresie  $d_h = 1,40 \div 3,30$  mm.

#### 4.4. Zakres i spodziewany wpływ uzyskanych wyników

Poznanie mechanizmu przemieszczania się zaburzeń w skraplającym się proekologicznym czynnikiem chłodniczym ma pozwolić na dokonanie oceny przyczyn i skutków tych niestabilności, wywoływanych przez oddziaływania zewnętrzne. Rozpoznanie wpływu niestabilności dynamicznych na proces skraplania substytutów dotychczas stosowanych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych będzie miało decydujące znaczenie:

- **poznawcze w zakresie:**
  - rozpoznania oraz opisu jakościowego i ilościowego zjawisk towarzyszących skraplaniu substytutów czynników chłodniczych w minikanalach w warunkach niestabilności hydrodynamicznych,
  - wykonania analizy teoretycznej i eksperymentalnej tych zjawisk, w celu poszerzenia dotychczasowych metod ich opisu,
  - rozszerzenia stanu wiedzy w rozpatrywanym obszarze.
- **porównawcze w zakresie:**
  - porównania wpływ niestabilności dynamicznych o charakterze periodycznym na proces skraplania w minikanalach dotychczasowych fluorowanych czynników chłodniczych i ich zamienników,
  - wykonania analizy zastosowania istniejących metod obliczeniowych stosowanych dla obecnie użytkowanych czynników chłodniczych w odniesieniu do proponowanych zamienników.
- **metodyczne w zakresie:**
  - propozycji własnych metod obliczeniowych opisujących prędkości rozprzestrzeniania się niestabilności dynamicznych dla zamienników stoso-



wanych obecnie czynników chłodniczych.

#### 4.5. Plan koncepcja realizacji celu pracy

Realizacja planowanego celu pracy związana jest z koniecznością przeprowadzenia badań eksperymentalnych. W związku z powyższym w planie eksperymentu oraz analizie uzyskanych wyników założono:

1. Przeprowadzenie badania eksperymentalnego wpływu niestabilności dynamicznych o charakterze periodycznym na proces skraplania w minikanalach rurowych izomeru czynnika chłodniczych R1234 w odmianach R1234yf i R1234ze wprowadzonych do użytkowania jako substytutów czynnika R134a oraz R507 i R448A wprowadzanych do użytkowania jako substytutów czynnika R404A. Badania obejmą następujący zakres:
  - określenie prędkości przemieszczania się sygnałów ciśnienia w postaci akustycznej fali ciśnieniowej,
  - określenie prędkości przemieszczania się sygnałów zmiany temperatury ścianki kanału w postaci tzw. *frontu skraplania*.
2. Wykonanie badania mającego na celu określenie wpływu niestabilności na współczynnik przejmowania ciepła podczas skraplania czynników chłodniczych: R1234yf, R1234ze, R507 i R448A w minikanalach rurowych, a w tym:
  - wyznaczenie lokalnego stopnia suchości  $x_i$ ,
  - wyznaczenie lokalnej gęstości strumienia ciepła,
3. Przeprowadzenie badania mającego na celu rozpoznanie wpływu niestabilności o charakterze periodycznym na wzrostu oporów przepływu w minikanalach rurowych, w szczególności:
  - określenie spadku ciśnienia podczas skraplania czynnika chłodniczego w warunkach ustalonych,
  - określenie spadku ciśnienia podczas skraplania czynnika chłodniczego w warunkach dynamicznych niestabilności ciśnieniowych,
  - określenie masowego natężenia przepływu czynnika chłodniczego na dopływie do sekcji pomiarowej i na wypływie z sekcji pomiarowej w warunkach ustalonych,
  - określenie masowego natężenia przepływu czynnika chłodniczego na dopływie do sekcji pomiarowej i na wypływie z sekcji pomiarowej w warunkach ustalonych,

kach nieustalonych.

Wyniki przeprowadzonych badań oraz ich interpretację przedstawiono w kolejnych rozdziałach niniejszego opracowania.

## 5. Badania eksperymentalne

### 5.1. Cel badań eksperymentalnych

W celu udowodnienia postawionej hipotezy, podanej w rozdziale 4.2 niniejszej pracy, wykonano badania eksperymentalne dotyczące wpływu zaburzeń generowanych okresowo na parametry opisujące proces skraplania w przepływie w minikanalach rurowych nowych, proekologicznych czynników chłodniczych: R1234ze, R1234yf, R507 i R448A. Eksperymenty przeprowadzono w typowym zakresie parametrów roboczych cieplno-przepływowych występujących w jedno-stopniowym, sprężarkowym urządzeniu chłodniczym pracującym w warunkach niestabilności dynamicznych o charakterze okresowym. Przyjęto, że zakres częstotliwości występowania zakłóceń będzie zawarty w zakresie  $f = 0,2 \div 5$  Hz.

### 5.2. Stanowisko pomiarowe

W celu uzyskania porównywalnych wyników badań procesu skraplania w warunkach niestabilności dynamicznych dla dotychczas stosowanych czynników chłodniczych, z ich proekologicznymi zamiennikami wykorzystano stanowisko badawcze zlokalizowane w Laboratorium Katedry Energetyki. Stanowisko umożliwia wykonanie pomiarów:

- zamiennie dla alternatywnych czynników chłodniczych R1234ze, R1234yf, R507A i R448A,
- w kanałach pojedynczych,
- w minikanalach o średnicy hydraulicznej  $d_h = 1,40; 1,44; 1,92; 2,30$  i  $3,30$  mm,
- parametrów cieplno-przepływowych skraplania czynników w minikanalach,
- w przepływie dla warunków ustalonych i nieustalonych skraplania,
- podczas zakłóceń o charakterze dynamicznym, okresowym,
- umożliwiających zmiany wartości wybranych wielkości, które mają szczególnie wpływ na rozwój niestabilności, w tym: gęstości strumienia masy, gęstości strumienia ciepła, stopnia suchości pary oraz stopnia zapełnienia,
- w warunkach lokalnych i uśrednionych.

W celu realizacji pomiarów zaadaptowano i zmodernizowano laboratoryjne stanowisko badawcze, wykorzystywane do pomiarów wpływu zaburzeń dynamicz-

nych na proces skraplania czynników chłodniczych R134a i R404A w minikanalach rurowych, a w tym [73÷76,78÷85]:

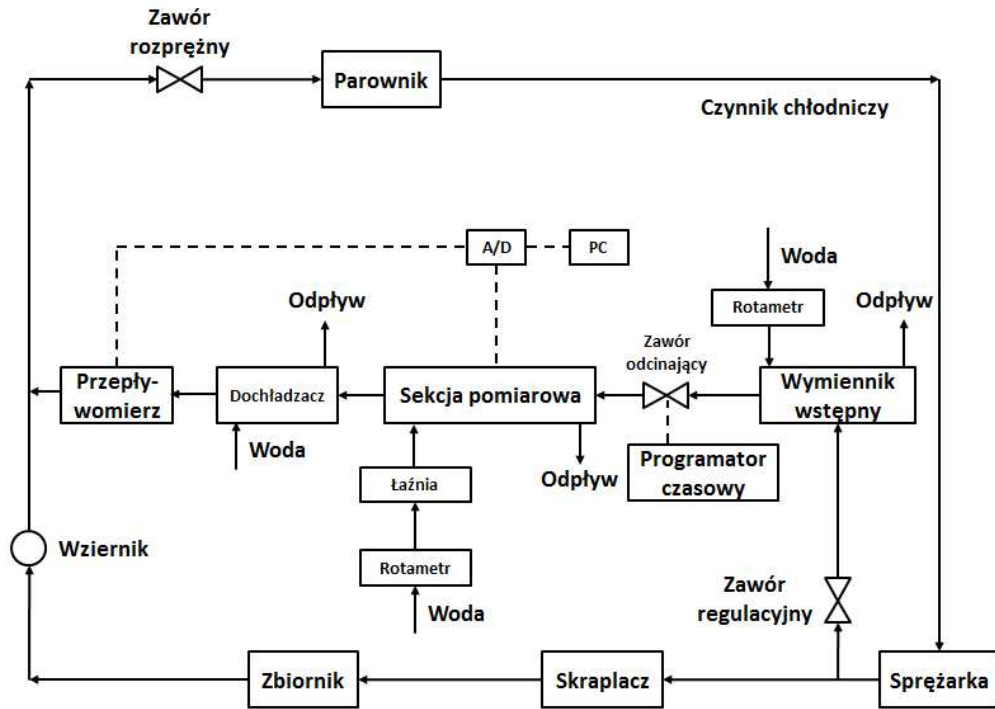
- instalacji agregatów chłodniczych, dedykowanych do badanych czynników chłodniczych R1234ze, R1234yf, R507 i R448A,
- modyfikacji systemu pomiarowego wykorzystującego karty pomiarowe, o częstotliwości próbkowania min. 500 kHz dla pomiaru ciśnienia,
- modyfikacji systemu pomiarowego wykorzystującego karty pomiarowe o częstotliwości próbkowania min. 1 MHz dla pomiaru temperatury,
- modyfikacji i zmiany oprogramowania z DasyLab Lite na DasyLab Pro.

Widok ogólny stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 5.1, jego schemat ideowy na rys. 5.2, natomiast sekcji pomiarowej kolejno na rys. 5.3 oraz 5.4.

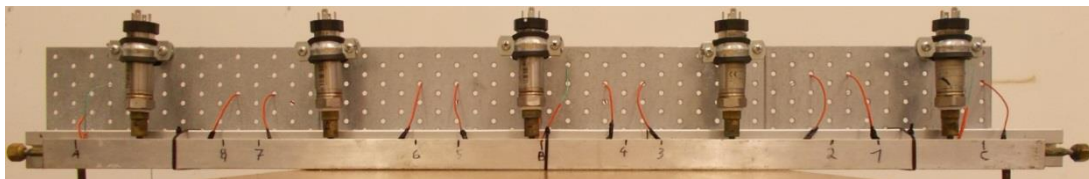
Metodykę określenia dokładności zastosowanych urządzeń pomiarowych oraz wykonanych pomiarów przedstawiono w Załączniku 5.



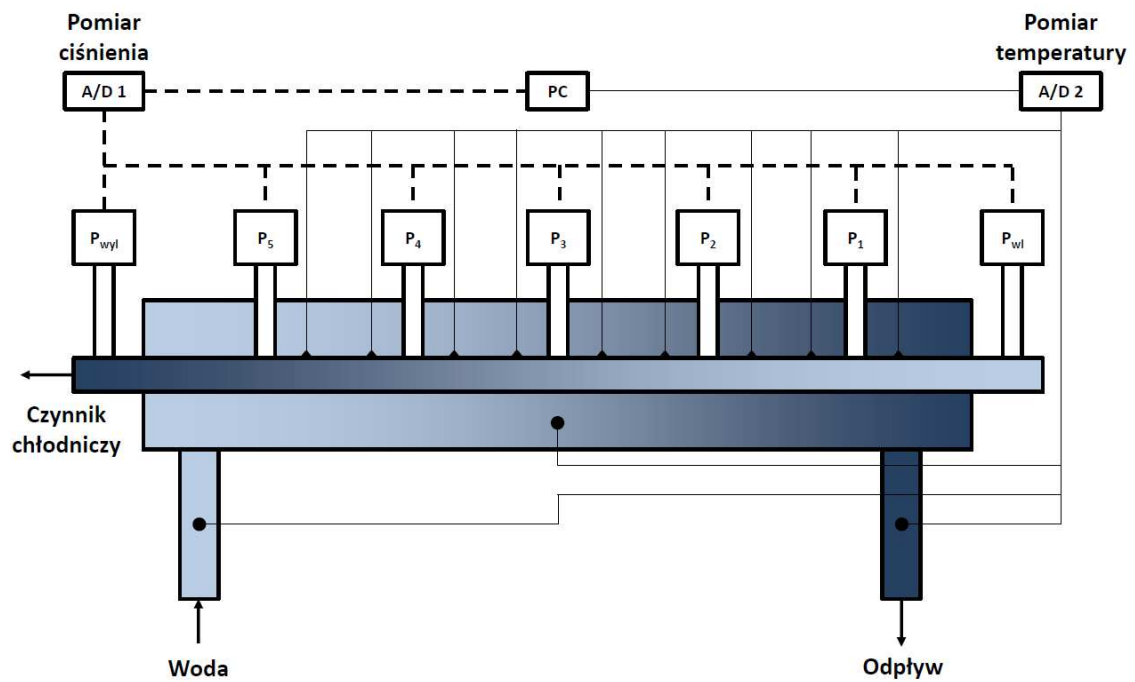
Rys. 5.1. Widok ogólny stanowiska badawczego



Rys. 5.2. Schemat ideowy stanowiska badawczego



Rys. 5.3. Widok ogólny sekcji pomiarowej



Rys. 5.4. Schemat ideowy sekcji pomiarowej

### 5.3. Metodyka badań eksperymentalnych

Na rys. 5.2 przedstawiono schemat ideowy instalacji sekcji pomiarowej z aparaturą kontrolno-pomiarową. Na dopływie pary przegrzanej czynnika chłodniczego do minikanalu zainstalowano zawór elektromagnetyczny sterowany za pomocą programowanego regulatora czasowego (Siemens LOGO 230R). W stanie ustalonym zawór elektromagnetyczny był całkowicie otwarty, a para dopływająca do minikanalu skraplała się w nim. Do pomiaru natężenia przepływu czynnika chłodniczego posłużył przepływomierz elektroniczny Endress+Hauser promass 80A zainstalowany po stronie cieczowej. Układ doprowadzono do stanu ustalonego, w którym umowna, początkowa wartość masowego natężenia przepływu czynnika chłodniczego w każdej serii pomiarowej zbliżona była do wartości  $\dot{m}_{ust.} = 1,85$  kg/h. Wartość ta była taka sama, jak w badaniach przeprowadzonych dla dotychczas stosowanych czynników chłodniczych R134a i R404A.

W stanie ustalonym, dla niezmiennych parametrów termicznych czynnika chłodniczego (temperatura, ciśnienie), zamykano zawór elektromagnetyczny, przy czym czas zamknięcia zaworu oznaczono  $t_z$ . Po tym czasie zawór zostawał ponownie otwarty na czas  $t_o$ , po czym zamknięty na czas  $t_z$  (proces kolejnego zamykania i otwierania zaworu był sterowany regulatorem czasowym). W ten sposób wywoływano periodycznie generowane zakłócenia hydrodynamiczne w procesie skraplania, realizowanym w minikanale. Periodyczność generowania zakłóceń charakteryzuje ich częstotliwość  $f$ , którą opisano zależnością:

$$f = \frac{1}{t_z + t_o}. \quad (5.1)$$

Oznacza to, że zwiększenie sumarycznego czasu zamknięcia i otwarcia zaworu ( $t_z + t_o$ ) spowoduje zmniejszenie częstotliwości  $f$  i odwrotnie. W programie badań założono, że w poszczególnych seriach pomiarowych był spełniony warunek:  $t_z = t_o$ , czyli czas zamknięcia i czas otwarcia zaworu elektromagnetycznego będzie jednakowy. Pomiary, pozwalające uwzględnić wpływ częstotliwości  $f$  zakłóceń na proces skraplania został rozpoczęty od pierwszej serii, w której  $t_z = t_o = 0,1$  s, czyli  $f = 5$  Hz. Wybór pierwszej częstotliwości startowej wynikał z analizy badań wstępnych przeprowadzonych dla minikanalów, z które jednoznacznie wykazały, że począwszy od określonej wartości  $f$ , jej zmniejszenie powoduje zauważalne skutki wpływu częstotliwości. Zwiększając sukcesywnie przyrosty cza-

su zamknięcia  $t_z$  i otwarcia  $t_o$  o kolejną wartość  $\Delta t = 0,05$  s uzyskiwano możliwość wykonania badań dla różnych wartości częstotliwości w zakresie  $f = 0,2 \div 5$  Hz. Badania prowadzono do momentu wystąpienia zatrzymania masowego natężenia przepływu czynnika chłodniczego po stronie cieczowej. Zatrzymanie takie było spowodowane wystąpieniem *blokady kapilarnej*, opisanej bliżej w rozdziale 3.3.

#### 5.4. Zakres i metoda pomiarów eksperymentalnych

Oprządkowanie kontrolno-pomiarowe zainstalowane na stanowisku badawczym pozwoliło na bezpośredni pomiar wartości następujących parametrów termodynamicznych:

a) na odcinku pomiarowym minikanalu o długości całkowitej 1000 mm mierzono bezpośrednio:

- temperaturę powierzchni ścianki zewnętrznej minikanalu na długości odcinka pomiarowego rurowego w dziewięciu przekrojach,
- temperaturę wody chłodzącej w trzech przekrojach pomiarowych w kanale wodnym, na czynnej długości odcinka pomiarowego 880 mm (termoparami typu K),
- masowe natężenie przepływu czynnika chłodniczego przez odcinek pomiarowy ( $\dot{m}_r$ ),
- masowe natężenie przepływu wody przez odcinek pomiarowy ( $\dot{m}_{H_2O}$ ),
- ciśnienie czynnika chłodniczego na długości odcinka pomiarowego minikanalu rurowego w pięciu przekrojach (czujnikami ciśnienia Cerabar T PMP-131);

b) oprządkowanie *wstępnego wymiennika ciepła* zainstalowanego przed sekcją pomiarową (na rys. 5.2) pozwalało na pomiar:

- temperatury czynnika chłodniczego na dopływie i wypływie z tego wymiennika,
- temperatury wody chłodzącej na dopływie i wypływie z wymiennika,
- masowego natężenie przepływu wody przez wymiennik.

Pozostałe wielkości, niezbędne w opisie charakterystyk ciepłno-przepływowych skraplania określano pośrednio. Należą do nich:

- gęstość lokalnego strumienia ciepła  $q_i$ ,

- lokalny współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha_i$ ,
- lokalny stopień suchości  $x_i$  czynnika chłodniczego,
- stopień zapełnienia  $\varphi$  czynnika chłodniczego,
- częstotliwość  $f$  generowanych zakłóceń zewnętrznych.

Stanowisko badawcze pozwalało na wykonanie badań eksperymentalnych w zakresie zmiany następujących parametrów:

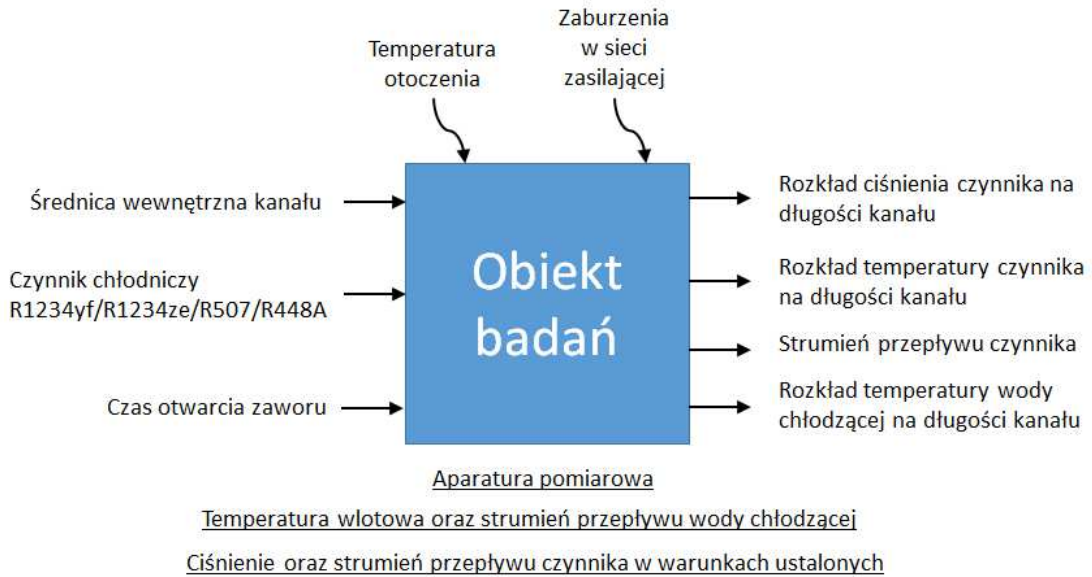
- średnicy wewnętrzna minikanalu rurowego:  $d_h = 1,40; 1,44; 1,92; 2,30; 3,30$  mm,
- temperatury nasycenia:  $T_s = 20 \div 55$  °C,
- gęstości strumienia masy czynnika chłodniczego:  $G = 60 \div 361$  kg/(m<sup>2</sup>·s),
- stopienia suchości pary:  $x = 1 \div 0$ ,
- gęstości strumienia ciepła w strefie dwufazowej:  $q = 5 \div 62$  kW/m<sup>2</sup>,
- częstotliwości generowanych zakłóceń periodycznych:  $f = 0,2 \div 5$  Hz.

Metodykę realizacji badań eksperymentalnych przedstawiono schematycznie na rys. 5.5. Zmiennymi podczas kolejnych eksperymentów były: czynnik chłodniczy, średnica minikanalu oraz nastawy czasowe programatora zaworu odcinającego. Wartościami mierzonymi były: przepływ oraz rozkład ciśnienia i temperatury czynnika chłodniczego na długości minikanalu, a także rozkład temperatury wody chłodzącej na długości minikanalu. Stałe, to: aparatura pomiarowa, strumień przepływu oraz temperatura początkowa wody chłodzącej, a także ciśnienie i strumień czynnika chłodniczego w stanie ustalonym. Natomiast czynnikami zakłócającymi, których nie udało się wyeliminować były: zmienna temperatura otoczenia podczas długotrwałych pomiarów oraz jakość zasilania instalacji elektrycznej. Dane pomiarowe pozyskano korzystając z programu DasyLab.

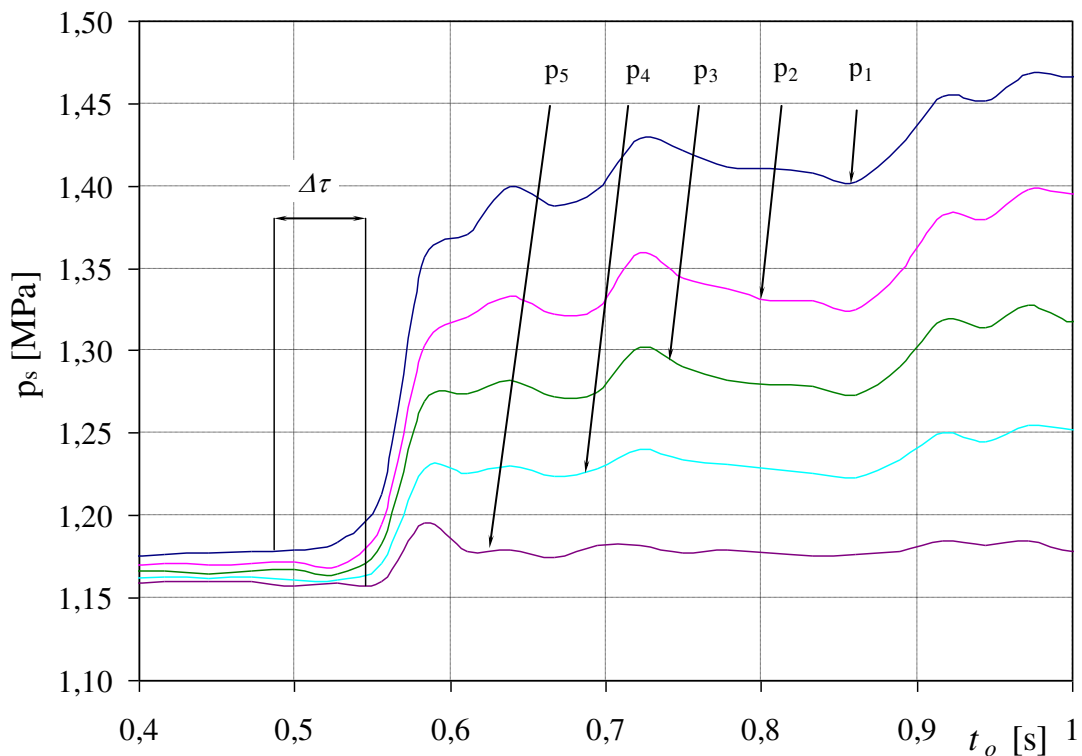
Badania eksperymentalne zrealizowano w taki sam sposób analogiczny do czynników chłodniczych R134a i R404A [82].

W celu ustalenia przesunięcia czasowego reakcji poszczególnych czujników na zmianę stanu zaworu odcinającego, porównano sygnały z wielu czujników (przykładowe przebiegi czasowe rozkładu ciśnienia i temperatury na długości minikanalu przedstawiono kolejno na rys. 5.6 oraz 5.7).





Rys. 5.5. Schemat ideowy metodyki badań eksperymentalnych [73,76]



Rys. 5.6. Przesunięcie czasowe reakcji czujników ciśnienia

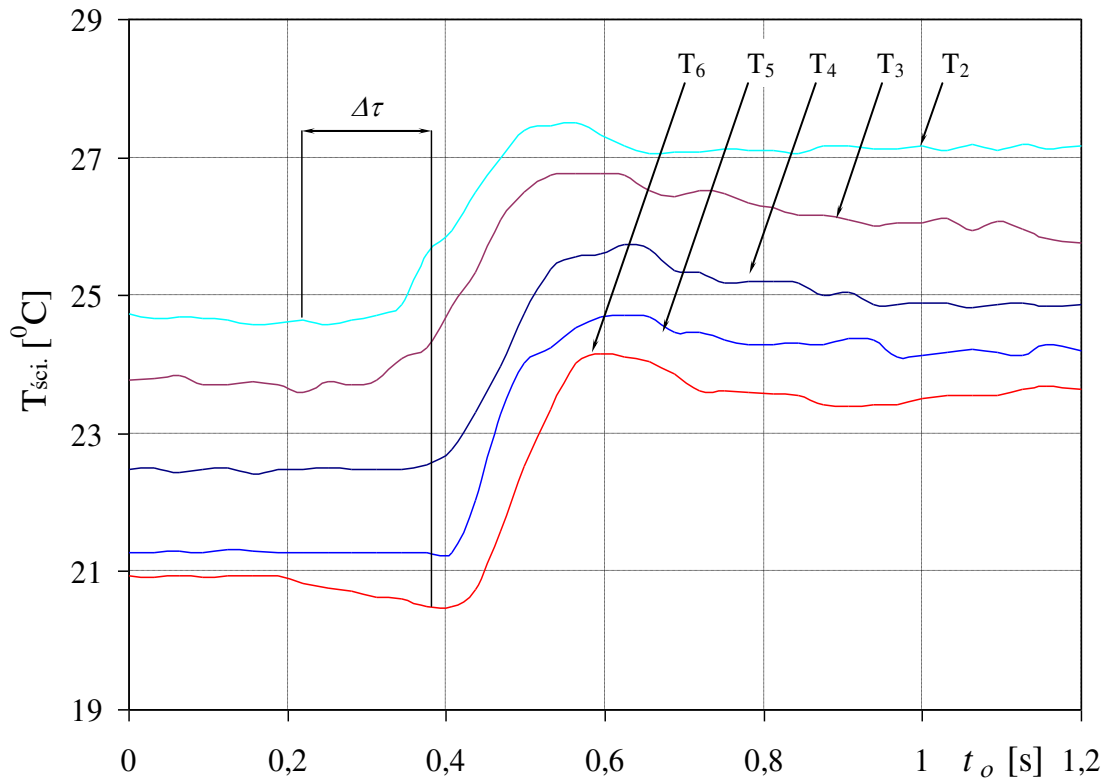
Aby ograniczyć niepewność pomiarową wartości przesunięcia czasowego  $\Delta\tau$ , dla każdej częstotliwości obliczono średnią z wielu pomiarów. Odległość między czujnikami była znana, a prędkość fali obliczono korzystając z jej definicji – droga podzielona przez czas:

$$\bar{v} = \frac{\Delta l}{\Delta \tau} \quad (5.2)$$

gdzie:

$\Delta \tau$  – przesunięcie czasowe,

$\Delta l$  – odległość między czujnikami.



Rys. 5.7. Przesunięcie czasowe reakcji czujników temperatury

Ręczne określenie przesunięcia czasowego (rys. 5.6 oraz 5.7) mogłoby być uznaniowe. Dlatego, aby wyeliminować czynnik ludzki, zastosowano procedurę dopasowania krzywych. W przypadku przebiegu sygnału zmiany ciśnienia posłużono się krzywą w postaci 4 parametrowej sigmoidy:

$$y(\tau) = \frac{a}{1 + \exp(-k(\tau - \tau_0))} + c \quad (5.3)$$

gdzie:

$a$  – wartość skoku,

$k$  – współczynnik kształtu,

$\tau_0$  – punkt przegięcia,

$c$  – wartość początkowa.

W przypadku przebiegu sygnału zmiany temperatury posłużono się 3 parametrową sinusoidą:

$$y(\tau)=a \cdot \sin(t+t_0)+c \quad (5.4)$$

gdzie:

$a$  – parametr skali,

$t_0$  – faza początkowa,

$c$  – wartość średnia.

Dopasowania krzywych (czyli obliczenia parametrów) dokonano przy użyciu bibliotek *numpy*, *pandas*, *pylab*, oraz *scipy* dla języka *Python*.



## **6. Wyniki badań eksperymentalnych skraplania proekologicznych czynników chłodniczych w warunkach periodycznych zakłóceń dynamicznych**

W rozdziale 3 zdefiniowano pojęcie charakterystyki wpływu zakłóceń dynamicznych generowanych periodycznie na proces skraplania stosowanych dotychczas czynników chłodniczych w minikanalach rurowych. Zwrócono uwagę na fakt, że mało jest informacji o wpływie tych zakłóceń na proces skraplania dla nowych czynników chłodniczych w minikanalach. Celem niniejszych badań jest, między innymi, rozszerzenie stanu wiedzy w tym zakresie.

Z uwagi na to, że właściwości dyspersyjne ośrodków dwufazowych zależą w dużym stopniu od rodzaju czynnika, przeprowadzono badania dla zamienników czynnika chłodniczego jednoskładnikowego R134a oraz dla mieszaniny bliskoa-zeotropowej, trójskładnikowej R404A. Wśród zamienników są izomery R1234ze i R1234yf oraz czynniki R507 i R448A.

### **6.1. Wyniki badań wpływu zakłóceń na zmiany natężenia przepływu, ciśnienia i temperatury podczas skraplania w pojedynczych minikanalach rurowych**

Oddziaływania o charakterze periodycznym powodują cykliczne zmiany parametrów układu. Niestabilności te identyfikuje się w literaturze, jako oscylacyjne o amplitudzie zdeterminowanej wartościami średnimi parametrów systemu lub jego geometrią [5,32,53,143,144].

Źródłem niestabilności periodycznych w układach dwufazowych mogą być interakcje cieplne (termiczne) lub przepływowe. Charakter tego typu zakłóceń można określić jako stochastyczny, ponieważ skutki ich oddziaływania mogą być przewidywalna jedynie z określonym prawdopodobieństwem [44,66,100,117÷119,135÷139,141].

Przyczynami powstawania niestabilności dynamicznych o charakterze przepływowym mogą być zmiany:

- gęstości strumienia masy,
- gęstości strumienia ciepła,

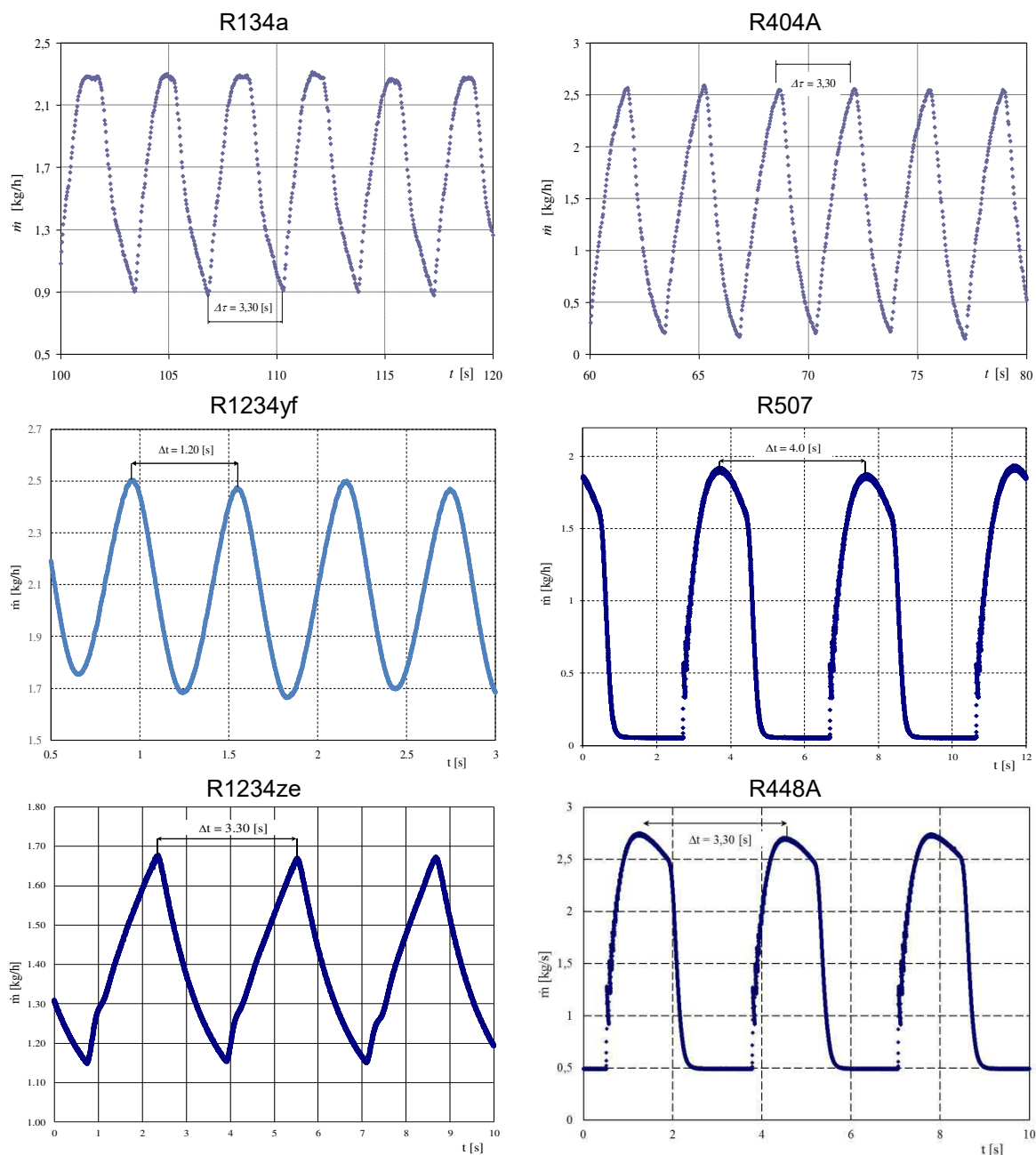
- ciśnienia,
- temperatury, itp.

Dotychczasowe badania teoretyczne i eksperymentalne pozwoliły w znacznym stopniu na rozpoznanie i opis zjawisk towarzyszących procesowi skraplania w mini- i mikrokanalach, w warunkach oddziaływań zakłócających przepływ. Badania te odnoszą się przede wszystkim do stosowanych obecnie czynników chłodniczych, które w najbliższej perspektywie czasowej są przewidziane do wycofywania z użytkowania lub ich stosowanie jest już niemożliwe ze względu na przepisy prawne [59,61,70,73÷75,78-85,106,107,118,145].

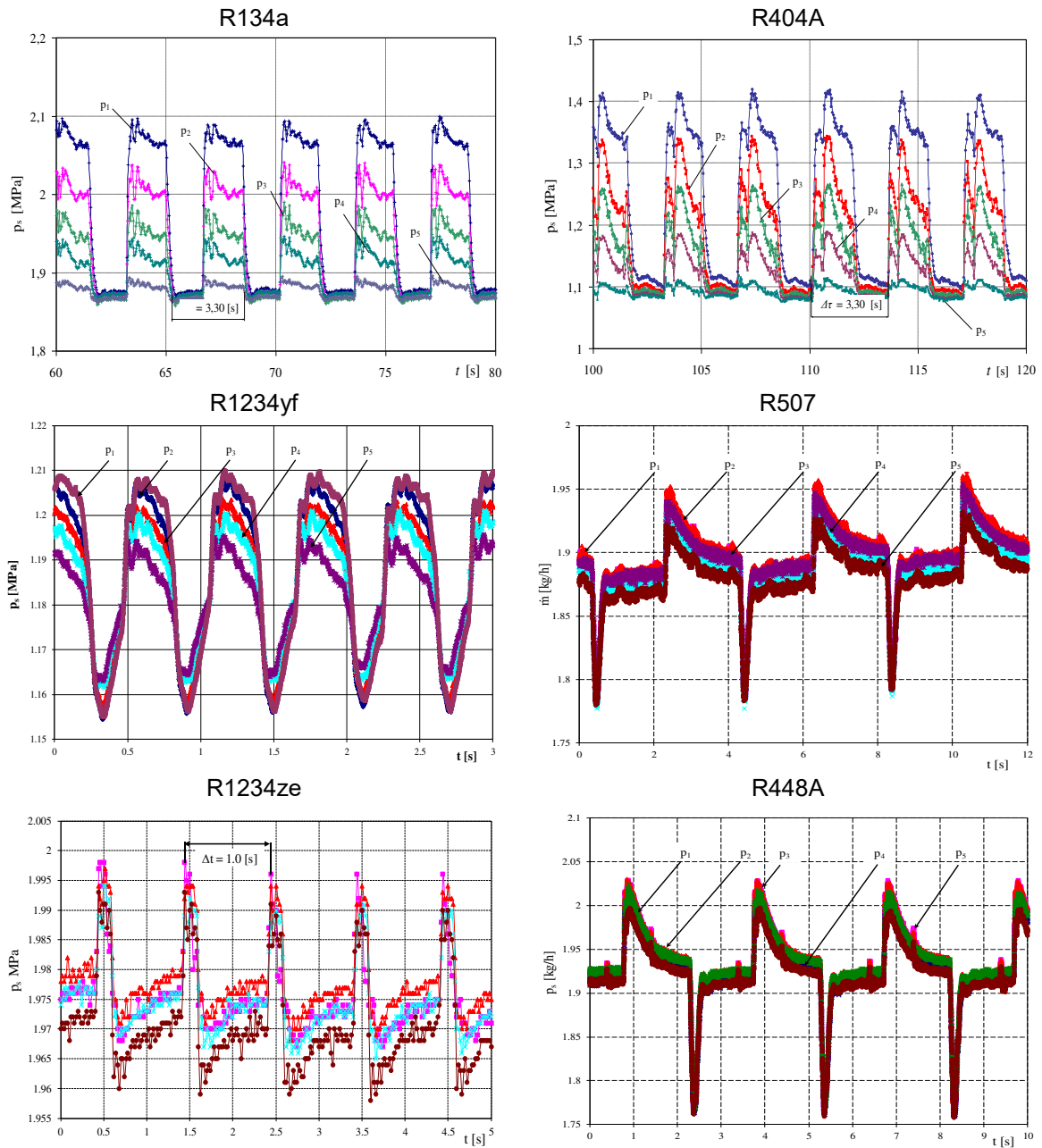
Metodyka badań opisana w rozdziale 5.3, zakłada generowanie periodycznej zmiany gęstości strumienia masy czynnika chłodniczego. Zjawisko to realizowano otwierając i zamykając zawór odcinający, zamontowany na zasilaniu odcinka pomiarowego (rys. 5.2). Zakłócenie typu periodycznego wywoływało oscylacyjne zmiany masowego natężenia przepływu czynnika oraz wynikające stąd pulsacje ciśnienia nasycenia  $p_s$  i temperatury  $t_{sci}$  ścianki kanału [4,37,82,111].

Na rys. 6.1 ÷ 6.3 przedstawiono przykładowe przebiegi zmiany masowego natężenia przepływu oraz ciśnienia  $p_s$  i temperatury ścianki  $t_{sci}$  badanych minikanalów rurowych dla dotychczas stosowanych czynników chłodniczych R134a i R404A oraz ich zamienników.

Oddziaływania falowe o charakterze periodycznym można opisać za pomocą charakterystycznych prędkości:  $v_p$  – przemieszczania się niestabilności ciśnieniowych i  $v_T$  – temperaturowych. Analiza przedstawiona w rozdziale 3 rozpatrywanej tematyki wykazuje, że dla układów z przemianami fazowymi przyjmuje się prędkość  $v_p$  jako odnoszącą się do propagacji akustycznej fali ciśnieniowej [102÷104,120,133], zaś zmiany temperatury ścianki kanału jako *front skraplania* przemieszczającego się z prędkością  $v_T$  [26,55,65,68,75,140].

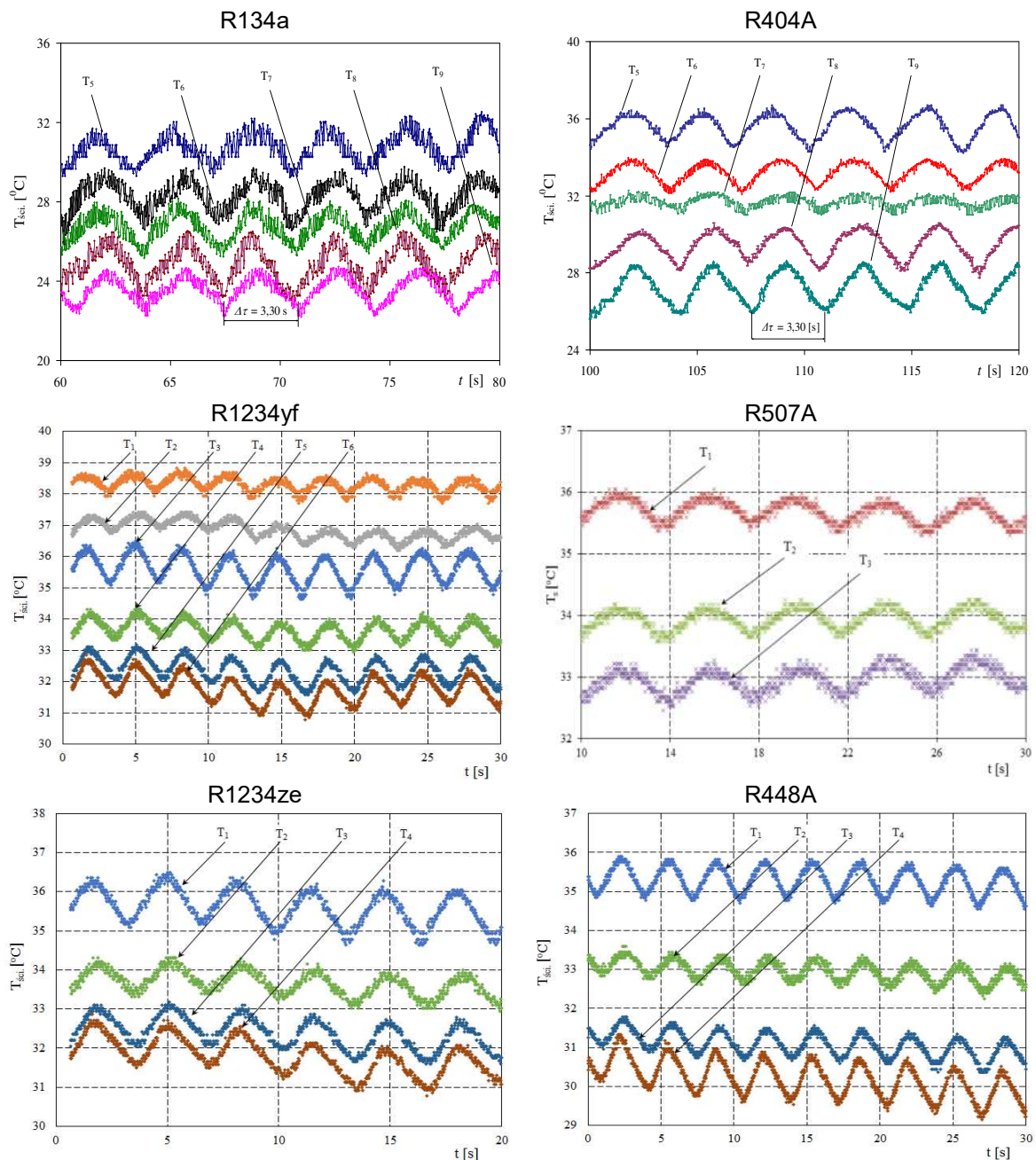


Rys. 6.1. Wyniki badań eksperymentalnych ukazujące zmiany masowego natężenia przepływu czynników chłodniczych R134a [82], R1234yf i R1234ze oraz R404A [82], R507 i R448A pod wpływem niestabilności periodycznych dla średnicy minikanalu  $d_h = 3,30$  mm



Rys. 6.2. Wyniki badań eksperymentalnych ukazujące zmiany ciśnienia czynników chłodniczych R134a [82], R1234yf i R1234ze oraz R404A [82], R507 i R448A pod wpływem niestabilności periodycznych dla średnicy minikanалу  $d_h = 3,30$  [mm]





Rys. 6.3. Wyniki badań eksperymentalnych ukazujące zmiany temperatury czynników chłodniczych R134a [82], R1234yf i R1234ze oraz R404A [82], R507 i R448A pod wpływem niestabilności periodycznych dla średnicy minikanalu  $d_h = 3,30$  [mm]

Porównanie wyników badań niestabilności o charakterze periodycznym uzyskanych dla czynników R1234yf, R1234ze, R507A i R448A, i wyników badań dla dotychczas stosowanych czynników R134a i R404A wykazało zgodność charakteru ich propagacji. Niestabilności masowego natężenia przepływu  $\dot{m}$  czynników chłodniczych (rys. 6.1) spowodowały wystąpienie niestabilności ciśnieniowych (rys 6.2) oraz temperaturowych (rys 6.3).

## 6.2. Wyniki badań eksperymentalnych określenia prędkości propagacji niestabilności generowanych okresowo podczas skraplania nowych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych

Zamknięcie zaworu zasilającego odcinek pomiarowy minikanalu za pomocą zaworu odcinającego (rys. 5.2 rozdział 5) powodowało zatrzymanie przepływu czynnika zasilającego (od wartości ustalonej  $\dot{m}_{ust.}$  do 0). Ponowne otwarcie zaworu umożliwiało dopływ kolejnej porcji czynnika. Wyniki badań eksperymentalnych zamieszczone w publikacjach dotyczących czynników chłodniczych R134a i R404A [82] wskazują, że niestabilności dynamiczne zarówno o charakterze jednostkowym, jak i okresowym mają istotny wpływ na efektywność procesu skraplania w minikanalach [74,75,78÷85]. W stanie ustalonym, proces skraplania zachodzący w poszczególnych strefach każdego minikanalu przebiega stabilnie, co oznacza spełnienie koniecznego warunku „wystarczającego czasu” na jego realizację w każdej strefie. Trzeba przy tym pamiętać, że przepływ czynnika chłodniczego w instalacji jest wymuszony pracą sprężarki chłodniczej. Instalacja chłodnicza pracuje w sposób ciągły, zatem okresowe zatrzymanie zasilania minikanalu w parę przegrzaną (poprzez zamknięcie zaworu *odcinającego*) należy rozpatrywać w aspekcie jego ciągłego połączenia z instalacją odbioru cieczy dochłodzonej (tzw. *odsysania* czynnika z minikanalu).

Okresowe zamykanie i otwieranie zaworu zasilającego wprowadza niestabilności dynamiczne przepływu czynnika w minikanale. Nie bez znaczenia jest również to, w jakiej strefie wymiany ciepła minikanalu był proces jego skraplania wtedy, gdy nastąpiło zatrzymanie dopływu czynnika (pojawia się wówczas zjawisko przemieszczania się *frontu skraplania*). Za *front skraplania* uznaje się proces przemieszczania granicy pomiędzy fazą ciekłą, a mieszaniną dwufazową wzdłuż ścianki kanału z określoną prędkością propagacji  $v_T$  (opisaną zależnością 5.2). Nie ulega żadnej wątpliwości, że wskutek wymuszonych zakłóceń następuje *zjawisko pulsacji masowego natężenia przepływu* czynnika (rys. 6.1) Ujawniają się nie tylko zjawiska fluktuacyjne oddziaływań masowych, termicznych i ciśnieniowych (rys. 6.2 i 6.3). Zjawiska te są wzajemnie sprzężone i zależne od częstotliwości  $f$  generowanych zakłóceń.

Zaobserwowano, że podczas fluktuacyjnego oddziaływania masowego  $\dot{m}$ , wywołanego okresowymi zakłóceniami dochodzi do tzw. *zatrzymania przepływu*

wu czynnika w minikanale [82]. Im większy jest czas zamknięcia zaworu zasilającego czynnikiem minikanal, tym silniejszy występuje spadek natężenia jego przepływu, nawet do zera. W związku z tą informacją również w przypadku czynników chłodniczych R1234yf, R1234ze, R507 i R448A prowadzone badania eksperymentalne ograniczono do momentu wystąpienia tego zjawiska.

Stwierdzono na podstawie badań, że opisane wyżej zjawiska zależą w dużym stopniu od wymiaru średnicy kanału, zarówno dla dotychczas stosowanych czynników chłodniczych oraz ich zamienników. Im mniejsza jest średnica minikanalu, tym czas, po którym nastąpi zatrzymanie przepływu jest większy. Można to również nazwać *zjawiskiem tłumienia* niestabilności w minikanalach. Problem ten analizowano w badaniach z czynnikami chłodniczymi R134a i R404A i rozważono w niniejszych badaniach dla ich proekologicznych zamienników [74,75,78÷85].

W literaturze znane i zdefiniowane jest również inne zjawisko towarzyszące niestabilnościom skraplania w minikanalach nazywane *przepływem zadławionym* (ang. *choked flow*). Autor opracowania [134,136] podaje definicję, zgodnie z którą przepływ krytyczny jest zadławiony, gdy zakłócenia rozprzestrzeniają się do punktu zwanego *przekrojem krytycznym* kanału. W przypadku kanału prostego, przekrój krytyczny występuje na jego wyjściu. Zjawiska *zatrzymania przepływu* i *zadławienia przepływu* nie są tożsame.

Wprowadzona uprzednio wielkość  $v_p$  nazywana jest prędkością rozprzestrzeniania niestabilności ciśnieniowych lub prędkością propagacji niestabilności ciśnieniowych. Graniczne wartości tej prędkości  $v_p$  ustalono eksperymentalnie. Wielkości te odpowiadały zdefiniowanym w literaturze wartościom charakterystycznych prędkości fazowych tzn.:  $v_{zr}$  - *zamrożonej* (ang. *frozen*) oraz  $v_r$  - *równowagowej* (ang. *equilibrium*). Prędkość *zamrożona*  $v_f$  odpowiada największej prędkości przemieszczania się niestabilności ciśnieniowych  $v_p$ , przy częstotliwości zakłóceń  $f \rightarrow \infty$ , natomiast prędkość *równowagowa*  $v_r$  jest najmniejszą wartością prędkości  $v_p$  przy częstotliwości  $f \rightarrow 0$  [13÷15,82,85,101]. Zagadnienia te szczegółowo opisano w rozdziale 3.2.2.

Kolejne podrozdziały zawierają zbiorcze zestawienia wyników badań, kolejno dla niestabilności ciśnieniowych oraz temperaturowych.

### 6.2.1. Wyniki badań dotyczących określenia prędkości przemieszczania się niestabilności ciśnieniowych $v_p$

Pełne wyniki badań eksperymentalnych dotyczących określenia prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  zamieszczono w Załączniku 2. W tabelicy 6.1. przedstawiono przykładowe wyniki badań eksperymentalnych uzyskane dla minikanalu rurowego o średnicy hydraulicznej  $d_h = 3,30$  mm.

Na rysunku 6.4 pokazano zależności prędkości  $v_p$  od częstości kołowej generowanych zakłóceń, uzyskane dla poszczególnych czynników chłodniczych.

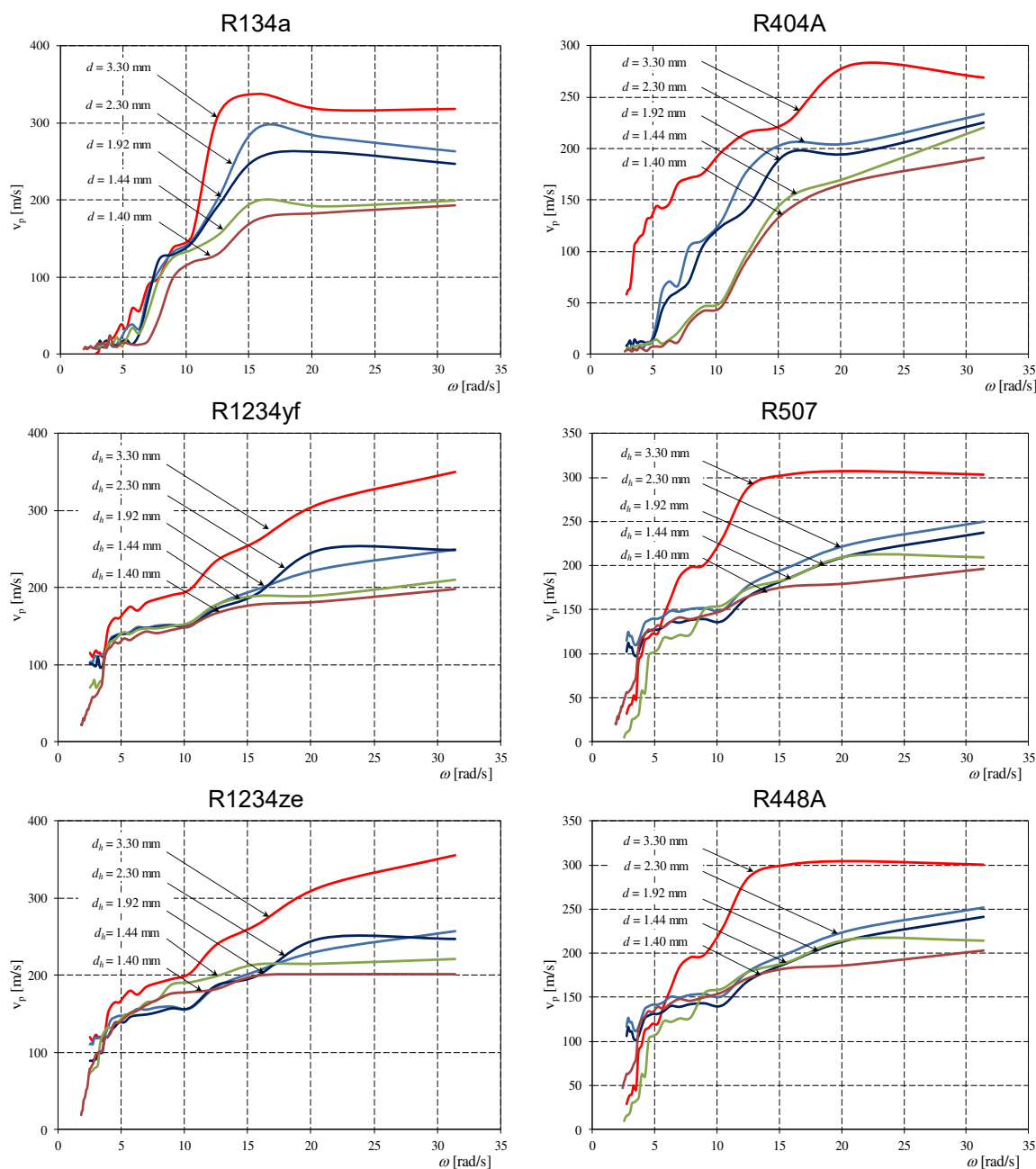
Tabela 6.1.

Zestawienie porównawcze wyników badań eksperymentalnych dotyczących prędkości niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  dla czynników chłodniczych R134a, R1234yf i R1234ze, R404A, R507 i R448A w minikanale  $d_h = 3,30$  mm w zależności od częstości kołowej  $\omega = \pi/\tau_o$  obliczonej na podstawie czasu otwarcia zaworu  $\tau_o$

$d_h = 3,30$ [mm]							
		R134a*	R1234yf	R1234ze	R404A**	R507	R448A
$\tau_o$ [s]	$\omega$ [rad/s]	$v_p$ [m/s]					
0,10	31,40	318	350	355	269	303	300
0,15	20,93	317	310	315	282	307	304
0,20	15,70	337	260	265	226	303	300
0,25	12,56	310	235	240	216	289	286
0,30	10,47	154	198	203	197	232	229
0,35	8,97	139	190	195	176	201	198
0,40	7,85	100	185	190	171	198	195
0,45	6,98	90	180	185	166	187	184
0,50	6,28	57	170	175	147	163	160
0,55	5,71	60	175	180	142	143	140
0,60	5,23	33	168	173	144	123	120
0,65	4,83	39	160	165	133	123	120
0,70	4,49	29	160	165	131	118	115
0,75	4,19	21	155	160	117	115	112
0,80	3,93	21	145	150	114	98	95
0,85	3,69	13	120	125	110	92	89
0,90	3,49	9	110	115	106	48	45
0,95	3,31	11	115	120	81	53	50
1,00	3,14	10	115	120	64	43	40
1,05	2,99	3	118	123	63	42	39
1,10	2,85	2	115	120	58	38	35
1,15	2,73	24	110	115	24	32	29
1,20	2,62		112	117			
1,25	2,51		115	120			

\*) [82] \*\*) [82]

W każdym z rozpatrywanych przypadków uzyskano monotoniczny charakter przebiegu zależności  $v_p = f(\omega)$ , co jest zgodne z charakterystyką rozkładu prędkości fazowych określających zależność rozprzestrzeniania się prędkości dźwięku  $c$  od częstości kołowej, czyli  $c = f(\omega)$  (rozdział 3.2.2. rys. 3.5).



Rys. 6.4. Zależność prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  od częstości  $\omega$  generowanych zakłóceń dla czynnika chłodniczego R134a [82] i jego zamienników R1234yf i R1234ze oraz R404A [82] i jego zamienników R507 i R448A; (w warunkach niestabilności periodycznych)

Wyniki badań eksperymentalnych skraplania nowych czynników chłodniczych wykazały również, że na prędkość propagacji *niestabilności ciśnieniowych*  $v_p$  w minikanalach ma wpływ nie tylko częstotliwość  $f$  ich generowania, ale także średnica wewnętrzna  $d$  kanału. Zmniejszenie tej średnicy skutkuje spadkiem prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych (rys. 6.4)

W pracach [82,85] podano, że *prędkość fazowa*  $v_f$  odnosząca się do *niestabilności ciśnieniowych*  $v_p$  zależy nie tylko od termodynamicznych parametrów procesu, ale również od stopnia zapełnienia  $\varphi$ . Istotnym problemem jest sposób określenia wielkości stopnia zapełnienia  $\varphi$  dla nowych proekologicznych czynników chłodniczych. Na podstawie analizy dostępnych zależności przyjęto w obliczeniach:

- dla R134a model homogeniczny o postaci:

$$\varphi_h = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right) \cdot S}, \quad (6.1)$$

gdzie  $S = 1$ ;  $S$  – poślizg międzyfazowy;

- dla izomerów R1234 model Baroczego [9]:

$$\varphi_{Baroczy} = \frac{\left(\frac{\mu_l}{\mu_v}\right)^{0,5}}{\left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)}; \quad (6.2)$$

- dla R404A model rozdzielony Zivisa [148]:

$$\varphi_{Zivis} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{\frac{2}{3}}}; \quad (6.3)$$

- R507A i R448A model Chisholmsa [8,42,95,148]:

$$\varphi_{Chis.} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right) \cdot S}, \quad (6.4)$$

gdzie:  $S = \left(1 - x + \frac{x \cdot \rho_l}{\rho_v}\right)^{\frac{2}{3}}$ .

Stopień suchości  $x$  mieszaniny dwufazowej określono z bilansu energetycznego wymiennika wstępnego (rys. 5.2 rozdział 5), o postaci:

$$\dot{Q}_{w.w.} = \dot{Q}_j + \dot{Q}_{ot.}, \quad (6.5)$$

gdzie:  $\dot{Q}_j$  - strumień ciepła jawnego;  $\dot{Q}_{ot.}$  - straty ciepłne do otoczenia.

Na drodze eksperymentalnej stwierdzono, że strumień straty ciepła przekazywany do otoczenia jest dostatecznie mały i można założyć, że  $\dot{Q}_{ot.} \approx 0$ .

Stąd zapis równania bilansowego (6.5) po stronie czynnika chłodniczego uzyskuje postać:

$$\dot{Q}_{w.w.} = \dot{m}_r \cdot c_{p.r.} \cdot (T_r - T_s) + \dot{m}_r \cdot r \cdot \Delta x, \quad (6.6)$$

gdzie:

$\dot{m}_r$  – masowe natężenie przepływu czynnika chłodniczego,

$c_{p.r.}$  – ciepło właściwe czynnika chłodniczego,

$T_r$  – temperatura pary czynnika chłodniczego na wlocie do wymiennika,

$T_s$  – temperatura nasycenia czynnika chłodniczego,

$r$  – jednostkowe ciepło skraplania czynnika chłodniczego,

$\Delta x$  – zmiana stopnia suchości pary czynnika chłodniczego.

Zapis równania bilansowego (6.5) po stronie wody chłodzącej [82,97,99,130,136÷139] ujęto w postaci:

$$\dot{Q}_{w.w.} = \dot{m}_{w.w.} \cdot c_{p.w.} \cdot \Delta T_w, \quad (6.7)$$

gdzie:

$\dot{m}_{w.w.}$  – masowe natężenie przepływu wody chłodzącej,

$c_{p.w.}$  – ciepło właściwe wody,

$\Delta T_w$  – przyrost temperatury wody chłodzącej w wymienniku wstępnym:

$$\Delta t_w = (T_{w.wyj.} - T_{w.wej.}), \quad (6.8)$$

$T_{w.wyj.}$  – temperatura wody chłodzącej na wylocie z wymiennika,

$T_{w.wej.}$  – temperatura wody chłodzącej na wlocie do wymiennika.

Po przekształceniu równania (6.6) zmiana stopnia suchości pary czynnika w przepływie przez wymiennik wynosi:

$$\Delta x = \frac{1}{r} \cdot \left[ \frac{\dot{Q}_{w.p.}}{\dot{m}_r} - c_{p.r.} \cdot (T_r - T_k) \right], \quad (6.9)$$

a po podstawieniu równań (6.7) oraz (6.8):

$$\Delta x = \frac{1}{r} \cdot \left[ \frac{\dot{m}_{w.p.} \cdot c_{p.w.} \cdot (T_{w.wyj.} - T_{w.wej.})}{\dot{m}_r} - c_{p.r.} \cdot (T_r - T_k) \right], \quad (6.10)$$

Wyrażenie (6.10) oznacza zmianę stopnia suchości pary  $\Delta x$  w wymienniku wstępnym określoną zależnością:

$$\Delta x = 1 - x_{wej}, \quad (6.11)$$

a stąd:

$$x_{wej} = 1 - \Delta x. \quad (6.12)$$

Podsumowując, do wymiennika wstępnego dopływa zwykle para przegrzana. W pierwszym etapie następuje odbiór ciepła przegrzania – do stanu nasycenia  $x = 1$ , a następnie częściowe skraplanie do stanu  $x_{wej}$  w przekroju wylotowym z wymiennika wstępnego, czyli na dopływie do sekcji pomiarowej minikanalu.

Lokalną wartość stopnia suchości czynnika  $x_i$  w  $i$ -tym przekroju minikanalu obliczono zgodnie z zależnością [38,82,128]:

$$x_i = x_{wej} - \frac{\dot{Q}_i}{\dot{m}_r \cdot r}, \quad (6.13)$$

gdzie  $\dot{Q}_i$  jest lokalnym strumieniem ciepła odprowadzonym na odcinku pomiarowym od czynnika chłodniczego do wody chłodzącej, obliczonym na podstawie pomiaru temperatury wody chłodzącej:

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{p,w} \cdot (T_i - T_{i-1}), \quad (6.14)$$

gdzie:

$\dot{m}_{H_2O}$  – masowe natężenie przepływu wody chłodzącej kanał,

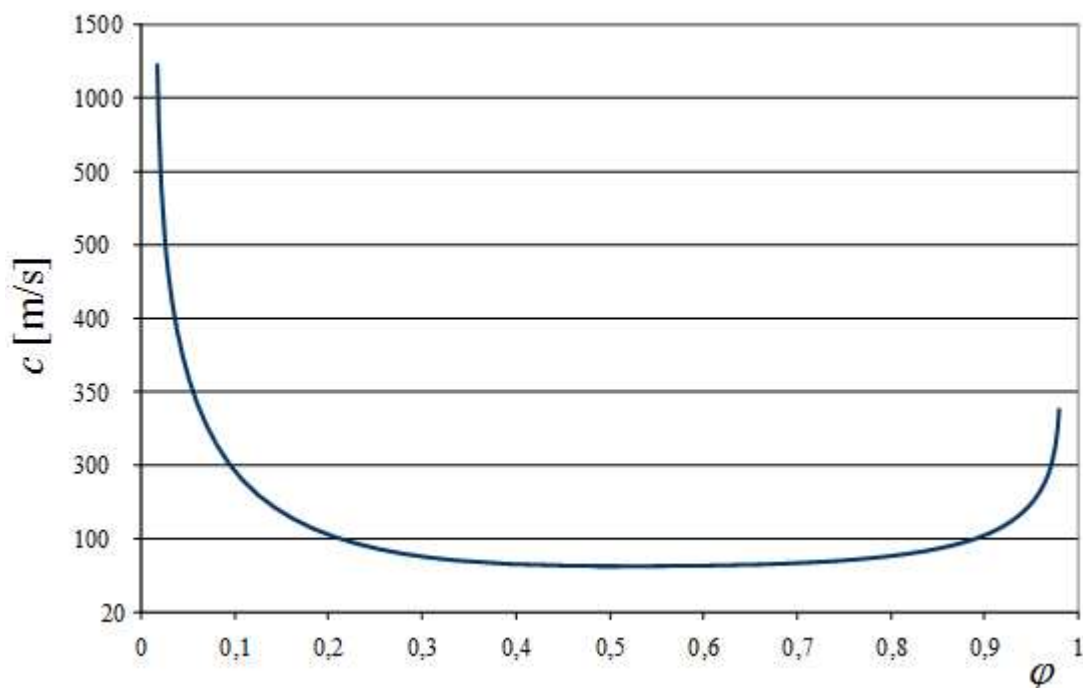
$c_{p,w}$  – ciepło właściwe wody,

$T_i$  – temperatura wody chłodzącej kanał w  $i$ -tym przekroju,

$T_{i-1}$  – temperatura wody chłodzącej kanał w  $i-1$ -szym przekroju.

W odniesieniu do czynników chłodniczych R134a i R404A autorzy prac [15,82,101] przedstawili wyniki uzyskanych zależności propagacji prędkości niestabilności ciśnieniowych w minikanalach rurowych od stopnia zapełnienia  $\varphi$ . Należy zauważyć, że przemianie fazowej skraplania odpowiada prawa część linii granicznej na rys. 6.5, rozkładu opisującego charakterystyczny przebieg prędkości dźwięku  $c$  w zależności od stopnia zapełnienia  $\varphi$  [82,95,102].





Rys. 6.5. Zależność prędkości dźwięku  $c$  od stopnia zapełnienia  $\varphi$  [82,95,102]

Uzyskane wyniki badań dla czynników chłodniczych R1234ze, R1234yf, R507 i R448A porównano z R134a i R404A wykazując, że ze spadkiem wielkości stopnia zapełnienia  $\varphi$  następuje zmniejszenie prędkości rozprzestrzeniania się zakłóceń. Proces ten realizowany jest do momentu, gdy w obszarze mieszaniny dwufazowej, w której stopień zapełnienia wynosi  $\varphi = 0,3 \div 0,7$  prędkość propagacji niestabilności ciśnieniowych osiąga wartości minimalne. Zjawisko to dla wszystkich badanych czynników ilustruje rys. 6.6.

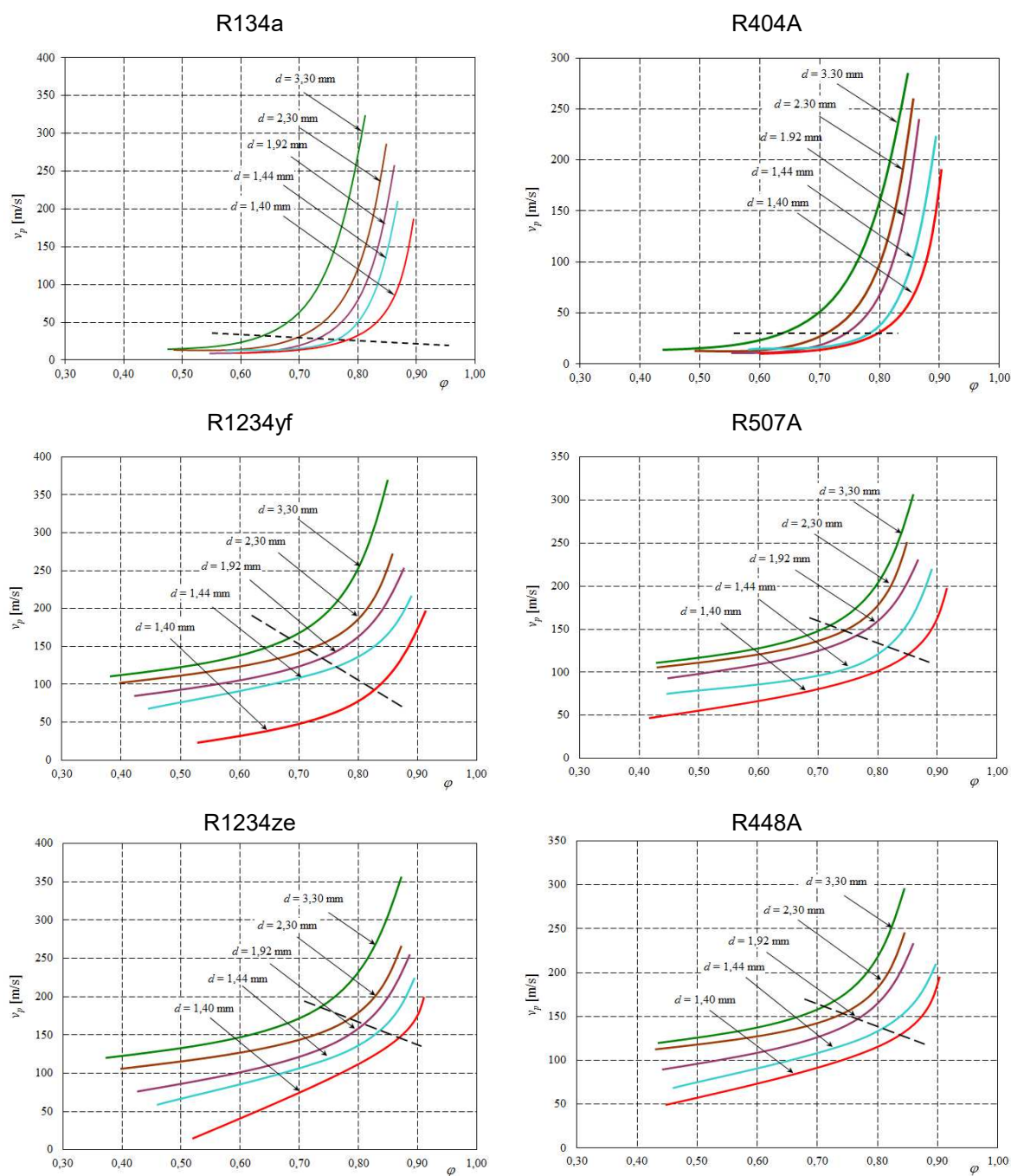
W tabelicy 6.2. przedstawiono przykładowe, porównawcze zestawienie wartości stopnia zapełnienia obliczone dla minikanalu o średnicy  $d_h = 1,40$  mm i poszczególnych czynników chłodniczych, w odniesieniu do niestabilności ciśnieniowych  $v_p$ . Pozostałe wyniki umieszczono w Załączniku 2.

Tablica 6.2.

Zestawienie porównawcze zależności stopnia zapełnienia  $\varphi$   
od prędkości niestabilności ciśnieniowych  $v_p$

$d_h = 1,40 \text{ mm}$											
R134a*		R1234yf		R1234ze		R404**		R507		R448A	
$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$
199	0,86	210	0,88	221	0,89	220	0,89	217	0,89	214	0,89
191	0,86	190	0,86	215	0,88	173	0,89	202	0,89	216	0,89
199	0,86	189	0,86	214	0,89	151	0,89	185	0,87	190	0,89
154	0,85	178	0,85	199	0,87	99	0,86	174	0,86	179	0,86
135	0,85	155	0,84	191	0,86	51	0,83	166	0,84	160	0,83
125	0,85	150	0,83	188	0,86	46	0,82	150	0,82	155	0,82
98	0,84	147	0,82	168	0,84	34	0,79	122	0,79	127	0,79
55	0,83	147	0,83	165	0,83	21	0,78	121	0,78	126	0,78
27	0,81	145	0,82	155	0,82	14	0,76	117	0,76	122	0,76
34	0,82	140	0,81	149	0,81	10	0,75	118	0,75	123	0,75
19	0,79	142	0,81	149	0,81	14	0,71	105	0,72	118	0,73
21	0,80	138	0,80	141	0,80	11	0,68	96	0,70	112	0,71
22	0,82	132	0,78	139	0,78	10	0,65	89	0,68	108	0,70
14	0,77	130	0,77	132	0,77	9	0,64	81	0,65	103	0,69
13	0,79	124	0,76	133	0,76	9	0,60	79	0,63	105	0,67
23	0,78	111	0,75	128	0,75	8	0,57	76	0,62	97	0,64
10	0,69	80	0,69	122	0,73	7	0,55	73	0,60	93	0,61
8	0,68	78	0,68	111	0,72	8	0,51	77	0,58	85	0,57
7	0,70	73	0,66	84	0,66	5	0,47	74	0,55	80	0,54
6	0,72	70	0,64	81	0,64	6	0,44	73	0,53	77	0,51
6	0,65	80	0,62	80	0,62	4	0,42	73	0,51	68	0,49
		75	0,61	77	0,61			74	0,49	67	0,47
		73	0,55	76	0,55			70	0,46	63	0,45
		70	0,45	73	0,45			73	0,44	56	0,43

\*) [82] \*\*) [82]



Rys. 6.6. Zależność prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  od stopnia zapełnienia  $\phi$  podczas skraplania czynnika chłodniczego R134a [82] i jego zamienników R1234yf i R1234ze oraz R404A [82] i jego zamienników R507 i R448A; (w warunkach niestabilności periodycznych) [85]

Miarą wielkości występujących niestabilności dynamicznych w minikanalach rurowych może być wartość zmiany ciśnienia  $\Delta p$ , wywołane zakłóceniem. W przypadku niestabilności wynikających z okresowych ograniczeń dopływu czynnika chłodniczego do skraplania, zmiany ciśnienia  $\Delta p$  występują każdorazowo. Za-

mknięcie zaworu odcinającego na zasilaniu kanału powodowało intensyfikację procesu skraplania i spadek ciśnienia do momentu ponownego otwarcia zaworu. Wtedy następował ponowny dopływ czynnika i gwałtowny wzrost ciśnienia w wyniku tworzenia się mieszaniny typu para-ciecz. Wielkość spadku i wzrostu ciśnienia  $\Delta p$  charakteryzuje intensywność niestabilności generowanych w przepływie dwufazowym. Wzrost wartości zmiany ciśnienia  $\Delta p$  związany jest ze spadkiem jednostkowego strumienia ciepła  $q$  i wydajnością cieplną procesu skraplania, zaś częstotliwość generowanych zakłóceń wywiera zdecydowany wpływ na jednostkowy strumień ciepła  $q$ . Wyniki takich badań wykonanych dla proponowanych nowych proekologicznych czynników chłodniczych R1234yf, R1234ze, R507 i R448A przedstawiono na rys. 6.7. W tabelicy 6.3 umieszczono przykładowe eksperymentalne wartości spadku ciśnienia  $\Delta p$  oraz wartości jednostkowej gęstości strumienia ciepła  $\bar{q}_i$  dla minikanalu o średnicy wewnętrznej  $d_h = 2,30$  mm. Pozostałe wyniki umieszczono w Załączniku 2.

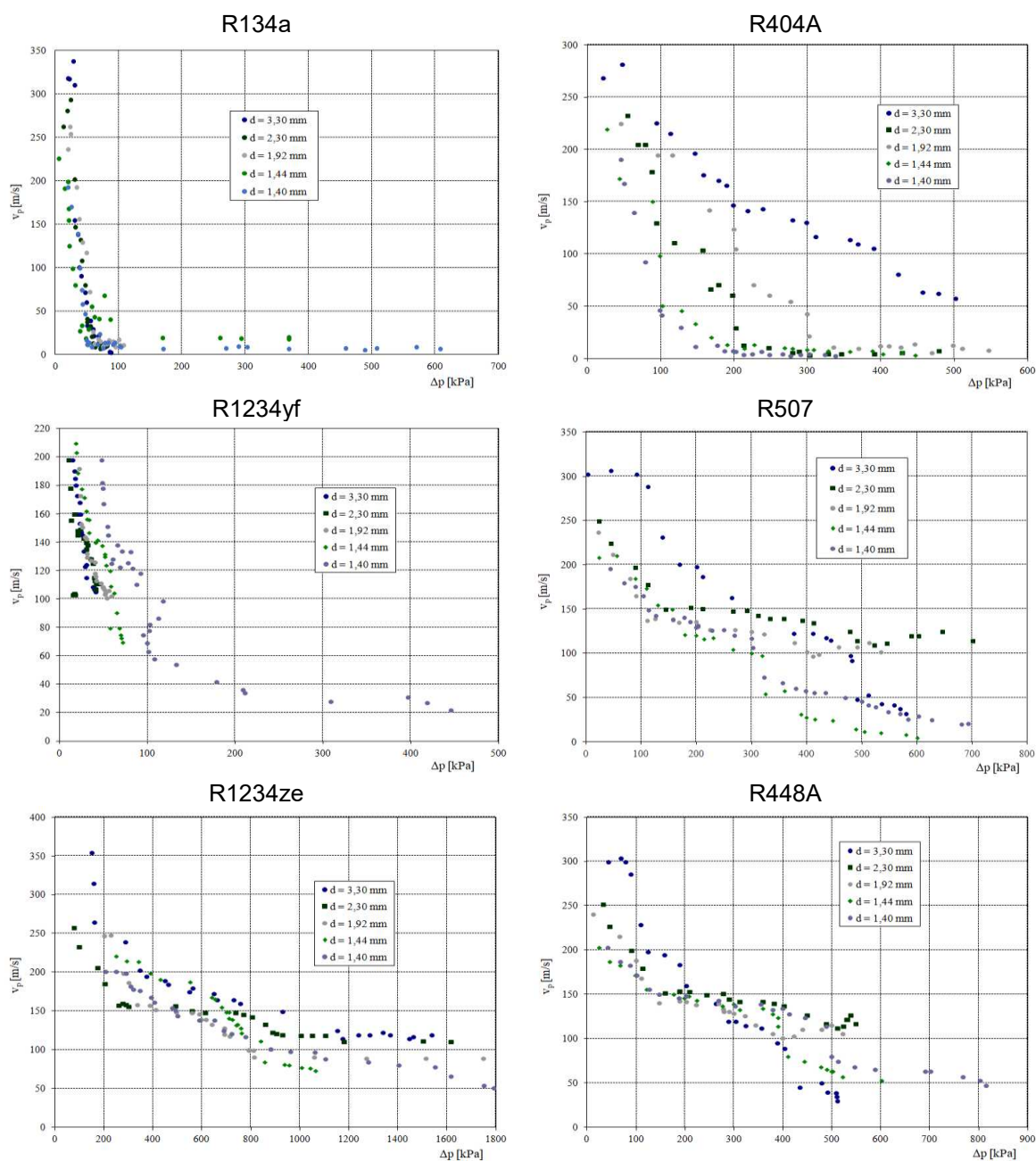
Średnia wartość jednostkowej gęstości strumienia ciepła  $\bar{q}_i$  określono w oparciu o bilans cieplny skraplania na długości podsekcji minikanalu rurowego w strefie dwufazowej ( $x = 0 \div 1$ ) zgodnie z zależnością (6.14) na  $\dot{Q}_i$  oraz znając geometrię sekcji pomiarowej:

$$\bar{q}_i = \frac{\dot{Q}_i}{\pi \cdot d \cdot \Delta l}, \quad (6.15)$$

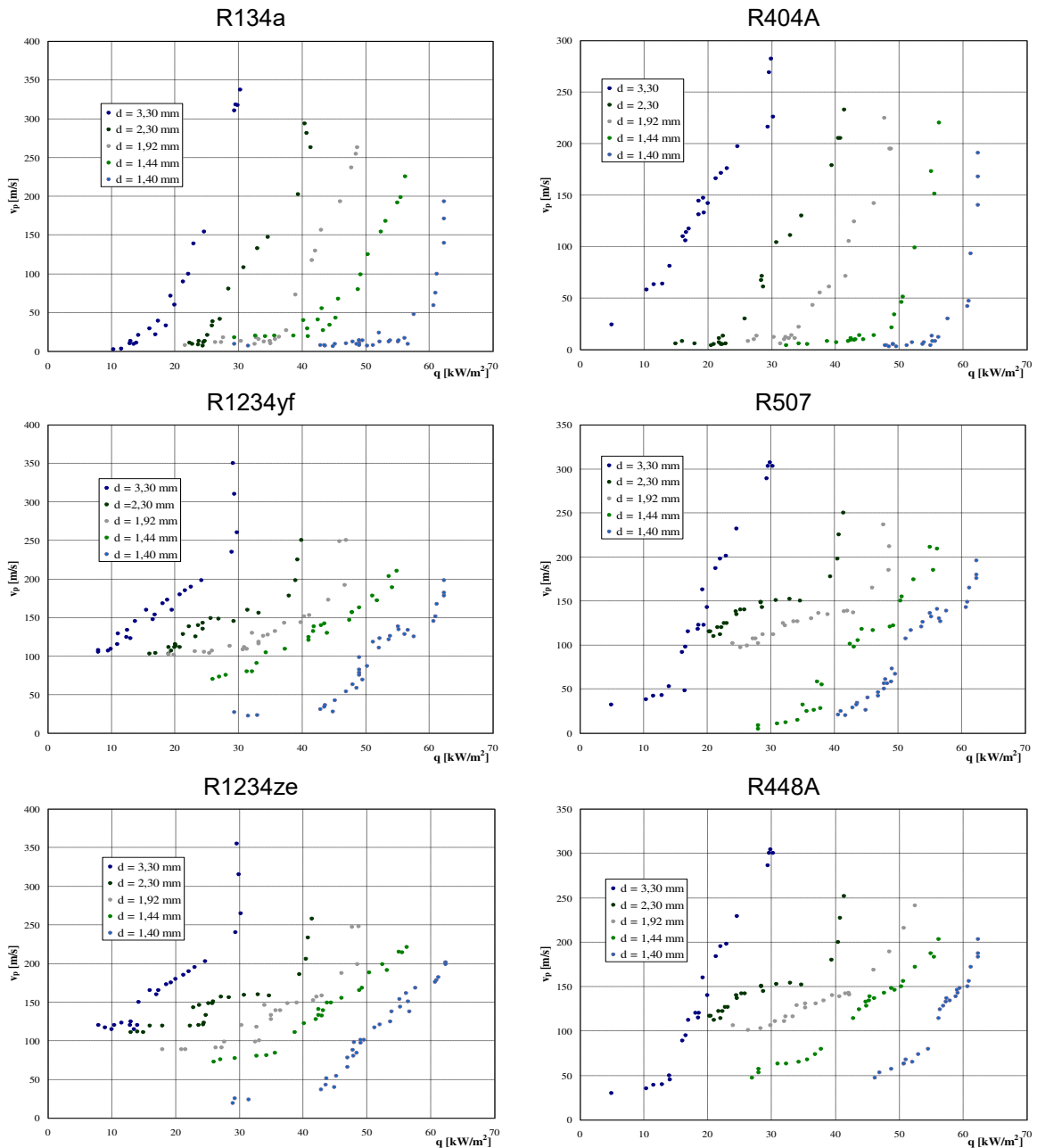
gdzie:

$\Delta l$  – długość podsekcji minikanalu,

Na rys. 6.7 przedstawiono eksperymentalny rozkład prędkości  $v_p$  propagacji niestabilności ciśnieniowych w zależności od wielkości skokowej zmiany ciśnienia  $\Delta p$ , zaś na rys. 6.8 zależność prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  od wielkości średniej, jednostkowej gęstości strumienia ciepła  $\bar{q}_i$ .



Rys. 6.7. Zależność prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  w zależności od skokowej zmiany ciśnienia  $\Delta p$  dla czynnika chłodniczego R134a [82] i jego zamienników R1234yf i R1234ze oraz R404A [82] i jego zamienników R507 i R448A; (w warunkach niestabilności periodycznych)



Rys. 6.8. Zależność prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  od średniej jednostkowej gęstości strumienia ciepła  $q$  dla czynnika chłodniczego R134a [82] i jego zamienników R1234yf i R1234ze oraz R404A [82] i jego zamienników R507 i R448A; (w warunkach niestabilności periodycznych)

Tablica 6.3.

Zestawienie porównawcze obliczonej średniej wielkości jednostkowego strumienia ciepła  $q$  oraz różnicy ciśnienia  $\Delta p$  w zależności prędkości niestabilności ciśnieniowych  $v_p$

$d_h = 1,40$ [mm]								
R134a*			R1234yf			R1234ze		
$v_p$ [m/s]	$q_{sr}$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$\Delta p$ [kPa]	$v_p$ [m/s]	$q_{sr}$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$\Delta p$ [kPa]	$v_p$ [m/s]	$q_{sr}$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$\Delta p$ [kPa]
193	62	19	198	65	48	201	62	206
171	62	24	182	65	49	201	62	249
139	62	35	178	65	49	199	62	289
100	61	38	167	64	50	182	61	306
75	61	40	151	64	54	178	61	317
59	61	42	145	63	55	176	61	344
48	58	46	125	60	59	168	58	390
17	56	48	128	59	61	161	56	405
12	55	49	138	58	65	154	55	476
12	52	50	123	55	69	151	57	490
14	55	51	134	58	71	144	55	499
14	54	52	126	57	78	138	54	588
9	57	57	133	59	81	138	57	649
12	54	66	122	56	83	125	54	688
24	52	69	111	55	88	121	52	719
8	51	75	118	54	92	117	51	775
14	49	77	75	52	95	101	49	879
14	50	82	69	52	100	101	50	879
12	48	90	63	51	101	98	48	959
14	49	93	78	52	102	97	49	1059
10	49	100	82	49	103	88	48	1102
9	49	102	58	57	108	84	48	1277
7	50	169	87	53	112	80	48	1401
8	49	268	99	52	118	78	47	1549
10	47	288	54	50	133	66	47	1613
9	45	301	42	48	179	54	45	1749
7	44	368	36	46	209	51	44	1788
8	44	457	34	46	211	43	44	1846
6	45	488	28	48	309	40	45	1879
8	43	506	31	46	397	37	43	1901
9	29	569	27	32	419	25	29	1909
7	31	607	22	34	446	24	31	1948
						19	29	2001

\*) [82]

Tablica 6.3. c.d.

<b><math>d_h = 1,40</math> [mm]</b>								
<b>R404A**</b>			<b>R507</b>			<b>R448A</b>		
<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{\dot{s}r}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{\dot{s}r}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{\dot{s}r}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>
191	62	46	196	62	43	203	62	42
168	62	50	180	62	68	187	62	68
140	62	64	176	62	88	183	62	88
93	61	79	165	61	102	172	61	101
47	61	99	149	61	112	156	61	126
42	61	101	143	61	125	150	61	147
30	58	127	139	58	156	146	59	188
12	56	147	141	56	177	148	59	202
13	55	177	136	55	188	143	59	268
8	56	187	130	57	198	137	57	301
8	55	198	132	55	202	139	59	355
7	54	202	126	54	226	133	57	379
4	55	212	127	57	248	134	58	399
5	54	224	121	54	267	128	57	412
7	52	237	117	52	298	124	56	445
4	51	248	107	51	301	114	56	488
5	49	266	73	49	321	80	55	499
3	50	277	67	50	355	74	53	512
4	48	290	61	48	378	68	51	545
5	49	301	58	49	397	65	52	588
4	48	324	56	48	412	63	51	690
3	48	338	56	48	433	63	51	701
			50	48	469	57	49	768
			46	47	498	53	47	802
			42	47	510	47	46	815
			40	45	524			
			34	44	547			
			32	44	568			
			26	45	582			
			29	43	601			
			25	41	625			
			20	42	679			
			21	41	691			

\*\*) [82]

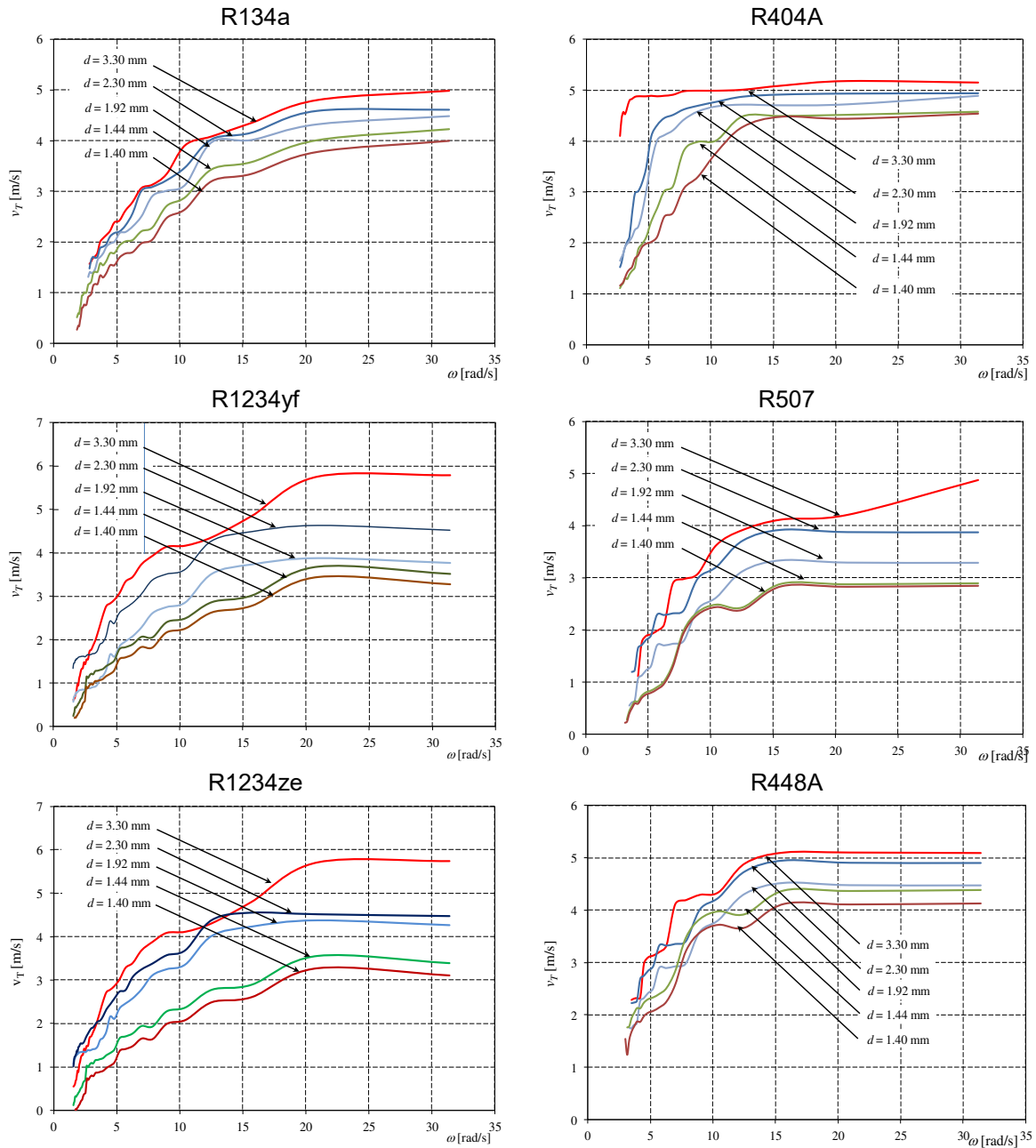


### 6.2.2. Wyniki badań eksperymentalnych prędkości $v_T$ przemieszczania się niestabilności temperaturowych

Periodyczne zamykanie i otwieranie zaworu zasilającego wprowadzało również niestabilności termiczne (temperaturowe) w postaci tzw. *frontu skraplania*, który przemieszczał się wzdłuż ścianki minikanalu z prędkością  $v_T$  (opisaną zależnością 5.2 w rozdziale 5).

W przypadku propagacji *frontu skraplania*  $v_T$ , wykazano, że wpływ wymiaru średnicy wewnętrznej minikanalu jest niewielki [82]. Dla czynnika chłodniczego R134a i kanału o średnicy  $d_h = 1,40$  mm największa wartość wynosi  $v_T = 4,1$  m/s, a dla  $d = 3,30$  mm  $v_T = 4,98$  m/s, natomiast dla czynnika R404 odpowiednio  $v_T = 4,21$  i  $v_T = 5,15$ . W przypadku czynników R1234yf i R1234ze stwierdzono, że wartość prędkości  $v_T$  zbliżyła się do 6 m/s, dla R507 do 5 m/s i oscylowała wokół tej wartości dla czynnika R448A.

W tabelicy 6.4 przedstawiono zestawienie uzyskanych wartości eksperymentalnych prędkości  $v_T$  przemieszczania się niestabilności temperaturowych, które odnoszą się do propagacji *frontu skraplania* dla minikanalu o średnicy  $d_h = 1,92$  mm. Pozostałe wyniki umieszczono w Załączniku 3. Na ich podstawie otrzymano zależności przedstawione na rys. 6.9.



Rys. 6.9. Zależność prędkości propagacji *frontu skraplania*  $v_T$  od częstości  $\omega$  generowanych zakłóceń dla czynnika chłodniczego R134a [82] i jego zamienników R1234yf i R1234ze oraz R404A [82] i jego zamienników R507 i R448A; (w warunkach niestabilności periodycznych) [85]

Tablica 6.4.

Zestawienie porównawcze eksperymentalnych wartości  
prędkości niestabilności temperaturowych  $v_T$

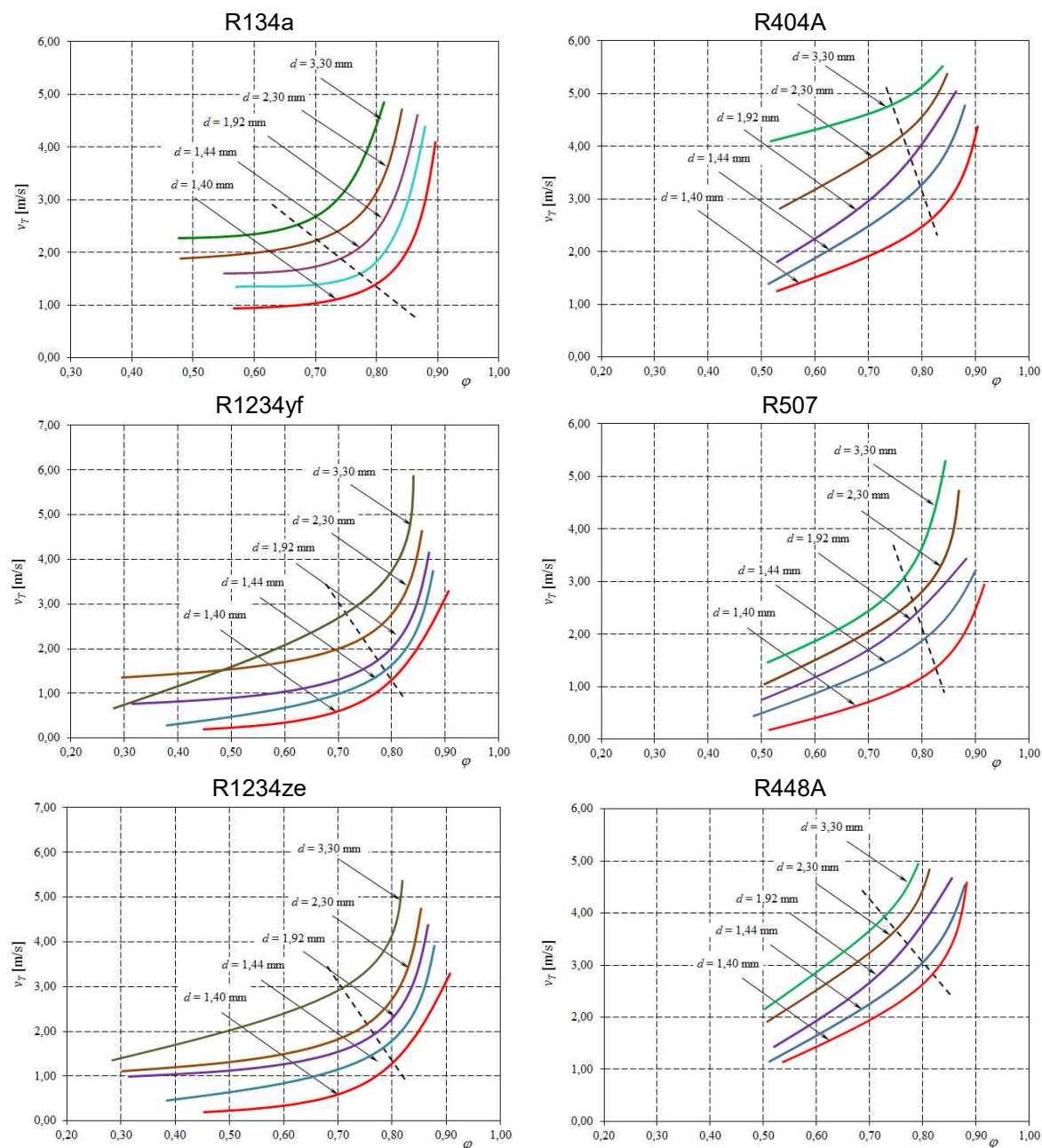
$d_h = 1,92$ [mm]							
		R134a*	R1234ze	R1234yf	R404A**	R507	R448A
$t_0$ [s]	$\omega$ [rad/s]	$v_T$ [m/s]					
0,10	31,40	4,48	4,47	3,76	4,89	3,29	4,48
0,15	20,93	4,32	4,51	3,87	4,72	3,30	4,48
0,20	15,70	4,01	4,55	3,73	4,70	3,34	4,53
0,25	12,56	3,97	4,38	3,52	4,72	3,13	4,32
0,30	10,47	3,14	3,69	2,86	4,68	2,63	3,82
0,35	8,97	3,01	3,57	2,75	4,58	2,41	3,59
0,40	7,85	2,91	3,38	2,61	4,42	1,80	2,99
0,45	6,98	2,51	3,25	2,29	4,21	1,74	2,93
0,50	6,28	2,31	3,08	2,08	4,11	1,71	2,90
0,55	5,71	2,20	2,77	1,96	4,01	1,71	2,90
0,60	5,23	2,18	2,74	1,85	3,57	1,32	2,51
0,65	4,83	2,01	2,58	1,61	3,02	1,23	2,42
0,70	4,49	1,97	2,44	1,66	2,57	1,13	2,32
0,75	4,19	1,91	2,33	1,32	2,31	1,07	2,26
0,80	3,93	1,78	2,17	1,17	2,25	0,65	1,84
0,85	3,69	1,71	2,07	1,12	2,11	0,62	1,81
0,90	3,49	1,66	2,05	0,97	2,03	0,56	1,74
0,95	3,31	1,49	1,98	0,92	1,97		1,75
1,00	3,14	1,41	1,91	0,91	1,92		
1,05	2,99	1,39	1,89	0,89	1,78		
1,10	2,85	1,41	1,84	0,88	1,71		
1,15	2,73	1,31	1,77	0,89	1,64		
1,20	2,62		1,71	0,86			
1,25	2,51		1,65	0,84			
1,30	2,42		1,58	0,85			
1,35	2,33		1,55	0,85			
1,40	2,24		1,54	0,85			
1,45	2,17		1,55	0,84			
1,50	2,09		1,53	0,84			
1,55	2,03		1,47	0,83			
1,60	1,96		1,46	0,82			
1,65	1,90		1,36	0,79			
1,70	1,85		1,38	0,80			
1,75	1,79		1,31	0,76			
1,80	1,74		1,27	0,76			
1,85	1,70		1,25	0,70			
1,90	1,65		1,23	0,70			
1,95	1,61		1,11	0,67			
2,00	1,57		1,01	0,57			

\*) [82] \*\*) [82]

Intensywność przemieszczania się frontu skraplania  $v_T$  można również, tak jak w przypadku niestabilności ciśnieniowych  $v_p$ , odnieść do stopnia zapełnienia  $\varphi$ . Rys. 6.10 przedstawia zależność  $v_T = f(\varphi)$ , która obrazuje zwiększenie prędkości przemieszczania się frontu skraplania wraz ze wzrostem stopnia zapełnienia  $\varphi$ .

Cechą charakterystyczną oddziaływań o charakterze periodycznym jest korelacja pomiędzy prędkością niestabilności temperaturowych  $v_T$  oraz prędkością niestabilności ciśnieniowych  $v_p$ . Współzależność ta jest znana w literaturze [62-64,82] i jak wykazały badania eksperymentalne występuje również podczas skraplania w warunkach niestabilnych nowych proekologicznych czynników chłodniczych (rys. 6.11).

W Tabelicy 6.5. przedstawiono przykładowe wartości stopnia zapełnienia obliczone dla poszczególnych czynników chłodniczych w odniesieniu do niestabilności temperaturowych  $v_T$  dla minikanalu o średnicy  $d_h = 2,30$  mm. Pozostałe umieszczono w Załączniku nr 3.



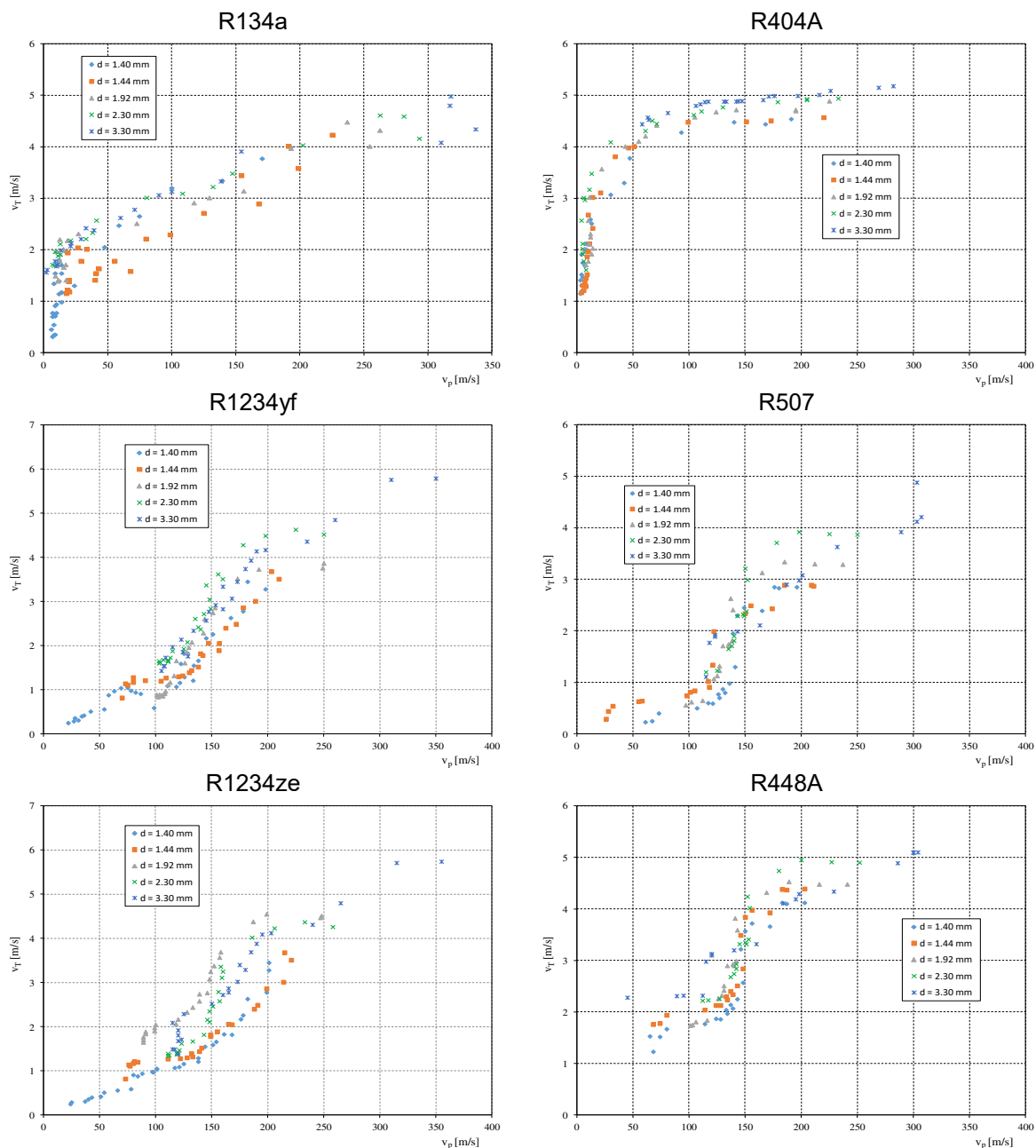
Rys. 6.10. Zależność prędkości propagacji niestabilności temperaturowych  $v_T$  od stopnia zapełnienia  $\varphi$  dla czynnika chłodniczego R134a i jego zamienników R1234yf i R1234ze oraz R404A i jego zamienników R507 i R448A; (w warunkach niestabilności periodycznych) [85]

Tablica 6.5.

Zestawienie porównawcze obliczonej wielkości stopnia zapełnienia  $\varphi$  w odniesieniu do uzyskanych prędkości niestabilności temperaturowych  $v_T$

$d_h = 2,30 \text{ mm}$											
R134a*		R1234yf		R1234ze		R404**		R507		R448A	
$v_T$ [m/s]	$\varphi$	$v_T$ [m/s]	$\varphi$	$v_T$ [m/s]	$\varphi$	$v_T$ [m/s]	$\varphi$	$v_T$ [m/s]	$\varphi$	$v_T$ [m/s]	$\varphi$
4,61	0,85	4,52	0,85	4,26	0,85	4,94	0,84	3,87	0,84	4,90	0,84
4,59	0,86	4,63	0,86	4,37	0,86	4,93	0,82	3,88	0,82	4,91	0,82
4,16	0,86	4,49	0,86	4,23	0,86	4,91	0,81	3,92	0,81	4,95	0,81
4,03	0,83	4,28	0,83	4,02	0,83	4,87	0,79	3,71	0,79	4,74	0,79
3,48	0,81	3,62	0,81	3,36	0,81	4,77	0,79	3,21	0,79	4,24	0,79
3,22	0,81	3,51	0,81	3,25	0,81	4,69	0,76	2,99	0,76	4,02	0,76
3,09	0,80	3,37	0,81	3,11	0,81	4,62	0,75	2,38	0,75	3,41	0,75
3,01	0,78	3,05	0,80	2,79	0,80	4,51	0,74	2,32	0,74	3,35	0,74
2,57	0,75	2,84	0,80	2,58	0,80	4,45	0,70	2,29	0,70	3,32	0,70
2,33	0,74	2,72	0,79	2,46	0,79	4,31	0,68	2,29	0,68	3,32	0,68
2,21	0,71	2,61	0,79	2,35	0,79	4,09	0,66	1,90	0,66	2,93	0,66
2,18	0,68	2,37	0,78	2,11	0,78	3,48	0,63	1,81	0,63	2,84	0,63
2,11	0,63	2,42	0,75	2,16	0,75	3,17	0,62	1,71	0,62	2,74	0,62
1,96	0,58	2,08	0,69	1,82	0,69	3,01	0,61	1,65	0,61	2,68	0,61
1,91	0,57	1,93	0,67	1,67	0,67	2,97	0,59	1,23	0,59	2,26	0,59
1,88	0,57	1,88	0,66	1,62	0,66	2,57	0,58	1,20	0,58	2,23	0,58
1,71	0,51	1,73	0,64	1,47	0,64	2,12	0,57			2,22	0,57
1,69	0,49	1,68	0,62	1,42	0,62	2,02	0,56				
1,71	0,48	1,67	0,62	1,41	0,62	1,92	0,56				
1,65	0,44	1,65	0,55	1,39	0,55	1,78	0,56				
1,41	0,48	1,64	0,54	1,38	0,54	1,61	0,55				
		1,65	0,54	1,39	0,54	1,52	0,54				
		1,62	0,52	1,36	0,52						
		1,60	0,50	1,34	0,50						
		1,61	0,48	1,35	0,48						
		1,61	0,47	1,35	0,47						
		1,61	0,45	1,35	0,45						
		1,60	0,44	1,34	0,44						
		1,60	0,42	1,34	0,42						
		1,59	0,40	1,33	0,40						
		1,58	0,38	1,32	0,38						
		1,55	0,37	1,29	0,37						
		1,56	0,37	1,30	0,37						
		1,52	0,36	1,26	0,36						
		1,52	0,35	1,26	0,35						
		1,46	0,33	1,20	0,33						
		1,46	0,32	1,20	0,32						
		1,43	0,31	1,17	0,31						
		1,33	0,29	1,07	0,29						

\*) [82] \*\*) [82]

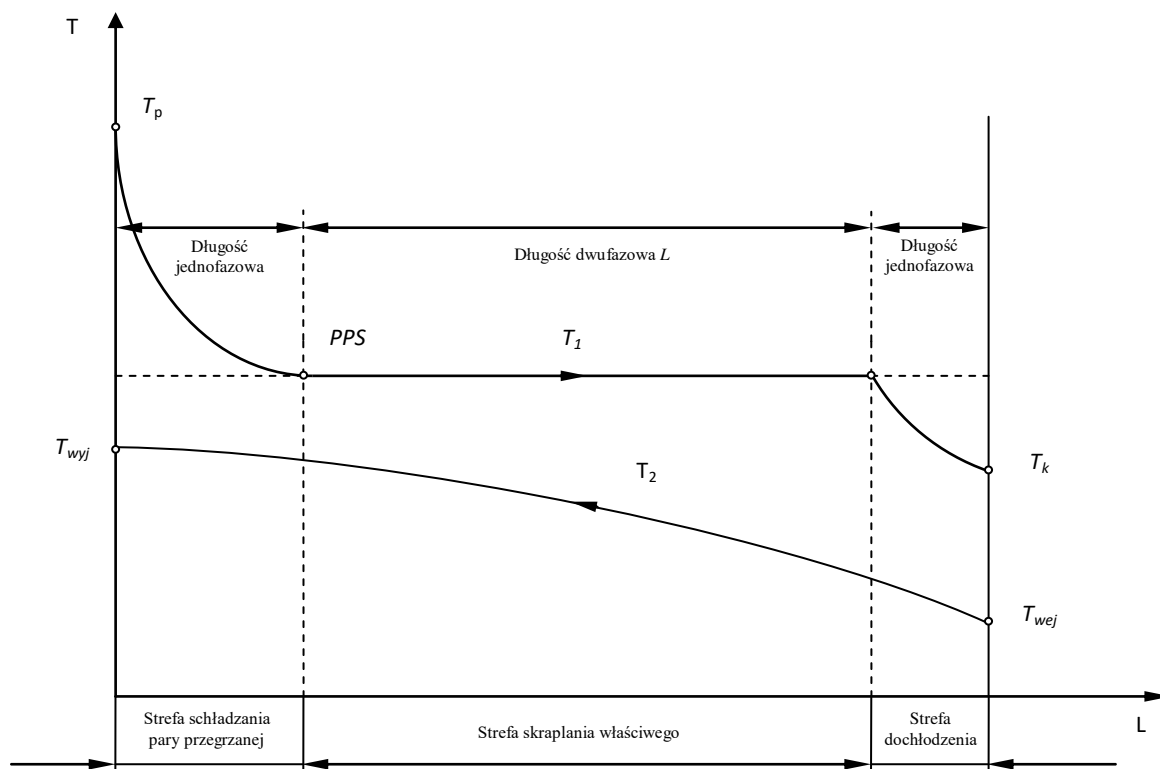


Rys. 6.11. Zależność prędkości propagacji niestabilności temperaturowych  $v_T$  od prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  dla czynnika chłodniczego R134a [82] i jego zamienników R1234yf i R1234ze oraz R404A [82] i jego zamienników R507 i R448A; (w warunkach niestabilności periodycznych)

### 6.2.3. Wyniki badań eksperymentalnych w zakresie długości strefy skraplania

Należy zauważyć, że wielkość  $v_T$  obrazuje prędkość, z jaką zmieniają się długości jednofazowej strefy dochłodzenia oraz dwufazowej skraplania właściwego [63,64]. Dotychczas opublikowane prace dotyczące określenia wielkości strefy skraplania właściwego w minikanalach rurowych stosowanych w skraplaczach kompaktowych są nieliczne i odnoszą się w zasadzie do czynników R134a i R404A [82].

W ramach realizacji badań eksperymentalnych podjęto próbę oceny wpływu niestabilności o charakterze dynamicznym generowanych periodycznie na kształtowanie się stref wymiany ciepła, w szczególności *strefy dwufazowej skraplania właściwego* nowych proekologicznych zamienników czynników chłodniczych R134a i R404A. Charakterystyczny rozkład stref wymiany ciepła w procesie skraplania wraz z opisem przedstawiono na rys. 6.12.



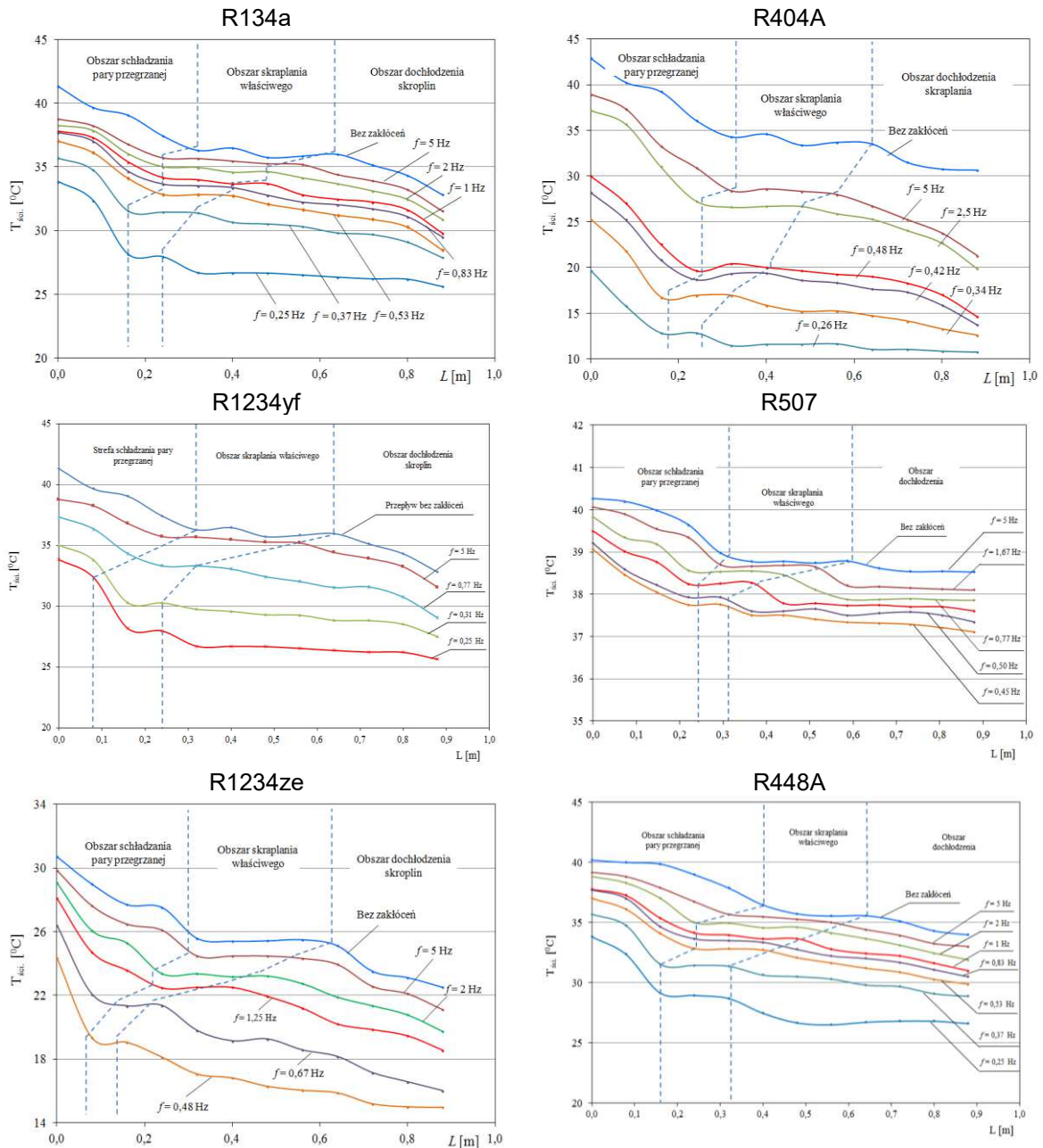
Rys. 6.12. Schemat rozkładu temperatury czynnika chłodniczego i chłodzącego podczas skraplania wewnątrz poziomej rury skraplacza;  $T_p$  - temperatura pary przegrzanej,  $T_s$  - temperatura skraplania (nasylenia),  $T_k$  - temperatura końcowa procesu,  $T_{wej}$ ,  $T_{wyj}$  - temperatura czynnika chłodzącego, odpowiednio na początku i końcu procesu,  $PPS$  – punkt początku skraplania [82]



W strefie pierwszej – zwanej strefą odbioru ciepła przegrzania – następuje *chłodzenie jednofazowe pary przegrzanej*. Wartości *współczynnika przejmowania ciepła*  $\alpha$  w tej strefie są relatywnie niskie, w porównaniu ze strefą drugą. Początkiem strefy drugiej – *strefy dwufazowej skraplania właściwego* – jest przekrój PPS, zwany początkowym punktem skraplania. W tej strefie wartości *współczynnika przejmowania ciepła*  $\alpha$  są relatywnie wysokie (w niektórych przypadkach są wielokrotnie większe od wartości współczynnika w strefie pierwszej i trzeciej). Powstające skropliny czynnika chłodniczego odpływają do strefy trzeciej, zwanej *jednofazową strefą dochłodzenia cieczy*. Wynika stąd, że w przypadku skraplaczy konwencjonalnych, jak i kompaktowych ważne jest, aby strefa *druga skraplania właściwego* miała możliwie największą długość.

Podczas ustalonych warunków pracy skraplacza można teoretycznie określić optymalne warunki procesu skraplania, gdy strefa druga ma długość największą, zaś *strefy jednofazowe* mają niewielki wpływ na obniżenie intensywności procesu wymiany ciepła. W rzeczywistych warunkach pracy urządzeń chłodniczych, pomp ciepła i klimatyzatorów występują zakłócenia, zarówno o charakterze statycznym, jak i dynamicznym, które mogą spowodować zachwianie struktury rozkładu i długości stref wymiany ciepła [19,71,75,83,143].

Wyniki badań przedstawione w Załączniku 3 pozwoliły na graficzną interpretację rozkładu temperatury  $T$  czynnika chłodniczego na długości minikanalu podczas skraplania w przepływie czynników R1234ze, R1234yf, R507 i R448A, w zależności od częstotliwości  $f$  generowanych zakłóceń periodycznych. W tabelicy 6.6 podano przykładowe wartości dla poszczególnych czynników chłodniczych. Porównano je z dostępnymi w literaturze wynikami otrzymanymi dla czynników chłodniczych R134a i R404A [82]. Wykonane porównawcze zestawienia długości tych stref, w zależności od częstotliwości generowanych zakłóceń zewnętrznych w zakresie  $f = 0,26 \div 5$  Hz, przedstawiono na rys. 6.13. Na wykresach zaznaczono obszary *jednofazowego chłodzenia pary przegrzanej*, *dwufazowy obszar skraplania właściwego* oraz *jednofazowy obszar dochłodzenia cieczy* badanych czynników chłodniczych. Pokazano również eksperymentalną zależność  $T_s = f(L)$  w przypadku procesu skraplania ustalonego, przed wprowadzeniem zaburzeń periodycznych.



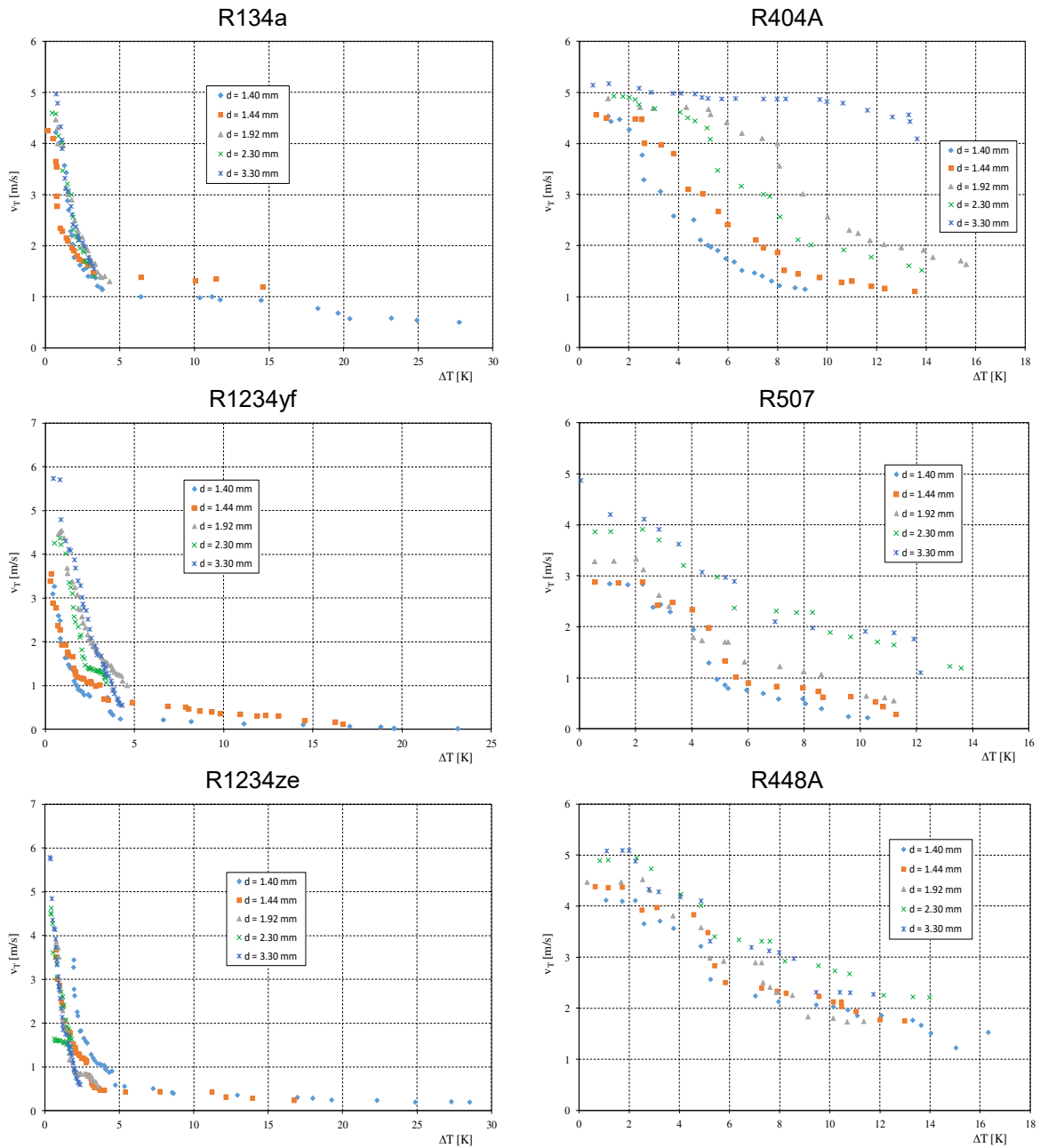
Rys. 6.13. Zależność długości  $L$  stref odbioru ciepła przegrzania, skraplania właściwego i dochłodzenia od częstotliwości  $f$  generowanych zakłóceń dla czynnika chłodniczego R134a [82] i jego zamienników R1234yf i R1234ze oraz R404A [82] i jego zamienników R507 i R448A

Analizując zależności na rys. 6.13 zauważa się, że ze spadkiem częstotliwości generowanych zakłóceń (co odpowiada wzrostowi czasu, w którym występuje brak dopływu czynnika chłodniczego do minikanалу) zmniejsza się *dwufazowy obszar skraplania właściwego*. Zjawisko to odnosi się do intensyfikacji prędkości przemieszczania się niestabilności temperaturowych  $v_T$  oraz kierunku ich prze-

mieszczania.

Na rys. 6.10 obserwuje się, że wraz ze wzrostem częstotliwości kołowej  $\omega$ , zwiększa się też prędkość  $v_T$ . Zwiększenie oddziaływania tych niestabilności na proces skraplania co powoduje zmniejszenie *dwufazowej strefy skraplania właściwego* oraz zwiększenie *jednofazowej dochłodzenia skroplin*. Wraz z tym zjawiskiem kierunek przemieszczania się niestabilności temperaturowych  $v_T$  identyfikowanych jako *front skraplania* będzie przeciwny do napływającego do minikanalu czynnika chłodniczego. Jednocześnie kierunek ten będzie zgodny z tym w jakim następował wzrost *jednofazowej strefy dochłodzenia skroplin*.

Niestabilności o charakterze periodycznym powodowały oscylacyjne zmiany ciśnienia oraz temperatury badanych czynników chłodniczych. Identyfikacja tego zjawiska została przedstawiona w formie graficznej na rys. 6.2 i 6.3. Wraz ze spadkiem częstotliwości generowanych zakłóceń malała prędkość propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  (rys. 6.4), co było wynikiem m.in. wzrostu amplitudy  $\Delta p$  ciśnienia skraplania (rys. 6.7). Na rys. 6.11 zauważa się, że istnieje proporcjonalna zależność między prędkością rozprzestrzeniania się niestabilności temperaturowych  $v_T$  i ciśnieniowych  $v_p$ . Zgodnie z tym, wraz ze spadkiem ciśnienia rośnie również amplituda temperatury  $\Delta t$  (rys. 6.14) skraplającego się czynnika w minikanalach rurowych. Wynikiem tych oddziaływań oprócz zmniejszenia strefy skraplania właściwego (rys. 6.13) jest również spadek wartości jednostkowych gęstości strumienia ciepła  $q$  (rys. 6.8).



Rys. 6.14. Zależność prędkość przemieszczania się niestabilności temperaturowych  $v_T$  od amplitudy temperatury  $\Delta T$  dla czynnika chłodniczego R134a [82] i jego zamienników R1234yf i R1234ze oraz R404A [82] i jego zamienników R507 i R448A.

### 6.3. Podsumowanie wyników badań eksperymentalnych

Na podstawie przeprowadzonych badań rozprzestrzeniania się niestabilności dynamicznych, generowanych periodycznie, w minikanalach rurowych o średnicy hydraulicznej  $d_h = 1,40 \div 3,30$  mm podczas skraplania w przepływie nowych, proekologicznych czynników chłodniczych R1234yf, R1234ze, R507 i R448A, będących zamiennikami R134a i R404A można stwierdzić, że:

1. Przeprowadzono badania eksperymentalne dotyczą procesu skraplania, podczas, których generowano niestabilności dynamiczne zewnętrzne o charakterze periodycznym. Inicjacja niestabilności polegała na czasowym ograniczeniu dopływu czynnika chłodniczego do sekcji pomiarowej badanych minikanalów. Proces ten realizowano periodycznie z zadaną częstotliwością  $f$ . Wielkość  $f$  (wyrażana również w postaci częstotliwości kołowej  $\omega$ ), uwzględnia tzw. czas relaksacji  $\theta$  powrotu układu do równowagi termodynamicznej. Zakres częstotliwości wynosił  $f = 0,25 \div 5$  Hz, zaś częstotliwości kołowej (pulsacji)  $\omega = 1,57 \div 31,4$  rad/s.
2. Na podstawie badań stwierdzono, że rozprzestrzenianie się niestabilności dynamicznych w układzie podczas skraplania w przepływie cechuje charakter falowy. Występują one w postaci przemieszczającego się sygnału zmiany ciśnienia  $\Delta p$  z prędkością  $v_p$  i sygnału zmiany temperatury (*frontu skraplania*) z prędkością  $v_T$ .
3. Prędkość propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  jest zależna od oscylacyjnych zmian ciśnienia skraplania o amplitudzie  $\Delta p$ . W sposób bezpośredni przekłada się to na współzależność od stopnia zapełnienia  $\varphi$  oraz jednostkowego strumienia ciepła  $q$ .
4. Prędkość  $v_p$  sygnału zmiany ciśnienia jest o dwa rzędy wielkości większa od prędkości  $v_T$  sygnału zmiany temperatury. Prędkości te są ze sobą powiązane. Większej wartości prędkości  $v_p$  odpowiada większa wartość  $v_T$  i odwrotnie.
5. Propagacja niestabilności temperaturowych identyfikowanych jako tzw. Prędkość  $v_T$  *frontu skraplania* jest również współzależna od stopniem zapełnienia  $\varphi$  oraz jednostkowego strumienia ciepła  $q$ .
6. Stwierdzono, że wzrost czasu ograniczenia dopływu czynnika chłodniczego do badanych minikanalów rurowych powoduje wzrost jednofazowej strefy dochło-

dzenia skroplin oraz „cofanie się” frontu skraplania  $v_T$  w kierunku przeciwnym do przepływu czynnika. Powoduje to spadek wydajności cieplnej skraplacza. Zjawisko to powiązane jest ze wzrostem amplitudy  $\Delta T$  oscylacyjnych zmian temperatury.

Wszystkie zidentyfikowane powyżej zjawiska odnoszą się do nowych proekologicznych zamienników wycofywanych obecnie z użytkowania R134a i R404A. W ramach realizacji celu pracy przebadano czynniki R1234yf, R1234ze, R507 i R448A a wyniki badań porównano z uprzednio uzyskanymi dla R134a i R404A, które są dostępne w literaturze. Stwierdzono, że zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym są one do siebie zbliżone.

Na podstawie badań eksperymentalnych określono wartości prędkości przemieszczania się *frontu skraplania*  $v_T$  oraz prędkość propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  w minikanalach rurowych dla badanych czynników chłodniczych R134a, R1234yf, R1234ze oraz R404A, R507A i R448A. Wyniki zamieszczono w tablicy 6.6.

Tablica 6.6

Zestawienie porównawcze eksperymentalnych wartości prędkości przemieszczania się *frontu skraplania*  $v_T$  oraz prędkość propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  w minikanalach rurowych

Czynnik	$v_p$ [m/s]	$v_T$ [m/s]
R134a	2 ÷ 318	0,27 ÷ 4,98
R1234yf	23 ÷ 350	0,20 ÷ 5,79
R1234ze	19 ÷ 355	0,02 ÷ 5,74
R404A	3 ÷ 269	1,15 ÷ 5,15
R507	5 ÷ 303	0,23 ÷ 4,88
R448A	29 ÷ 300	1,23 ÷ 5,09

Na podstawie badań eksperymentalnych określono również zależność długości  $L_i$  stref odbioru ciepła przegrzania, skraplania właściwego i dochłodzenia od częstotliwości  $f$  generowanych zakłóceń (rys. 6.13).

W związku z powyższym można stwierdzić, że potwierdzono zdefiniowaną w rozdziale 4 hipotezę mówiącą o tym, że: *częstotliwość generowania niestabilności dynamicznych podczas skraplania proekologicznych czynników chłodni-*

*czych w minikanalach rurowych powoduje zmiany prędkości ich przemieszczania oraz wpływa na wielkość strefy skraplania właściwego.*

*Jednocześnie uzyskano odpowiedź na postawiony problem: jaki jest wpływ niestabilności o charakterze dynamicznym na proces przemiany fazowej skraplania w minikanalach rurowych proekologicznych czynników chłodniczych oznaczonych symbolami R1234ze(E), R1234yf, R507A i R448a przewidzianych jako zamienniki dla dotychczas stosowanych R134a i R404A.*





## 7. Modelowanie fizyczne procesu skraplania w przepływie w minikanalach rurowych w warunkach niestabilności dynamicznych generowanych periodycznie

### 7.1. Wprowadzenie

Analiza literatury [3,5,11,13÷15,18,74,76,82,85,101] wykazała, że dostępne modele obliczeniowe dotyczące określenia prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych i temperaturowych podczas skraplania w minikanalach rurowych w warunkach niestabilności dotyczą tylko czynników R134a oraz R404.

W obliczeniach modelowych propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  wykorzystuje się jednowymiarowy, nierównowagowy, dwupłynowy model stosowany do opisu przepływów dwufazowych. Jednym z istotnych elementów w rozwiązaniu tego zagadnienia jest jego uzależnienie od stopienia zapelnienia  $\varphi$  czynnika chłodniczego, poprawnej identyfikacji struktury przepływu dwufazowego oraz innych oddziaływań międzyfazowych.

Prędkość przemieszczania się niestabilności temperaturowych  $v_T$ , które odnosi się do tzw. *frontu skraplania*, opisuje się matematycznie w oparciu o stopień zapelnienia  $\varphi$  czynnika chłodniczego, ale również parametry przepływu dwufazowego, takie jak: gęstość i entalpia.

W literaturze [19,82,83] znane są również modele stosowane do określenia wielkości strefy skraplania w oparciu o nieskomplikowane modele algebraiczne.

Zastosowanie wymienionych wyżej modeli może doprowadzić do zadowalających wyników zgodności z badaniami eksperymentalnymi [83]. Należy jednak zauważyć, że w szczególności w odniesieniu do określenia prędkości propagacji niestabilności zarówno ciśnieniowych jak i temperaturowych są one raczej trudne do zastosowania w działaniach o tzw. charakterze inżynierskim. W związku z powyższym zdecydowano się zaproponować nowy model oparty na analizie wymiarowej.

W celu opisu prędkości  $v_p$  przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia i sygnału zmiany temperatury  $v_T$  zastosowano funkcje regresji opisujące zależność wartości oczekiwanej zmiennej objaśnianej (szukanej) od zmiennych obja-

śniających (danych). W tym celu wykorzystano procedury analizy wymiarowej, z uwzględnieniem teorematu *II-Buckingham*, zakładającego, że liczba modułów bezwymiarowych równa jest liczbie niezależnych parametrów fizycznych, pomniejszonej o liczbę wymiarów podstawowych, takich jak: metr, sekunda, kilogram itp. [86,123].

Poniżej przedstawiono metodę określenia bezwymiarowych liczb opisujących prędkości rozprzestrzeniania się niestabilności w minikanalach rurowych podczas skraplania czynników chłodniczych w warunkach niestabilności dynamicznych. Zakłócenia powodujące niestabilności dynamiczne mają postać fali ciśnieniowej, którą w literaturze przedmiotu odnosi się do tzw. *niestabilności akustycznych* oraz niestabilności temperaturowych o postaci tzw. *frontu skraplania*. Te założenia leżą u podstaw metody opisu wpływu niestabilności, z wykorzystaniem funkcji regresji.

Wielkość prędkości przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia  $v_p$  wywołanego niestabilnościami o charakterze dynamicznym można uzależnić funkcyjnie od następujących parametrów:

$$v_p = f(\Delta p, p_k, \nu, d_h, w, \varphi), \quad (7.1)$$

gdzie:

$v_p$  – prędkość przemieszczania się zmiany sygnału ciśnienia, [m/s],

$\Delta p$  – amplituda oscylacji ciśnienia skraplania podczas zakłóceń, [MPa],

$p_k$  – ciśnienie skraplania czynnika chłodniczego, [MPa],

$d_h$  – średnica hydrauliczna minikanalu, [m],

$\nu$  – kinematyczny współczynnik lepkości mieszaniny dwufazowej, [m<sup>2</sup>/s],

$w$  – średnia prędkość mieszaniny dwufazowej czynnika chłodniczego, [m/s],

$\varphi$  – stopień zapełnienia.

Z przyjętych założeń wynika, że prędkość przemieszczania się wywołanych niestabilności dynamicznych zależy od amplitudy i częstotliwości ich generowania oraz właściwości cieplno-fizycznych czynnika chłodniczego. Wielkość amplitudy oscylacji ciśnienia  $\Delta p$  zależy od zmiany stopnia zapełnienia  $\varphi$  skraplającego się czynnika chłodniczego (rys. 6.6). Spadek ciśnienia skraplania powoduje wzrost wartości  $\varphi$ , a przyrost ciśnienia analogicznie obniża  $\varphi$ . Z rys. 6.5 wynika, że zmiana stopnia zapełnienia  $\varphi$  wpływa w dużym stopniu na wartość prędkości  $v_p$  przemieszczania się niestabilności ciśnieniowych w ośrodku dwufazowym. Ce-

chą charakterystyczną jest zjawisko wzrostu prędkości dźwięku  $c$  w ośrodkach jednofazowych i jego spadek w mieszaninach. W odniesieniu do niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  w literaturze [82,85,101] uznaje się, że ich prędkość propagacji jest tożsama z prędkością dźwięku  $c$ . Potwierdziły to wyniki badań eksperymentalnych prezentowane w rozdziale 6, w postaci zależności  $v_p = f(\Delta p)$  i  $v_T = f(\Delta p)$  oraz  $v_p = f(\varphi)$  i  $v_T = f(\varphi)$ .

Jednym z głównych parametrów mających wpływ na generowanie niestabilności dynamicznych, zarówno o charakterze propagacji niestabilności ciśnieniowych, jak i temperaturowych ma masowe natężenie przepływu czynnika chłodniczego. Niestabilności tego typu mogą być odnoszone do zakłóceń gęstości strumienia masy (co przedstawiono w rozdziale 3).

W przypadku niestabilności dynamicznych o charakterze jednostkowym niestabilności masowego natężenia przepływu  $\dot{m}$ , mają postać oscylacyjnej zmiany wartości tej wielkości.

Oscylacje zmiany masowego natężenia przepływu czynnika chłodniczego, wywołane periodycznym generowaniem niestabilności dynamicznych traktuje się w literaturze przedmiotu, jako przemieszczanie fali monochromatycznej o małej amplitudzie i częstotliwości wzdłuż osi kanału poziomego. Na podstawie prac autorów [74,78,81,82,84] opisano oscylacyjne zmiany masowego natężenia przepływu mierzonego na dopływie do minikanалу, następującą zależnością:

$$\dot{m}_{nies}(t) = \dot{m}_r [1 + A_{osc} \cdot \sin(2\pi ft)], \quad (7.2)$$

gdzie:

$\dot{m}_{nies}$  – masowe natężenie przepływu czynnika termodynamicznego w warunkach niezakłóconych, [kg/s],  $\dot{m}_r = w \cdot \rho_{TPF} \cdot A$ ,

$A$  – pole przekroju mini kanału, m<sup>2</sup>,

$w$  – prędkość przepływu, m/s

$A_{osc}$  – amplituda względna oscylacji masowego natężenia przepływu,

$f$  – częstotliwość generowanych niestabilności, [Hz],

$t$  – czas, [s].

W zależności (7.2) gęstość  $\rho_{TPF}$  mieszaniny dwufazowej określono z zależności [82]:

$$\rho_{TPF} = \frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v + X \cdot (\rho_l - \rho_g)}, \quad (7.3)$$

gdzie:

$\rho_l$  – gęstość cieczy, [kg/m<sup>3</sup>],

$\rho_v$  – gęstość gazu, [kg/m<sup>3</sup>],

$x$  – stopień suchości, [-].

Wartość stopnia suchości czynnika  $x_i$  w  $i$ -tym przekroju minikanalu wyznacza się zgodnie z metodyką podaną w podrozdziale 6.2.1.

Wielkość  $A_{osc.}$  w zależności (7.2) opisuje amplitudę względną oscylacji masowego natężenia przepływu czynnika chłodniczego i wyraża się zależnością [82]:

$$A_{osc.} = A_o \cdot \exp^{\omega t k}, \quad (7.4)$$

gdzie:

$A_o$  – początkowa amplituda względną niestabilności,  $A_o = -p_g$  [82]

$p_g$  – ciśnienie pary, [MPa]

$\bar{\omega}$  – średnia częstość kołowa, [rad/s],

$t$  – czas, [s],

$k$  – liczba falowa, [1/m], określona wzorem:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v_f}, \quad (7.5)$$

gdzie:

$\lambda$  – długość fali, [m],

$v_f$  – prędkość fazowa zakłóceń,  $v_f = \frac{\Delta l}{\Delta \tau}$  [m/s],

$\Delta l$  – odległość pomiędzy czujnikami ciśnienia, [m],

$\Delta \tau$  – czas przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia, [s],

$\omega$  – pulsacja (częstość kołowa) parametru podstawowego,  $\omega = 2\pi f$  [rad/s] [53,62],

$f$  – częstotliwość generowanych zakłóceń,  $f = \frac{1}{T}$  [Hz],

$T$  – okres fali, [s].

Najmniejszą wartość amplitudy  $A$  oscylacji masowego natężenia przepływu identyfikuje się jako niezakłócony promień wewnętrznej powierzchni filmu kondensatu i wyraża się zależnością:

$$\delta = \frac{r_0}{2}, \quad (7.6)$$

gdzie  $r_o$  to promień minikanalu.

W odniesieniu do zależności (7.1) zastosowano analizę wymiarową w celu uzyskania opisu bezwymiarowej prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych. Pełną analizę wymiarową przedstawiono w Załączniku 4 niniejszej pracy. Uzyskano następującą postać oczekiwanej zależności dla niestabilności o charakterze periodycznym:

$$v_p^+ = C \cdot \text{Re}_{TPF}^a \cdot (\Delta p^+)^b \cdot \varphi^c, \quad (7.7)$$

gdzie:

$v_p^+$  – bezwymiarowa prędkość określona stosunkiem prędkości  $v_p$  przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia, do prędkości w mieszaniny dwufazowej (zależność Z.4.23),

$\Delta p^+$  – bezwymiarowy spadek ciśnienia określony stosunkiem amplitudy  $\Delta p$  oscylacji ciśnienia do ciśnienia  $p_k$  skraplania czynnika chłodniczego (zależność Z.4.8),

$\text{Re}_{TPF}$  – bezwymiarowa liczba *Reynolds'a* dla przepływu dwufazowego (zależność Z.4.14).

Równanie (7.7) sprowadza się do postaci liniowej za pomocą obustronnego logarytmowania:

$$\log v_p^+ = \log C + a \cdot \log \text{Re}_{TPF} + b \cdot \log \Delta p^+ + c \cdot \log \varphi. \quad (7.8)$$

Obliczenie stałej  $C$  oraz wykładników potęg:  $a$ ,  $b$  i  $c$  w równaniu (7.8) wykonano stosując model regresji nieliniowej, z wykorzystaniem metody największej wiarygodności (alternatywa dla metody sumy największych kwadratów), a odchylenie standardowe wartości obserwowanej od przewidywanej określono za pomocą tzw. *funkcję straty*. Maksymalizację funkcji wiarygodności (dobór odpowiednich parametrów spełniających ten warunek) wykonano stosując metody *quasi-Newtona* oraz *Symplex*, będące standardowymi modułami obliczeniowymi w pakiecie programowym *Statistica*. Dla każdego czynnika przeprowadzono rachunek wyrównawczy za pomocą równań zbudowanych na podstawie wyników badań eksperymentalnych.

W analogiczny sposób wyznaczono wartości bezwymiarowej prędkości  $v_T^+$ , ujmującej przemieszczanie się sygnału zmiany temperatury  $v_T$ . Jej wartość uzależniono funkcyjnie od parametrów:

$$v_T = f(\Delta T, T_k, \nu, d, w, \varphi). \quad (7.9)$$

Po zastosowaniu procedur analizy wymiarowej uzyskano zależność dla niestabilności periodycznych w postaci:

$$v_T^+ = C \cdot \text{Re}_{TPF}^a \cdot (\Delta T^+)^b \cdot \varphi^c, \quad (7.10)$$

gdzie:

$v_T^+$  – bezwymiarowa prędkość określona stosunkiem prędkości  $v_T$  przemieszczania się sygnału zmiany temperatury, do prędkości w mieszaniny dwufazowej (zależność Z.4.45),

$\Delta T^+$  – bezwymiarowy spadek temperatury określony stosunkiem amplitudy oscylacji temperatury do temperatury skraplania się czynnika chłodniczego  $T_k$  [K] (zależność Z.4.31).

Zależność (7.10) również sprowadzono do postaci liniowej za pomocą obustronnego logarytmowania uzyskując:

$$\log v_T^+ = \log C + a \cdot \log \text{Re}_{TPF} + b \cdot \log \Delta T^+ + c \cdot \log \varphi. \quad (7.11)$$

Obliczenie stałej  $C$  oraz wykładników potęg:  $a$ ,  $b$  i  $c$  w równaniu (7.11) wykonano również stosując model regresji nieliniowej.

## 7.2. Modele funkcji regresji dla badanych czynników chłodniczych

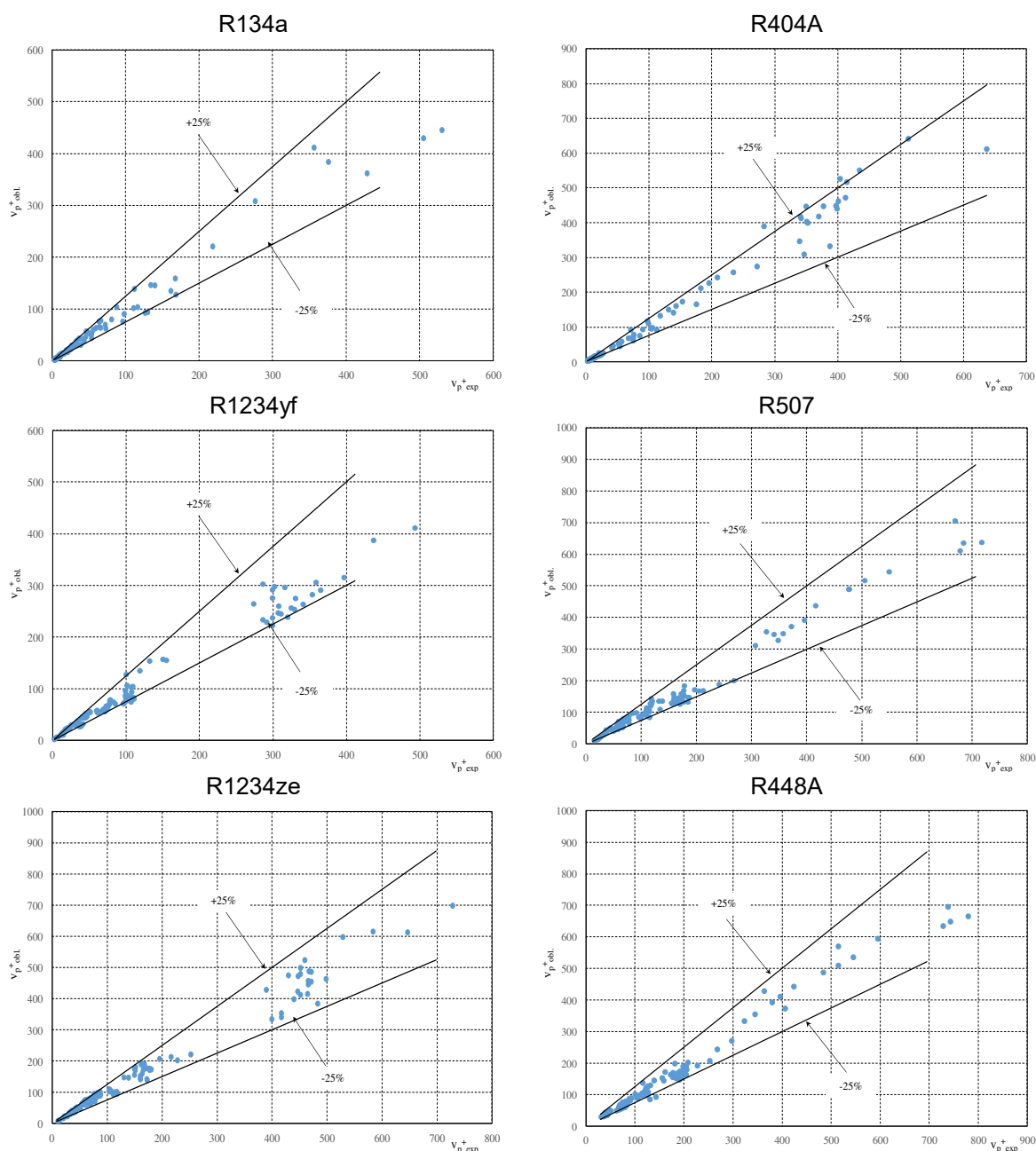
### 7.2.1. Model regresyjny periodycznych niestabilności ciśnieniowych

Dla rozpatrywanych czynników chłodniczych zastosowano funkcję regresji dla periodycznych niestabilności ciśnieniowych.

Poniżej podano przykładowe wyniki obliczeń uzyskane dla czynnika R404A, dla którego wartości współczynników wyniosły:  $C = 2,36 \cdot 10^{10}$ ,  $a = -2,40$ ,  $b = -0,40$  i  $c = 3,56$ , przy wariancji wynoszącej 81% i współczynnikiem istotności  $R = 0,90$ . Pozwoliło to na sformułowanie zależności w następującej postaci:

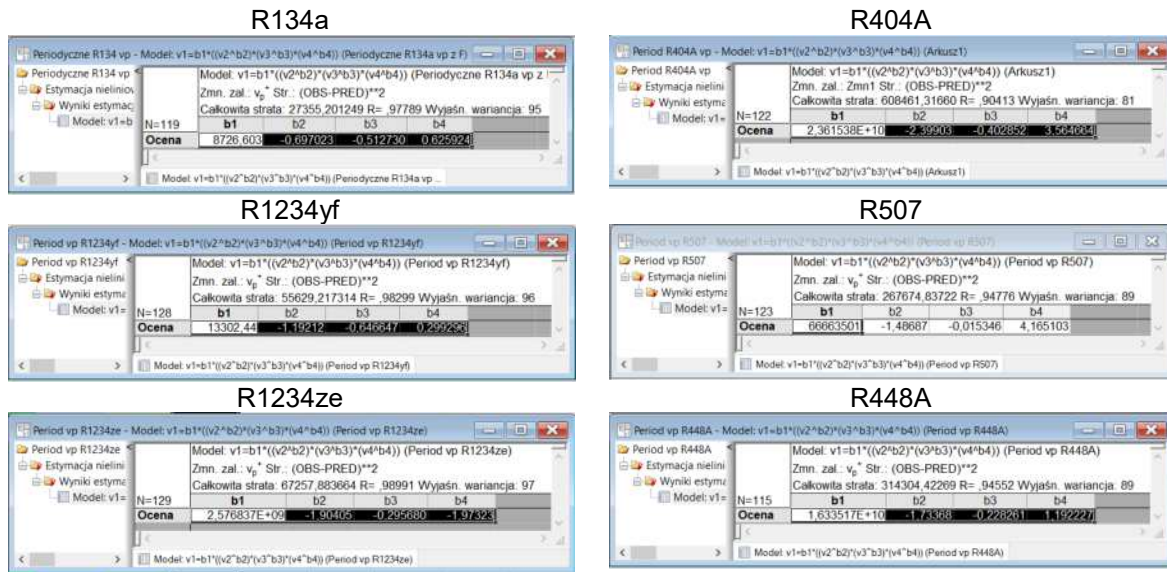
$$v_p^+ = 2,36 \cdot 10^{10} \cdot \text{Re}_{TPF}^{-2,40} \cdot \Delta p^{+0,40} \cdot \varphi^{3,56}. \quad (7.12)$$

Wartości bezwymiarowej prędkości  $v_p^+_{reg}$  obliczone z równania (7.11), porównano z wynikami badań eksperymentalnych  $v_p^+_{exp}$  uzyskując zadowalającą zgodność w przedziale  $\pm 25\%$ . Zakres uzyskanych zgodności odnosi się do wszystkich badanych czynników chłodniczych, co przedstawiono na rys. 7.1.



Rys. 7.1. Zależność bezwymiarowej prędkości  $v_p^+_{reg}$  otrzymanej na drodze analizy wymiarowej od wartości uzyskanej w badaniach eksperymentalnych  $v_p^+_{exp}$  dla badanych czynników chłodniczych

Wartości jakie uzyskano dla wszystkich czynników chłodniczych opracowano zgodnie z zależnością (7.7) wykorzystując oprogramowanie *Statistica* (rys. 7.2) określając wartości niewiadomych  $C, a, b$  i  $c$  przy odpowiedniej wariancji z populacji  $\sigma^2$  oraz współczynnikach istotności  $r$ -Pearsona.



Rys. 7.2. Zrzut ekranu z programu *Statistica* dla uzyskanych wartości niewiadomych dla zależności opisujących wielkość  $v_p^+$  badanych czynników chłodniczych

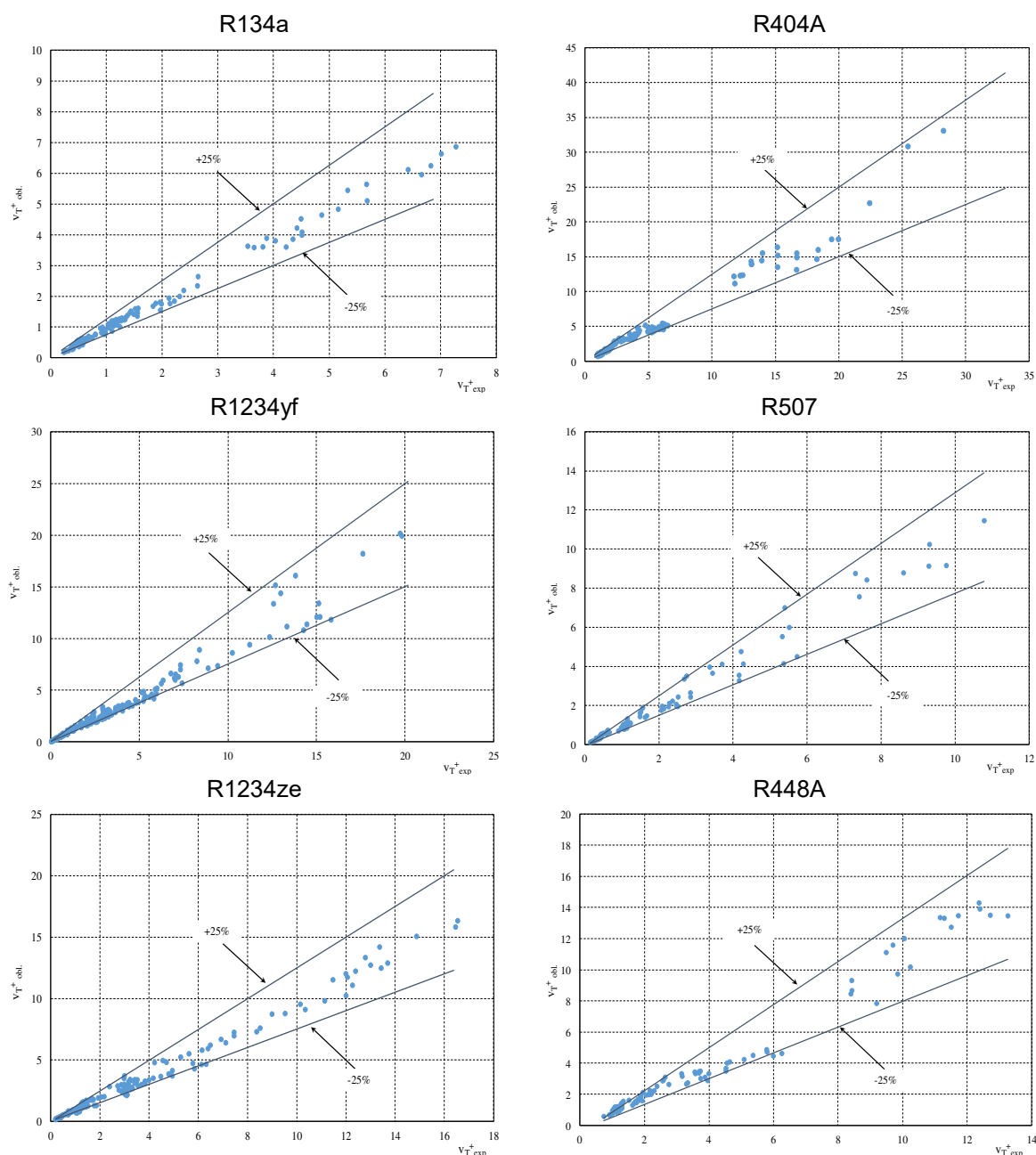
### 7.2.2. Model regresyjny periodycznych niestabilności temperaturowych

Analogicznie jak dla niestabilności periodycznych ciśnieniowych określono wartości stałych charakterystyczne dla równań regresji niestabilności temperaturowych. Przykładowe wyznaczenie tej funkcji przedstawiono dla czynnika R1234ze. Określone niewiadome o wartościach wynoszących  $C = 65,31 \cdot 10^4$ ,  $a = -1,3$ ;  $b = -1,48$ ;  $c = -0,29$ , przy wariancji 97% oraz współczynniku istotności  $R = 0,98$  pozwoliły na sformułowanie zależności regresyjnej na bezwymiarową wielkość  $v_T^+$  o postaci:

$$v_T^+ = 65,31 \cdot 10^4 \cdot Re_{TPF}^{-1,3} \cdot \Delta T^{+,-1,48} \cdot \varphi^{-0,29} \quad (7.13)$$

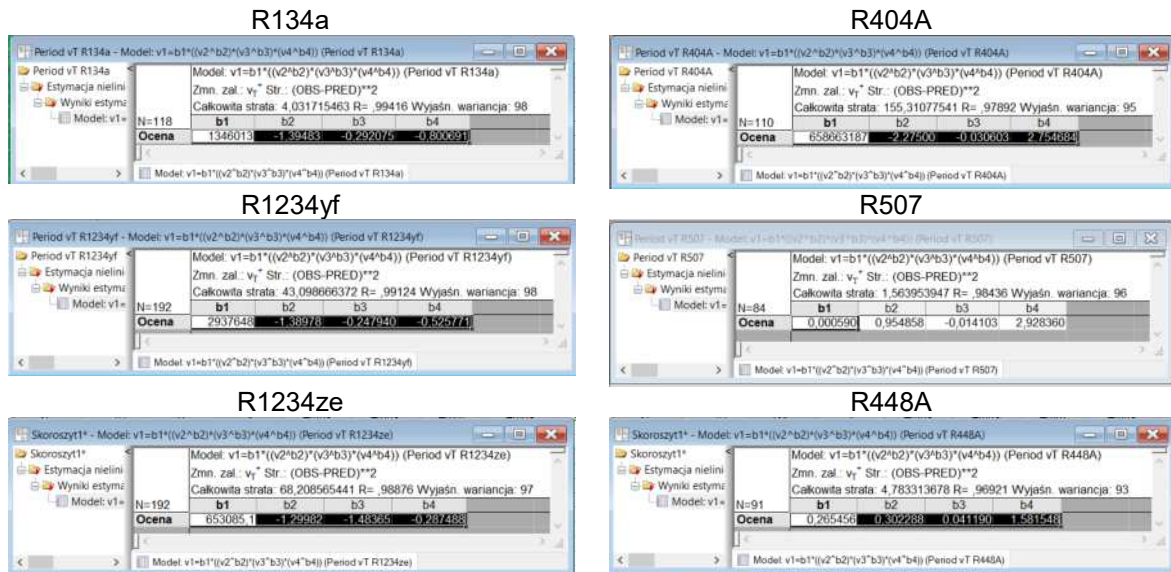
Wartości bezwymiarowej obliczeniowej prędkości  $v_{T^+reg}$  otrzymane z równania (7.13) porównano z wynikami badań eksperymentalnych  $v_{T^+exp}$ , uzyskując zadowalającą zgodność w przedziale  $\pm 25\%$ . Również w tym przypadku uzyskano taką zgodność dla wszystkich badanych czynników chłodniczych co przedstawiono na rys. 7.3.





Rys. 7.4. Zależności bezwymiarowej prędkości  $v_{T,reg}^+$  otrzymanej na drodze analizy wymiarowej od wartości uzyskanych w badaniach eksperymentalnych  $v_{T,exp}^+$  dla badanych czynników chłodniczych

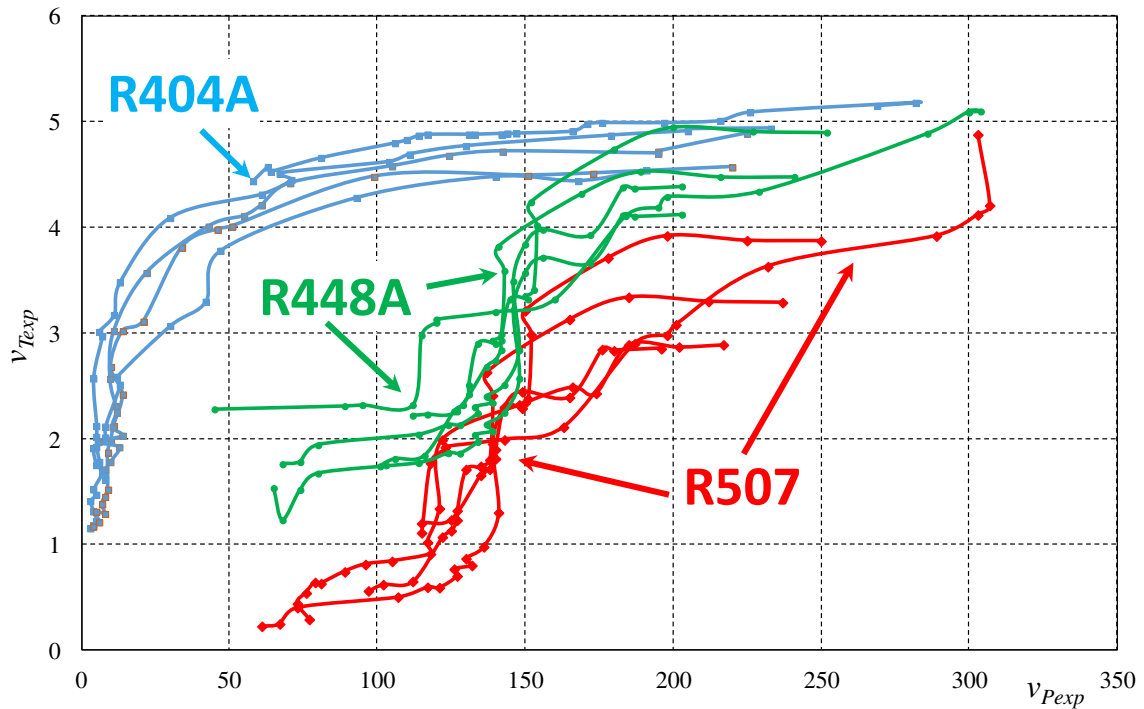
Wartości stałych  $C, a, b$  i  $c$  również w tym przypadku wyznaczono stosując program *Statistica* (rys. 7.5). Stosując ogólną postać równania (7.10) określono funkcje regresji dla poszczególnych czynników chłodniczych (tablica 7.1).



Rys. 7.5. Zrzut ekranu z programu *Statistica* dla uzyskanych wartości niewiadomych dla zależności opisujących wielkość  $v_T^+$  badanych czynników chłodniczych

### 7.2.3. Uogólniony model regresyjny dla czynników R404A, R507 i R448A

Analiza literatury [21-26,33,36,41] wykazała, że prędkość  $v_T$  przemieszczania się sygnału zmiany temperatury wykazuje tendencję współzależności od prędkości przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia  $v_p$ . W przypadku czynników chłodniczych R404A, R507 i R448A zjawisko to jest raczej tendencją a współzależność jest szczególnie zauważalna dla każdego z badanych czynników z osobna (rys. 7.5). Analizując rozkład poszczególnych zależności  $v_{Texp}$  od  $v_{Pexp}$ . Zauważa się, że w przypadku czynników R507 i R448A wykazują one znaczne rozproszenie. Interpretacja tego zjawiska związana jest z faktem, że wszystkie z tych czynników to mieszaniny azeotropowe, a oddziaływania o charakterze niestabilności dynamicznych mogły ujawnić zjawisko poślizgu temperaturowego.



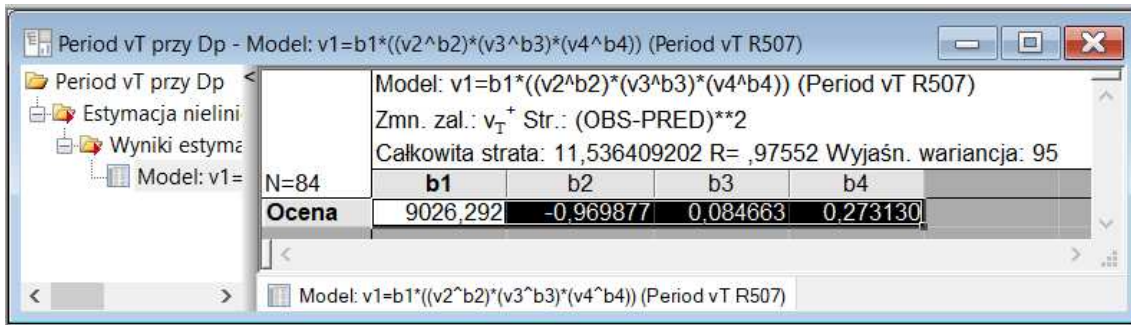
Rys. 7.5. Zależność prędkości przemieszczania się sygnału zmiany temperatury  $v_T$  od prędkości przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia  $v_P$  dla czynników R404A, R507 i R448A

Również bezwymiarowe wielkości  $v_T^+$  i  $v_P^+$  wykazują taką współzależność. Zależność (7.10) pozwala wyznaczać wartość bezwymiarowej prędkości przemieszczania się sygnału zmiany temperatury  $v_T^+$ . Można ją sprowadzić do postaci ujmującej zamiast bezwymiarowego spadku temperatury  $\Delta T^+$  bezwymiarowym spadkiem ciśnienia  $\Delta p^+$ . Uzasadnieniem takiego podejścia jest eksperymentalnie stwierdzona współzależność tych wielkości, co przedstawiono w rozdziale 6 na rys. 6.11.

$$v_T^+ = C \cdot \text{Re}_{TPF}^a \cdot \Delta p^{+b} \cdot \varphi^c \quad (7.14)$$

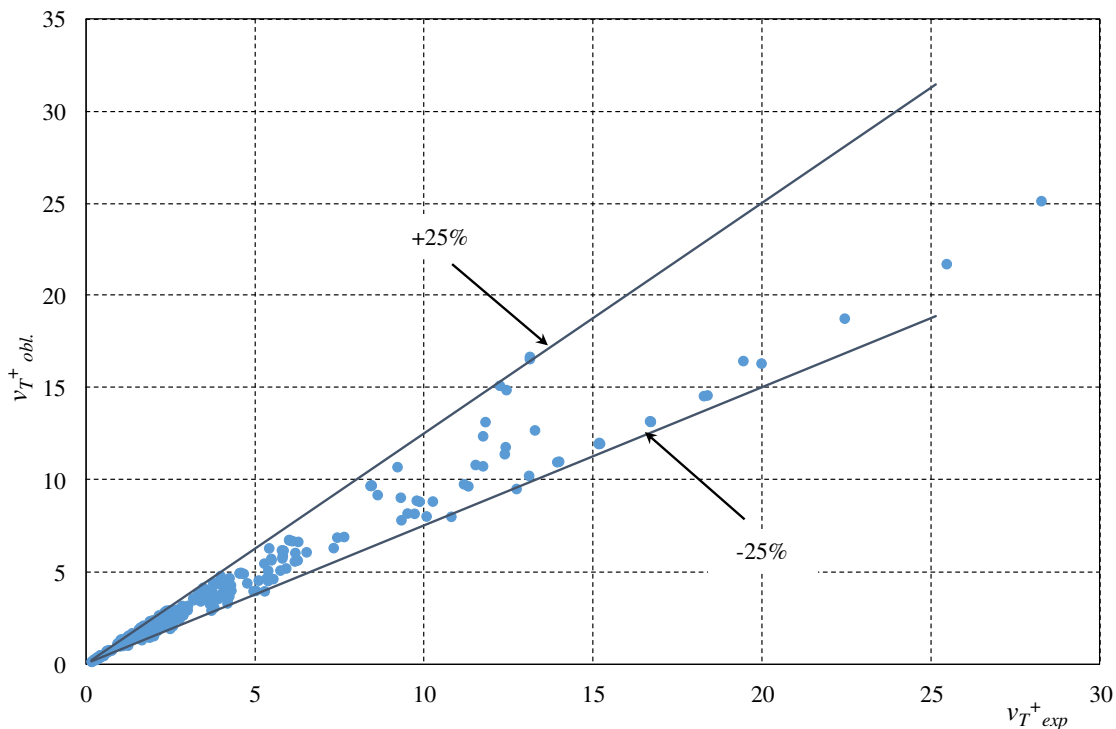
Wartości współczynników dla zależności (7.14) wyznaczone za pomocą programu Statistica (rys. 7.6), wynoszą:  $C = 9026$ ;  $a = 0,97$ ,  $b = 0,085$ ,  $c = 0,27$ , przy wariancji 95% i współczynniku istotności  $R = 0,98$ . W związku z powyższym postać ostateczna wzoru (7.14), to:

$$v_T^+ = 9026 \cdot \text{Re}_{TPF}^{-0,97} \cdot \Delta p^{+0,085} \cdot \varphi^{0,27} \quad (7.15)$$



Rys. 7.6. Wartości stałych uzyskane w programie *Statistica* dla  $v_T^+$  czynników R404A, R507 oraz R448A

Porównanie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych z obliczeniowymi uzyskanymi wg zależności (7.15), przedstawiono na rys. 7.7.

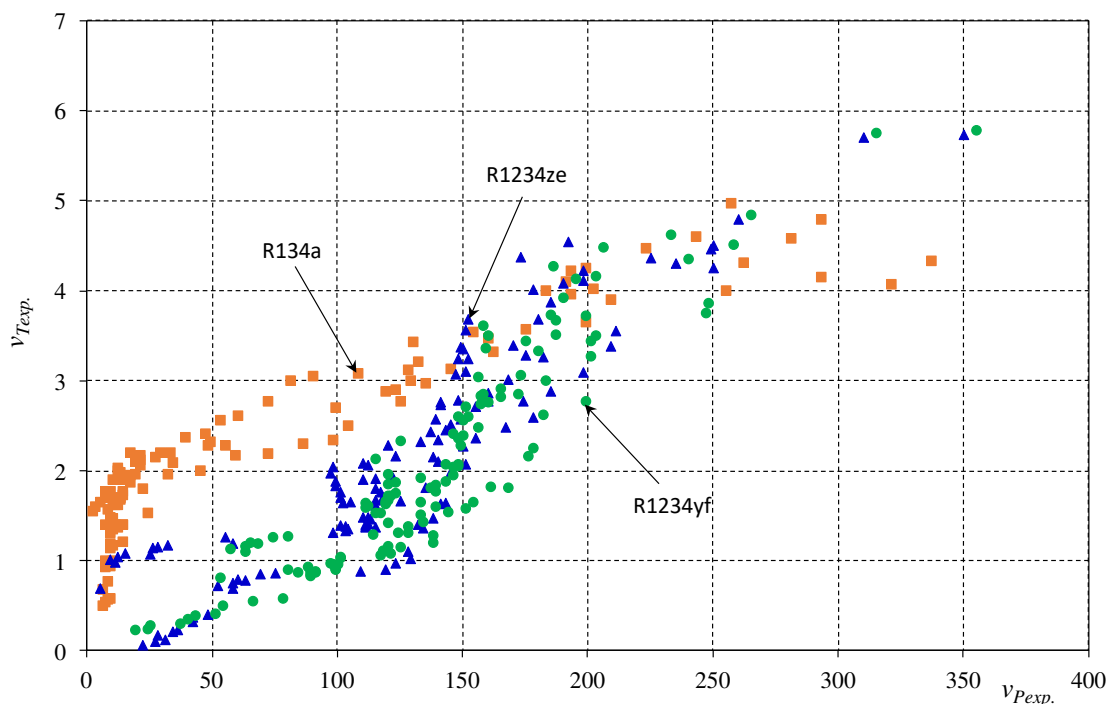


Rys. 7.7. Zależność bezwymiarowej obliczeniowej prędkości przemieszczania się sygnału zmiany temperatury  $v_T^+$  od bezwymiarowej eksperymentalnej prędkości przemieszczania się sygnału zmiany temperatury  $v_T^+$  dla czynników R404A, R507 i R448A

Należy zaznaczyć, że zależności (7.10) i (7.14) są równoznaczne i można je stosować alternatywnie, w zależności od przyjętych założeń i aktualnych potrzeb.

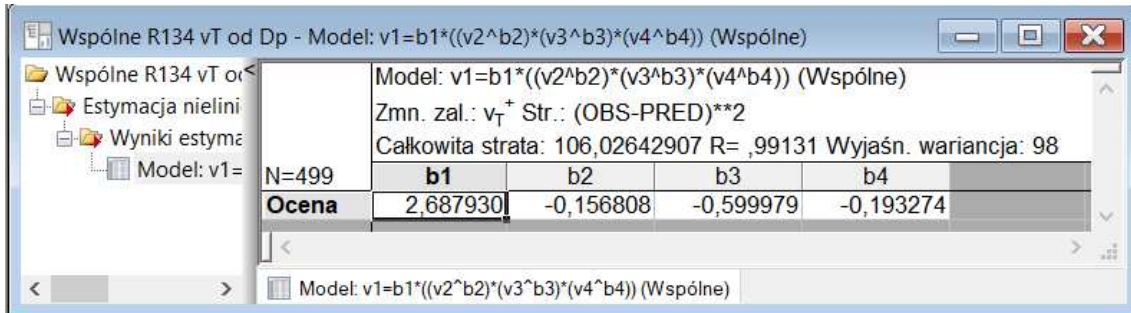
### 7.2.4. Uogólniony model regresyjny dla czynników R134a, R1234yf i R1234ze

Analogicznie jak dla czynników chłodniczych R404A, R507 i R448A, określono współzależność prędkości przemieszczania się sygnału zmiany temperatury  $v_T$  i ciśnienia  $v_p$  (rys. 7.8). W przypadku czynników R134a i izomerów R1234yf i R1234ze ta zależność jest znacznie bardziej zauważalna niż dla czynników R404A, R507, R448A. Wy tłumaczeniem tego stanu może być fakt, że R134a i R1234 w odmianach to czynniki homogeniczne. Powoduje to, że nie ma możliwości wystąpienia w przypadku tych czynników tzw. poślizgu temperaturowego.



Rys. 7.8. Zależność prędkości przemieszczania się sygnału zmiany temperatury  $v_T$  od prędkości przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia  $v_p$  dla czynników R134a [82], R1234yf i R1234ze

Również w tym przypadku podjęto próbę uogólnienia zależności (7.10) określono wartości współczynników dla zależności (7.14) otrzymując:  $C = 2,69$ ;  $a = -0,16$ ,  $b = -0,60$ ,  $c = -0,19$ , przy wariancji 98% i współczynniku istotności  $R = 0,99$ . W procedurze tej również wykorzystano program *Statistica* (rys. 7.9).

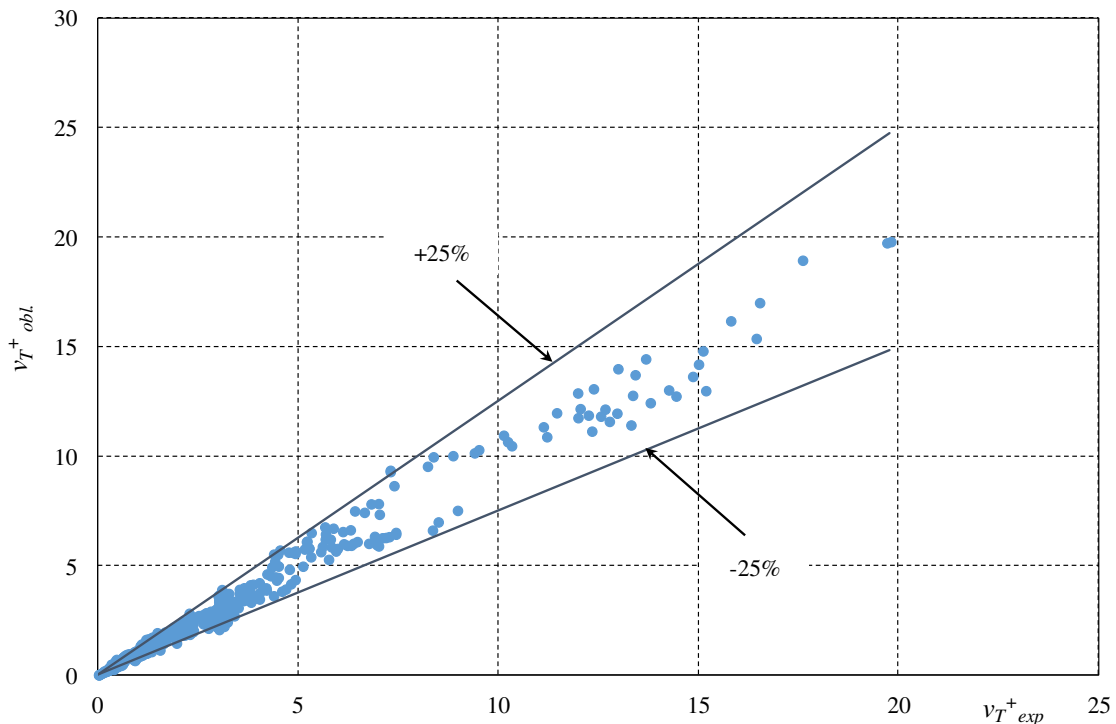


Rys. 7.9. Wartości stałych uzyskane w programie *Statistica* dla  $v_T^+$  czynników R134a, R1234yf i R1234ze

Zależność (7.14) przyjmuje postać:

$$v_T^+ = 2,69 \cdot Re_{TPF}^{-0,16} \cdot \Delta p^{+0,6} \cdot \varphi^{-0,19} \quad (7.16)$$

Porównanie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych z obliczeniowymi uzyskanymi wg zależności (7.11), przedstawiono na rys. 7.10



Rys. 7.10. Zależność bezwymiarowej prędkości  $v_{T_{reg}}^+$  otrzymanej na drodze analizy wymiarowej od wartości uzyskanej w badaniach eksperymentalnych  $v_{T_{exp}}^+$  dla czynników R134a, R1234yf i R1234ze

W tabelicy 7.1 zbiorczo przedstawiono wielkości tworzących korelacje, opisujące bezwymiarowe prędkość propagacji dynamicznych periodycznych niestabilności ciśnieniowych  $v_p^+$  oraz temperaturowych  $v_T^+$  opracowanych dla czynników chłodniczych: R134a, R1234yf, R1234ze, R404A, R507 i R448A. W zestawieniu tabelarycznym podano również zakres dokładności porównania wyników obliczeniowych z eksperymentalnymi. Zawierał się on w przedziale  $\pm 25\%$ .

Tabela 7.1.

Zestawienie korelacji obliczeniowych opisujących wielkości  $v_p^+$  i  $v_T^+$   
dla badanych czynników chłodniczych

Postać równania modelu regresji		Rodzaj czynnika chłodniczego					
Model regresji dynamicznych niestabilności ciśnieniowych		R134a	R1234yf	R1234ze	R404A	R507	R448A
$v_p^+ = C \cdot Re_{TPF}^a \cdot (\Delta p^+)^b \cdot \varphi^c$							
Wartości niewiadomych	C	8726,6	$13,30 \cdot 10^3$	$2,59 \cdot 10^9$	$2,36 \cdot 10^{10}$	$6,66 \cdot 10^7$	$1,63 \cdot 10^{10}$
	a	-0,70	-1,19	-1,90	-2,40	-1,49	-1,73
	b	-0,51	-0,65	-0,30	-0,40	-0,02	-0,23
	c	0,63	0,30	-1,93	3,56	4,17	1,19
Współczynnik istotności <i>r-Pearsona</i>		0,98	0,98	0,91	0,9	0,95	0,95
Wariancja z populacji $\sigma^2$		95%	96%	96%	81%	89%	89%
Zakres zgodności modelu		$\pm 25\%$	$\pm 25\%$	$\pm 25\%$	$\pm 25\%$	$\pm 25\%$	$\pm 25\%$
Model regresji dynamicznych niestabilności temperaturowych		R134a	R1234yf	R1234ze	R404A	R507	R448A
$v_T^+ = C \cdot Re_{TPF}^a \cdot (\Delta T^+)^b \cdot \varphi^c$							
Wartości niewiadomych	C	$13,46 \cdot 10^5$	$29,39 \cdot 10^5$	$65,32 \cdot 10^5$	$6,59 \cdot 10^8$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	0,27
	a	-1,39	-1,39	-1,30	-2,78	0,95	0,30
	b	-0,29	-0,25	-1,48	-10,03	-0,014	0,04
	c	-0,80	-0,53	-0,29	2,75	2,93	1,58
Współczynnik istotności <i>r-Pearsona</i>		0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97
Wariancja z populacji $\sigma^2$		98%	98%	97%	95%	96%	93%
Zakres zgodności modelu		$\pm 25\%$	$\pm 25\%$	$\pm 25\%$	$\pm 25\%$	$\pm 25\%$	$\pm 25\%$

### 7.3. Podsumowanie

Opracowane na podstawie badań eksperymentalnych zależności pozwalają na wyznaczenie bezwymiarowych prędkości przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia  $v_p^+$  i prędkości sygnału zmiany temperatury  $v_T^+$ , wywołanych niestabilnościami dynamicznymi o charakterze periodycznym. Stwierdzono zadowalającą zgodność wielkości obliczeniowych uzyskanych dla wszystkich czynników chłodniczych w odniesieniu do eksperymentalnych. Zakres tej zgodności mieści się w przedziale  $\pm 25\%$ , przy ogólnej wartości wariancji wynoszącej średnio 0,97 i współczynnika istotności  $R = 0,98$ . Zauważa się również, że wraz ze współzależnością  $v_p$  i  $v_T$ , która opisano w rozdziale 6 korelacja taka występuje dla bezwymiarowych wielkości  $v_p^+$  i  $v_T^+$ . W związku z tym opracowano odpowiednie zależności regresyjne opisujące to zjawisko.



## 8. Podsumowanie

W prezentowanej rozprawie podjęto próbę oceny wpływu niestabilności dynamicznych o charakterze periodycznym na skraplanie w przepływie przez minikanały nowych, proekologicznych zamienników dla *F-gazów* R134a i R404A. Badania eksperymentalne skraplania zrealizowano dla izomerów R1234yf i R1234ze traktowanych jako substytuty R134a oraz czynników R507 i R448A, jako zamienniki czynnika R404A.

Generowanie niestabilności dynamicznych polegało na wywoływaniu oscylacyjnych zmian (wzrostu/zaniku) gęstości strumienia masy czynnika chłodniczego na dopływie do sekcji pomiarowej, w której umieszczono minikanały rurowe o przekroju kołowym i średnicy hydraulicznej  $d_h = 1,40; 1,44; 1,92; 2,30$  i  $3,30$  mm. Prowadziło to do okresowych zmian ciśnienia i temperatury wzdłuż drogi przepływu czynnika w badanych minikanałach. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych odniesiono i porównano z wartościami, jakie otrzymano uprzednio dla czynników chłodniczych bazowych, tzn. R134a i R404A. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów i modelowania fizycznego procesu skraplania stwierdzono, że:

1. Wielkość i częstotliwość generowanych niestabilności dynamicznych o charakterze periodycznym w minikanałach rurowych ze skraplającym się czynnikiem chłodniczym wpływają nie tylko na zmiany na prędkości ich przemieszczania się, ale również zmiany długości strefy skraplania właściwego. Zjawisko to jest w przypadku badanych substytutów *F-gazów* jakościowo porównywalne z czynnikami bazowymi, natomiast w niektórych przypadkach występują różnice ilościowe w odniesieniu do czynników R134a i R404A.
2. W ramach przeprowadzonych badań eksperymentalnych zidentyfikowano występowanie rozprzestrzeniania się niestabilności ciśnieniowych z prędkością  $v_p$ , w odniesieniu do prędkości dźwięku  $c$  (w mieszaninie dwufazowej) oraz temperaturowe z prędkością  $v_T$  zidentyfikowane, jako przemieszczanie się tzw. *frontu skraplania*.
3. Stwierdzono, że wartości prędkości przemieszczania się *frontu skraplania*  $v_T$  w minikanałach rurowych mieści się dla badanych czynników chłodniczych R1234yf, R1234ze oraz R448A i R507A, w przedziale  $v_T = 0,14 \div 5,15$  m/s.

Natomiast zakres prędkości  $v_p$  przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia wynosił odpowiednio: R1234yf  $20 \div 318$  m/s, R1234ze  $28 \div 318$  m/s oraz R507A  $14 \div 269$  m/s, R448A  $11 \div 269$  m/s. Dla porównania, prędkość propagacji niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  w przypadku czynnika chłodniczego R134a wynosiła  $4 \div 318$  m/s, a w przypadku R404A  $4 \div 269$  m/s.

4. Prędkość  $v_p$  niestabilności ciśnieniowych oraz temperaturowych  $v_T$  są zależne od stopnia zapelnienia  $\varphi$ . Wraz ze spadkiem wielkości stopnia zapelnienia  $\varphi$  następuje zmniejszenie prędkości rozprzestrzeniania się tych zakłóceń. Taki sam trend zależności  $v_p$  oraz  $v_T$  od  $\varphi$  wykazano wcześniej dla R134a i R404A.
5. Prędkość niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  jest zależna od skokowej zmiany ciśnienia  $\Delta p$ , natomiast temperaturowych  $v_T$  od amplitudy  $\omega$  oscylacyjnych zmian temperatury  $\Delta T$ .
6. Wartości prędkości niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  zależą także od gęstości strumienia ciepła  $\bar{q}$ , co ma bezpośredni wpływ na kształtowanie się *dwufazowej strefy skraplania właściwego*. Zmniejszenie wielkości tego obszaru następuje ze spadkiem częstotliwości generowanych zakłóceń, co jest związane ze wzrostem czasu, w którym nie następował dopływ czynnika chłodniczego do badanych minikanalów.
7. Umożliwienie generowania niestabilności dynamicznych wpływa zdecydowanie negatywnie na efektywność energetyczną procesu skraplania oraz prowadzi w konsekwencji do takich samych skutków dla skraplacza kompaktowego.

Biorąc pod uwagę wnioski podane powyżej stwierdza się, że postawiona hipoteza niniejszej rozprawy została jednoznacznie potwierdzona. Na podstawie aktualnego stanu wiedzy oraz wykonanych badań eksperymentalnych stwierdza się w szczególności, że:

1. Skraplanie proekologicznych zamienników dotychczas stosowanych *F-gazów* R134a i R404A w minikanalach w warunkach niestabilnych ma charakter falowy.
2. Wartości prędkości  $v_p$  i  $v_T$  przemieszczania się niestabilności w postaci odpowiednio zmiany ciśnienia i temperatury skraplających się proekologicznych substytutach F-gazów w warunkach niestabilności dynamicznych zewnętrz-

nych generowanych periodycznie.

3. Niestabilności ciśnieniowe i temperaturowe mają wpływ na wielkość *strefy skraplania właściwego* i wydajność grzewczą kompaktowych wymienników ciepła.

Opracowane wyniki badań eksperymentalnych oraz wyniki modelowania zjawiska skraplania proekologicznych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych pozwalają na ich wykorzystanie w zastosowaniach aplikacyjnych w odniesieniu do projektowania skraplaczy kompaktowych tak, aby w/w wpływ niestabilności dynamicznych został zminimalizowany.

Istotnym efektem niniejszej rozprawy jest to, że dla każdego z badanych czynników chłodniczych uzyskano funkcje regresji opisujące bezwymiarowe wielkości kryterialne oddzielnie dla prędkości przemieszczania się niestabilności ciśnieniowych  $v_p^+$  oraz temperaturowych  $v_T^+$ .

Na bazie analizy wynikającej z modelowania procesu skraplania w warunkach periodycznych niestabilności dynamicznych podjęto skuteczną próbę uzyskania uogólnionego zapisu modelu regresyjnego:

1. Dla czynnika chłodniczego R134a oraz jego zamienników R1234yf i R1234ze w postaci wzoru (7.26).
2. Dla czynnika chłodniczego R404A oraz jego zamienników R507 i R448A w postaci wzoru (7.19).

Wyniki obliczeń wg modeli regresyjnych są możliwe do bezpośredniego wykorzystania w aplikacjach inżynierskich.

W obszarze praktycznym, należy zwrócić uwagę na spostrzeżenia, jakie uzyskano realizując badania eksperymentalne. Należy tu wymienić następujące:

1. Zauważa się wpływ niestabilności dynamicznych generowanych periodycznie na wydajność kompaktowych skraplaczy w takim samym zakresie dla różnych zastosowanych czynników chłodniczych. Dłuższy czas ograniczenia dopływu czynnika chłodniczego do badanych minikanalów rurowych powoduje wzrost *jednofazowej strefy dochłodzenia skroplin* przy jednoczesnym zmniejszeniu *strefy skraplania właściwego*. Kierunek „przemieszczania się” strefy jednofazowej jest przeciwny do napływającego do mini kanału czynniki

i zgodny z przemieszczaniem się frontu skraplania  $v_T$ . Zjawisko to powoduje obniżenie wydajności skraplacza.

Uzyskane wyniki badań skraplania w przepływie w warunkach niestabilności dynamicznych zewnętrznych generowanych okresowo mają duże znaczenie w ocenie stabilności pracy maszyn i urządzeń energetycznych. Ich wykorzystanie może przyczynić się do podwyższenia poziomu ich sprawności. Pozwolą dokładniej zrozumieć zjawiska w procesie skraplania, realizowanego w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych w odniesieniu do nowych proekologicznych czynników chłodniczych. Należy podkreślić, że przeprowadzone badania pozwoliły na identyfikację następujących parametrów procesu:

1. Eksperymentalnej identyfikacji zmiany stopnia suchości i stopnia zapełnienia na długości minikanalu rurowego skraplającego się czynnika chłodniczego w czasie generowania niestabilności dynamicznych zewnętrznych.
2. Opracowanie modelu teoretycznego opisującego proces przemieszczania się zewnętrznych niestabilności generowanych okresowo w skraplającym się czynnikiem chłodniczym.
3. Identyfikacja parametrów ośrodka dwufazowego z skraplającym się czynnikiem chłodniczym w celu opracowania kryterium stabilności układu i wykluczenia możliwości występowania przypadkowych niestabilności.

Należy również stwierdzić, że w konsekwencji osiągnięto założony cel pracy, tzn. rozwiązano problem oraz potwierdzono postawioną w rozdziale 4 hipotezę.

Efekty niniejszej rozprawy rozszerzają niewątpliwie stan wiedzy w zakresie skraplania w warunkach niestabilności dynamicznych. Jest to o tyle istotny problem, że liczba opracowań dotyczących skraplania nieustalonego w minikanalach jest relatywnie niewielka, a w literaturze polskiej wręcz znikoma.

Autor wyraża przekonanie, że wyniki prezentowane w rozprawie będą inspiracją do prowadzenia badań teoretyczno-eksperymentalnych efektywności miniskraplaczy kompaktowych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.

## Literatura

1. Abdelghani-Idrissi M.A., Estel L., Bagui F., *Experimental study of convective heat transfer instabilities in transient response along a countercurrent heat exchanger*, *Experimental Heat Transfer*, 13 (2000) pp. 197 - 209.
2. Akasaka R.: *New fundamental equation of state with a common functional for 2,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234yf) and trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E))*. *International Journal of Thermophysics* 2011, vol. 32, pp. 1125 - 1147.
3. Akers W., Deans O.K., Crosser O.K.: *Condensation heat transfer within horizontal tubes*. *Chemical Engineering Progress Symp.* 1959, vol. 55, pp. 171 - 176.
4. Ambrosini W., Forgone N., Ferreri J.C., Bucci M.: *The effect of wall friction in single-phase natural circulation stability at the transition between laminar and turbulent flow*. *Annals of Nuclear Energy* 31 (2004), pp. 1833 - 1865.
5. Ardron K.H. Duffey R.B.: *Acoustic wave propagation in a flowing liquid-vapor mixture*. *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 4, 1977, pp. 303 - 322.
6. Atkinson C.M., Kytömaa H.K.: *Acoustic wave speed and attenuation in suspensions*. *International Journal of Multiphase Flow* 18 (4), 1992, pp. 577 - 592.
7. Baj P., Butrymowicz D.: *Ocena efektywności energetycznej obiegu kaskadowego w układzie dwutlenek węgla/amoniak*. *Chłodnictwo i Klimatyzacja* 2008, nr 11, s.30 - 35.
8. Bandhauer T.M., Agarwal A., Garimella A.: *Measurement and modeling of condensation heat transfer coefficients in circular microchannels*. *Journal of Heat Transfer*, (128) 2006, pp. 1050 - 1059.
9. Baroczy, C.J., 1966. *A systematic correlation for two phase pressure drop*. 62 ed., pp. 232 - 249.
10. Barthau G.: *Active nucleation site density and pool boiling heat transfer – an experimental study*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vo. 35, 1992, pp. 271 - 278.
11. Bergles, A. E., and Kandlikar, S. G.: *On the Nature of Critical Heat Flux in Microchannels*. *Journal of Heat Transfer*, 127(10), 2005, pp. 101 - 107.

12. Bergles, A.E., Collier, J.G., Delhaye, J.M., Hewitt, G.F., Mayinger F.: *Two-phase flow and heat transfer in the power and process industries*. Hemisphere Publishing Corporation Washington 1981.
13. Bilicki Z., Downar-Zapolski P.: *Zjawiska falowe w dwufazowych i jednorodnych modelach przepływu dwufazowego*. Prace INP PAN Gdańsk, no. 94, 1992, str. 19 - 42.
14. Bilicki Z.: *Rozchodzenie się zaburzeń w przepływie dwufazowym z uwzględnieniem nierównowagowości*. Zeszyty Naukowe IMP PAN, 247/1187/88, 1988.
15. Bilicki Z.: *Własności dyspersyjnego modelu nierównowagowego w przepływie para-ciecz*. IMP PAN Gdańsk Press 342 (1217), 1991, str. 3 - 21.
16. Biot M.A.: *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid in lower-frequency range*. The Journal of the Acoustic Society of America 28 (2), 1956, pp. 168 - 178.
17. Bogojewič B., Sefiane K., Walton A.J., Lin H., Cummins G.: *Two-phase flow instabilities in a silicon microchannels heat sink*. International Journal of Heat and Fluid Flow 30, 2009, pp. 854 - 867.
18. Bohdal T., Bilicki Z.: *On the wave character of development of bubble boiling in channel flow*. MFTP-2000 International Symposium on Multiphase flow and Transport Phenomena, Editor David Moalem Maron, Begell House, Inc., New York, Wallingford (UK), Antalya, Turkey, November, 2000, pp. 520 - 527.
19. Bohdal T., Charun H., Czapp M., Dutkowski K.: *Wrzenie perspektywicznych czynników w parownikach chłodniczych*. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 1998.
20. Bohdal T., Kuczyński W.: *Investigation of boiling of refrigeration medium under periodic disturbance conditions*. An International Journal of Experimental Heat Transfer, 2005, Volume 18, No 3, pp. 135 - 151.
21. Bohdal T.: *Przyczyny niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych*. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2006.
22. Bohdal T.: *Zjawiska wrzenia pęcherzykowego czynników chłodniczych*, Monografia Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.
23. Brown J.S.: *New low Global Warming Potential Refrigerants*. ASHRAE Journal 2009, vol. 8, s. 22 - 29.

24. Butrymowicz D., Miąskowski D.: *Zagadnienia wartości prędkości dźwięku w przepływach dwufazowych czynników chłodniczych*. Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna 6-7/2006, str. 230 - 234.
25. Butrymowicz D., Miąskowski D.: *Zagadnienia wartości prędkości dźwięku w przepływach dwufazowych czynników chłodniczych*. Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna 6-7/2006, str. 230 - 234.
26. Cao L., Kakaç S., Liu H.T., Sarma P.K.: *The effects of thermal non-equilibrium and inlet temperature on two-phase flow pressure drop type instabilities in an up flow boiling system*. International Journal of Thermal Sciences 39, 2000, pp. 886 - 895.
27. Carey V.P.: *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena*. Hemisphere, Washington, 1992.
28. Charun H.: *Podstawy gospodarki energetycznej w zarysie*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Tom 1 – 2014 r., Tom 2 – 2015 r.
29. Chen H.Z., Groll M., Rösler S.: *Micro heat pipes: experimental investigation and theoretical modeling*, in: Proceedings of the 8th International Heat Pipe Conference, Beijing, 1992, pp. 396 - 400.
30. Choi K-IL., Pamitran A.S., Oh J-T., Saito K.: *Pressure drop and heat transfer during two-phase flow in vaporizator of propane in horizontal smooth minichannels*. International Journal of Refrigeration, 32, 2009, pp. 837 - 834.
31. Chun J. H., Shimko M. A., Sonin A. A.: *Vapor condensation onto a turbulent liquid – II. Condensation burst instability at high turbulence intensities*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 29, 1986, pp. 1333 - 1338.
32. Chung M.-S., Park S.-B., Lee H.-K.: *Sound speed criterion for two-phase critical flow*. Journal of Sound and Vibration 276, 2004, pp. 13 - 26.
33. Chung N.M., Lin W.K., Pei B.S., Hsu Y.Y.: *Sound attenuation and its relationship with interfacial area density in an air-water two-phase bubbly flow*. Flow Measurement and Instrumentation 3 (1), 1992, pp. 45 - 53.
34. Cieśliński J.T.: *Modelowanie wrzenia pęcherzykowego*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.
35. Colorado D., Hernandez J. A., Rivera W.: *Comparative study of a cascade cycle for simultaneous refrigeration and heating operating with ammonia, R134a, butane, propane and CO<sub>2</sub> as working fluids*. International Journal of Sustainable Energy Volume 31, 2012 - Issue 6, Pages 365 - 381.

36. Darcy D.F.: *On acoustic propagation and critical mass flux in two-phase flow*. Journal Heat Transfer, 1971, pp. 413 - 421.
37. Das R.K., Pattanayak S.: *Determination and analysis from annular to intermittent flow in vertical tubes*, Canadian Journal of Chemical Engineering 74, 1996, pp. 49 - 57.
38. Das R.K., Pattanayak S.: *Electrical impedance method for flow region identification in vertical upward gas-liquid two-phase flow*, Measurement Science and Technology 4, 1993, pp. 1457 - 1463.
39. Directive 2006/40/EC of the European Parliament and the Council of 17 May 2006 relating to emission from air-conditioning system In motor vehicles and amending council directive 70/156/EC, 2006. Official Journal of the European Union.
40. Feldman C. L., Nydick S. E., Kokernak R.P.: *The speed of sound in single component two-phase fluids: theoretical and experimental*. International Symposium Two-Phase Systems, Haifa Israel 1997, Session 6 Paper 7.
41. Gauglitz P.A., Radke C.J.: *An extended evolution equation for liquid film breakup in cylindrical capillaries*. Chemical Engineering Science 43, 1988, pp. 1457 - 1465.
42. Ghiaasiaan S. M.: *Two-phase flow, boiling, and condensation in conventional and miniature systems*. Cambridge University Press 2008.
43. Gubaidullin A.A.: *Shock wave phenomena in bubbly liquids*, Proceedings of the Second International Conference on Multiphase Flow, Kyoto 1995.
44. Hajal, J. El, Thome, J.R., Cavallini, A.: *Condensation in horizontal tubes. Part 1: two-phase flow pattern map*. International Journal Heat Mass Transfer 46, 2003, pp. 3349 - 3363.
45. Hanamura K., Kaviany M.: *Propagation of condensation front in steam injection into dry porous media*. International Journal Heat Mass Transfer, vol. 38, no. 8, 1995, pp. 1377 - 1386.
46. Heinzl V., Holzinger J., Simon M., *Fluid oscillation in flat plat boiling water collectors*, Solar Energy 59 (1997) 43 - 48.
47. Hewitt G.F., Hall-Taylor N.S.: *Annular Two-Phase Flow*. Pergamon Press, New York, 1970.
48. Higashi Y.: *Thermophysical properties of HFO-1234yf and HFO-1234ze(E)*. Proc. International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Re-



- frigeration Technology, 17-19 February 2010, Tokyo, Japan.
49. Hsu, Y. Y.: *On the Size Range of Active Nucleation Cavities on a Heating Surface*. J. Heat Transfer, 84, 1962, pp. 207 - 216.
  50. Ishii M., Kataoka I.: *Interfacial transfer in annular dispersed flow*. Argonne National Laboratory, Report CONP-820811-2, 1980.
  51. Ishii M.: *Study on flow instabilities in two-phase mixture*. Argonne National Laboratory Report ANL-76-23, 1976.
  52. Ishii M.: *Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow*. Eyrolles, Paris 1975.
  53. Kacprowski J.: *Outline of Electroacoustics*. Communications Publishing Houses. Issue II, Warsaw 1960.
  54. Kakač S., Bon B.: *A review of two-phase flow dynamic instabilities in tube boiling systems*. International Journal of Heat and Mass Transfer 51, no. 3 - 4, 2008, pp. 399 - 433.
  55. Kandlikar S.G. *Fundamental issue related to flow boiling in minichannels and micro-channels*. Experimental Thermal and Fluid Mechanics and Thermodynamics 26, 2002, pp. 129 - 146.
  56. Kandlikar S.G., Garimella S., Li D., Colin S., King M.R.: *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*. Elsevier 2006.
  57. Kandlikar S.G., *Microchannels and minichannels - history, terminology, classification and current research needs*. First International Conference on Microchannels and Minichannels, New York, 2003.
  58. Kandlikar, S. G., Kuan, W. K., Willistein, D. A., and Borrelli, J.: *Stabilization of Flow Boiling in Microchannels Using Pressure Drop Elements and Fabricated Nucleation Sites*, Journal Heat Transfer, 128(4), 2006, pp. 389 - 396.
  59. Kang Y.T., Hong H., Lee Y.S.: *Experimental correlation of falling film condensation on enhanced tubes with HFC134a; low-fin and Turbo-C tubes*. International Journal of Refrigeration 30, 2007, pp. 805 - 811.
  60. Karber K.M., Abdelaziz O., Vineyard E.A.: *Experimental performance of R1234yf and R1234ze as a drop in replacement for R134a in domestic refrigerators*. Int. Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, 2010, s. 1 - 10.
  61. Karplus H.P.: *The velocity of sound in a liquid containing gas bubbles*. COO-248, Armour Research Foundation, 1958.

62. Karstarchoff P.: *Częstotliwość i czas*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1985.
63. Kaslusky S.F., Udell K.,S.: *A theoretical model of air and steam co-injection to prevent the downward migration of DNAPLs during steam-enhanced extraction*. Journal of Contaminant Hydrology 55, 2002, pp. 213 - 232.
64. Kaslusky S.F., Udell K.,S.: *Co-injection of air and steam for the prevention of the downward migration of DNAPLs during steam enhanced extraction: An experimental evaluation of optimum injection ratio predictions*. Journal of Contaminant Hydrology 77, 2005, pp. 325 - 347.
65. Keller J.B.: *Periodic oscillations in a model of thermal convection*. Journal Fluid Mechanics 1966, 26, pp. 599 - 606.
66. Kennedy J.E., Roach G.M., Dowling M.F., Abdel-Khalik S.I., Ghiaasiann S.M., Jeter S.M., Quershi Z.H.: *The onset of flow instability in uniformly heated horizontal microchannels*, ASME J. Heat Transfer 122 (2000) pp. 118 -125.
67. Kim D.H., Park H.S., Kim M.S.: *Charakteristics of R134a/R410A cascade heat pump and opti mization*. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 2012, pp.1 - 8.
68. Kim D.H., Park H.S., Kim M.S.: *Optimal temperature between high and low stage cycles for R134a/R410A cascade heat pump water heater system*. Experimental Thermal and Fluid Sci 2013, vol. 47, pp. 172 - 179.
69. Kirchhoff G.: *Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem gase auf die Schallbewegung*. Annual Physical Chemistry (134), 1868, pp. 177 - 193.
70. Kokernak R. P., Feldman C. L.: *Velocity of sound in two-phase flow of R12*. ASHRAEJ (14), 1972, pp. 35 - 38.
71. Koşar, A., Kuo, C. J., Peles, Y.: *Suppression of Boiling Flow Oscillations in Parallel Microchannels With Inlet Restrictors*. Journal Heat Transfer, 128(3), 2006, pp. 251 - 260.
72. Koyama S., Takata N., Fukuda S.: *An experimental study on heat pump cycle Ranking zeotropic binary refrigerant of HFO-1234 ze(E) and HFC-32*. Proc. 10<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference 2011, vol. 29, no. 3, pp. 40 - 49.
73. Kuczyński W., Bohdal T., Meyer J.P., Denis A.: *A regressive model for dynamic instabilities during the condensation of R404A and R507 refrigerants*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 141, October

- 2019, Pages 1025 - 1035.
74. 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*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, Issue 4, (2012), pp. 1083 - 1094.
  75. Kuczyński W., Charun H., Bohdal T.: *Modeling of temperature instabilities during condensation of R134a refrigerant in pipe minichannels*. International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 111, August 2017, Pages 83 - 93.
  76. Kuczyński W., Denis A.: *A regressive model for dynamic instabilities during condensation of pro-ecological environmentally friendly refrigerant R1234yf*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 131, March 2019, Pages 822 - 835.
  77. Kuczyński W., Denis A.: *Analiza porównawcza wpływu na środowisko aut elektrycznych zasilanych z elektrowni węglowych oraz aut spalinowych*. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2017 R18, nr. 7-8, str. 61 - 64.
  78. Kuczyński W.: *Characterization of pressure-wave propagation during the condensation of R404A and R134a refrigerants in pipe mini-channels that undergo periodic hydrodynamic disturbances*. International Journal of Heat and Fluid Flow vol. 40 (2013) pp. 135 - 150.
  79. Kuczyński W.: *Experimental research on condensation of R134a and R404A refrigerants in mini-channels during impulsive instabilities. Part I*. International Journal of Heat and Mass Transfer 128 (2019) 728 - 738.
  80. Kuczyński W.: *Experimental research on condensation of R134a and R404A refrigerants in mini-channels during impulsive instabilities. Part II*. International Journal of Heat and Mass Transfer 128 (2019) 773 - 782.
  81. Kuczyński W.: *Modeling of the propagation of a pressure wave during the condensation process of R134a refrigerant in a pipe minichannel under the periodic conditions of hydrodynamic disturbances*. International Journal of Heat and Mass Transfer vol. 56 (2013) pp. 715 - 723.
  82. Kuczyński W.: *Niestabilności hydrodynamiczne podczas skraplania czynników chłodniczych w minikanalach*. Wyd. Politechniki Koszalińskiej 2013, Monografia nr 243. ISSN 0239 -7129.

83. Kuczyński W.: *Phenomena that accompany the condensation of R404A refrigerant in multiports during hydrodynamic instabilities*. International Journal of Heat and Mass Transfer vol. 55 (2012) pp. 7718 - 7727.
84. Kuczyński W.: *Pressure wave propagation during the condensation process of the R404A refrigerant in pipe mini-channels under periodic hydrodynamic disturbances*. International Journal of Heat and Mass Transfer vol. 67 (2012) pp. 404 - 415.
85. Kuczyński W.: *Selected issues of instabilities during condensation of substitutes of F-gases inside minichannels*. Publishing House of Koszalin University of Technology 2019, Monography no 362. ISSN 0239-7129, ISBN 978-83-7365-515-7.
86. Kukielka L.: *Podstawy Badań Inżynierskich*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2000.
87. Ledinegg M.: *Instability of flow during natural and forced circulation*. Die Warme 61 (1938), pp. 891 - 898. AEC-tr-1861, (1954).
88. Madejski J.: *Przepływ dwufazowy w kanałach poziomych*. Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk 1993, 393/1354/93.
89. Madejski J.: Staniszewski B.: *Wymiana ciepła przy wrzeniu i przepływy dwufazowe*. Cz. I, Ośrodek Informacji o Energii Jądrowej, Warszawa 1971.
90. Madejski J.: *Teoria wymiany ciepła*. Wyd. Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2010.
91. Madejski J.: *Wymiana ciepła przy wrzeniu i przepływy dwufazowe*. Cz. II, Ośrodek Informacji o Energii Jądrowej, Warszawa 1971.
92. Martin C.S., Padmanabhan M.: *Pressure pulse propagation in two-component slug flow*, Journal of Fluids Engineering 101, 1979, pp. 44 - 52.
93. Matysko R., Stońska H.: *Modelowanie systemów ciepłno-przepływowych. Część I. Parametry ustalone w czasie*. Wydawnictwo IMP PAN, 2018, ISBN 978-83-88237-84-3.
94. Matysko R.: *Czynniki robocze do wysokotemperaturowych pomp ciepła*. Chłodnictwo & Klimatyzacja 2011, nr 7, s. 48 - 49.
95. Mehendale S.S., Jacobi A.M., Shah R.K.: *Fluid flow and heat transfer at micro and mesoscales with application to heat exchanger design*. Applied Mechanics Reviews, vol. 53, No. 7, 2000, pp. 175 - 193.
96. Middleman S.: *Modeling Axisymmetric Flows: Dynamics of Films, Jets, and*

- Drops*, Academic Press, New York, 1995.
97. Mikielwicz D., Mikielwicz J.: *A common method for calculation of flow boiling and flow condensation heat transfer coefficients in minichannels with account of nonadiabatic effects*. Heat Transfer Engineering vol. 32(13 - 14), 2011, pp. 1173 - 1181.
  98. Mikielwicz D.: *Wrzenie i kondensacja w przepływie w kanałach i mikrokanalach*. Wyd. Uczelniane Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2009.
  99. Mikielwicz J.: *Dynamika wymienników ciepła i niestabilności w obiegu ORC*. Rocznik Ochrona Środowiska, Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, Tom 13, 2011, str. 393 - 408.
  100. Mochizuki H.: *Flow instabilities in boiling channels of pressure tube type reactor*. Nuclear Engineering and Design, Volume 149, Issues 1 - 3, 1 September 1994, Pages 269 - 277.
  101. Moody F.J.: *A pressure of pulse model for two-phase critical flow and sonic velocity*. Journal of Heat Transfer, 1969, pp. 371 - 384.
  102. Nakoryakov, V.E., Kuznetsov, V.V., Dontsov, V.E.: *Pressure waves in saturated porous medium*. International Journal of Multiphase Flow, no. 15, 1989, pp. 857 - 875.
  103. Nishimura T., Kunitsugu K., Morega A.M.: *Fluid mixing and mass transfer enhancement in grooved channels for pulsatile flow*. J. Enhanced Heat Transfer, no. 5, 1998, pp. 23 - 37.
  104. Nishimura T., Oka N., Yoshinaka Y., Kunitsugu K.: *Influence of imposed oscillatory frequency on mass transfer enhancement of grooved channels for pulsatile flow*. International Journal of Heat and Mass Transfer 43, 2000, pp. 2365 - 2374.
  105. Nouman J.: *Comparative studies and analysis of working fluids for Organic Rankine Cycles – ORC*. KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm 2012.
  106. Nualboonrueng, T., Wongwises, S.: *Two-phase flow pressure drop of HFC-134a during condensation in smooth and micro-fin tubes at high mass flux*, Int. Commun. Heat Mass Transfer 31, (2004), pp. 991 - 1004.
  107. Nulboonrueng T., Kaewon J., Wongwises S.: *Two-phase condensation heat transfer coefficients of HFC-134a at high mass flux in smooth and micro-fin tubes*. Int. Comm. Heat Mass Transfer 30 no. 4, 2003, pp. 577 - 590.

108. Palm B.: *Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration system – A review*. Int. Journal of Refrigeration 2008, vol. 31, pp. 552 - 563.
109. Palm B.: *Refrigerants of the future*. Proceedings 10<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference 2011, 16-19 May, 2011, Tokyo, Japan.
110. Park J.W., Drew D.A., Lahey R.T.: *The analysis of void wave propagation in adiabatic mono-dispersed bubbly two-phase flows using an ensemble averaged two-fluid model*. International Journal of Multiphase Flow 24 (7), 1998, pp. 1205 - 1244.
111. Perry I., Jannota Y., D. Mailleta, B. Fiersab, *Effect of velocity distribution on external wall temperature field for a flat microchannel*. Experimental Heat Transfer 23 (2010) pp. 27 - 43.
112. Poniewski M.E., Sado J., Staniszewski B.: *Termodynamika procesów nierównowagowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2008.
113. Poniewski M.E., Thome J.R.: *Nucleate boiling on micro-structured surfaces*. Lausanne – Warsaw, Heat Transfer Research Inc., College Station, 2008.
114. Postanowienia Konferencji Narodów Zjednoczonych „Środowisko i Rozwój” – Szczyt Ziemi, Rio de Janeiro (Brazylia), 3 - 14 czerwca 1992.
115. Protokół Montrealski w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową z dnia 16 września 1987 r. Ratyfikowany przez Rzeczpospolitą Polską 25.06.1990 r. Dz. U.92.98. poz. 490.
116. Raport firmy Bitzer. *Czynniki chłodnicze*. Wydanie 19, 2016.
117. Revellin, R. and Thome, J.R. (2007b). *New type of diabatic flow pattern map for boiling heat transfer in microchannels*. Journal Micromechanics Microengineering 17, pp. 788 - 796.
118. Revellin, R. and Thome, J.R. (2007a). *Experimental investigation of R-134a and R-245fa two-phase flow in microchannels for different flow conditions*. Int. J. Heat Fluid Flow 28, pp. 63 - 71.
119. Rhi S-H.: *Instability of a Two-Phase Loop Termosyphon*. The Korean Society of Mechanical Engineers International Journal, vol. 16, no. 7, 2002, pp. 1019 - 1028.
120. Rienstra S.W., Hirschberg A.: *An Introduction to Acoustics*. Eindhoven University of Technology, 2011.
121. Rivkin S.L., Aleksandrov A.A., Kremenevskaya E.: *Thermodynamic Derivations for Water and Steam*. McGraw-Hill, New York, 1987.

122. Roache, P., J.: *Wicjisitielnaja gidrodinamika*. Moscow 1980, pp. 58 - 62.
123. Roeske-Słomka I.: *Podstawy Statystyki*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 1999.
124. Rozporządzenie nr 517/2014 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 kwietnia 2014 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych i uchylenia rozporządzenia nr 842/2006. Dz. U. Unii Europ. L 150/195, 20.05.2014.
125. Rozporządzenie nr 842/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie niektórych fluorowanych gazów cieplarnianych. Dz. U. L161 z 14.06.2006.
126. Rubik A.: *Pompy ciepła. Poradnik*. Wyd. Ośrodek Informacyjny „Technika Instalacyjna w Budownictwie”, Warszawa 1999
127. Schnotale J.: *Początek końca R134a*. Chłodnictwo i Klimatyzacja 2004, nr 1-2, s. 22 - 25.
128. Shin J.S., Kim M.H., An experimental study of condensation heat transfer inside a mini-channel with a new measurement technique. *International Journal of Multiphase Flow* 30 (2004), pp. 311 - 325.
129. Skrzypulec W.: *F – gazy, tak zwyczajnie po polsku*. Chłodnictwo & Klimatyzacja 2010, nr 12, s. 16 - 17.
130. Som S.M., Kimball J.T., Hermanson J.C., Allen J.S., *Stability and heat transfer characteristics of unsteady condensing and evaporating films*. *International Journal of Heat and Mass Transfer* no. 50, pp. 1927 - 1937, 2007.
131. Sonin A. A., Shimko M. A., Chun J. H.: *Vapor condensation onto a turbulent liquid – The steady condensation rate as a function of liquid – side turbulence*. *International Journal Heat Mass Transfer*, vol. 29, 1986, pp. 1319 - 1332.
132. Starov V., Kosvintsev S.R., Sobolev V.D., Velarde M.G., Joo S.W., Davis S.H., Bankoff S.G.: *Long wave instabilities of heated falling films; two-dimensional theory of uniform layers*. *International Journal of Fluid Mechanics*, vol. 230, 1991, pp. 117 - 146.
133. Stinson M. R.: *The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes and generalization to uniform tubes of arbitrary cross-sectional shape*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 89 (2), 1991.
134. Teng R. Cheng P., Zhao T.S.: *Instability of condensate film and capillary*

- blocking in small-diameter-thermosyphon condensers*. International Journal of Heat and Mass Transfer, no. 42, 1992, pp. 3071 - 3083.
135. Thomas R. M.: *Condensation of steam on water in turbulent motion*. International Journal of Multiphase Flow, vol. 5, 1979, pp. 1 - 15.
136. Vasilýev L.L., Konev S.V., Razek R.: *Investigation of capillary blocking of heat-pipe condensers*. Heat Transfer-Soviet Research 20, 1988, pp. 692 - 701.
137. Vijayan P.K.: *Introduction to instability in natural circulation systems*. Joint ICTP-IAEA Course on Natural Circulation Phenomena and Passive Safety Systems in Advanced Water Cooled Reactors.
138. Wang, G., Cheng, P., Bergles, A.E.: *Effects of inlet/outlet configurations on flow boiling instability in parallel microchannels*. International Journal of Heat and Mass Transfer, no. 51, 2008, pp. 2267 - 2281.
139. Weisman J., Ake T., Knott R.: *Two-phase pressure drop across abrupt areas changes in oscillatory flow*. Nuclear Science and Engineering 61, 1976, pp. 297 - 309.
140. Welander P.: *Note on the self-sustained oscillations of simple thermal system*. Tellus 1957, 9, pp. 419 - 420.
141. Wellens T., Shatokhin V., Buchleitner A.: *Stochastic resonance*, Rep. Prog. Phys. 67 (2004) pp. 45 - 105.
142. Wu H.Y. and Cheng P., *Boiling instability in parallel silicon microchannels at different heat flux*. International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 3631 - 3641.
143. Xiao J., Hrnjak P.: *A new flow regime map and void fraction model based on the flow characterization of condensation*. International Journal of Heat and Mass Transfer 108 (2017) pp. 443 - 452.
144. Xu J.L., Zhou J., Y.H. Gan, Y. Chen Y.: *Unsteady flow phenomenon in a heated microchannel at high heat fluxes*, Experimental Heat Transfer. 17 (2004) pp. 299 - 319.
145. Yan Y-Y., Lin T-F.: *Condensation transfer and pressure drop of refrigeration R134a in a small pipe*. International Journal of Heat and Mass Transfer. No 42 (1999), pp. 697 - 708.
146. Yuncu H., Yildirim O.T., Kakac S.: *Two-phase flow instabilities in a horizontal single boiling channel*. Appl. Sci. Res. 48 (1991) pp. 83 - 104.



147. Zhang T., Tong T., Chang J-Y., Peles Y., Prasher R., Jensen M.K., Wenf J.T., Phelan P.: *Ledinegg instability in microchannels*. International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 2009, pp. 5661 - 5674.
148. Zivi, S.M.: *Estimation of steady-state steam void-fraction by means of the principle of minimum entropy production*. ASME Journal Heat Transfer C86, 1975, pp. 247 - 252.



## **ZAŁĄCZNIK nr 1**

### **WYKAZ WŁAŚCIWOŚCI CZYNNIKÓW CHŁODNICZYCH**



Załącznik 1 zawiera wykaz rozpatrywanych w analizie literatury czynników chłodniczych opracowanych w oparciu o Raport firmy Bitzer na lata 2011 - 2020 roku wydanie 19.



Tablica Z.1.1.

## Niektóre oznaczenia fluorowanych izomerów [23]

Oznaczenie bazowe	Możliwe rodzaje fluorowanych izomerów
R-1225	R-1225ye-E, R-1225ye-Z, R-1225yc, R-1225zc
R-1234	R-1234yc, R-1234ye-E, R-1234ye-Z, R-1234yf, R-1234zc, R-1234ze-E, R-1234ze-Z
R-1243	R-1243ye-E, R-1243ye-Z, R-1243yc, R-1243yf, R-1243zc, R-1243ze-E, R-1243ze-Z, R-1243zf

Tablica Z.1.2.

Niektóre charakterystyczne właściwości termodynamiczne  
fluorowanych izomerów propenu [23]

Czynnik	wzór chemiczny	$t_{kr}$ , [°C]	$p_{kr}$ , [kPa]	$\rho_{kr}$ , [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ , [kJ/kgK]
R1225ye-E	CF <sub>3</sub> CF=CHF	113,6	3401	517	0,789
R1225ye-Z	CF <sub>3</sub> CF=CHF	106,1	3335	517	0,778
R1225ze	CF <sub>3</sub> CF=CF <sub>2</sub>	103,4	3312	517	0,774
R1234ye-E	CHF <sub>2</sub> CF=CHF	106,7	3534	473	0,828
R1234yf	CF <sub>3</sub> CF=CH <sub>2</sub>	96,1	3435	473	0,845
R1234ze-E	CF <sub>3</sub> CF=CHF	111,2	3576	473	0,836
R1234ze-Z	CF <sub>3</sub> CF=CHF	153,6	3970	473	0,906
R1243zf	CF <sub>3</sub> CF=CH <sub>2</sub>	105,5	3740	423	0,934

Tablica Z.1.3.

## Porównanie właściwości czynników HFO-1234yf i HFO-1234ze(E)

opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

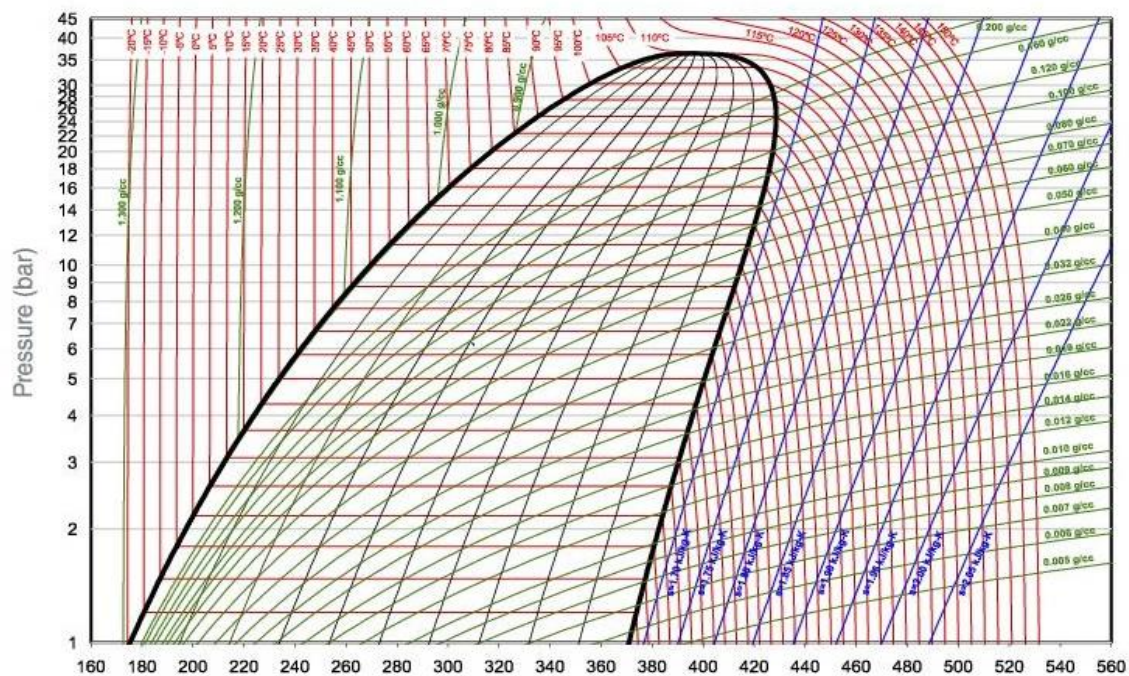
Czynnik	Wzór chemiczny	ODP	GWP <sub>100</sub>	Grupa bezpieczeń stwa	Praktyczna granica stężenia <sup>1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	$t_{kr}$ [°C]	$t_k^{**}$ [°C]	$\Delta t_g^{***}$ [K]
HFO-1234yf	CF <sub>3</sub> CF=CH <sub>2</sub>	0	4	A2(L)	0,058	95	82	0
HFO-1234ze(E)	CF <sub>3</sub> CH=CHF	0	6	A2(L)	-	110	92	0

<sup>1)</sup> wg normy EN378-1; <sup>\*\*</sup>) temperatura skraplania przy 26 bar; <sup>\*\*\*</sup>) poślizg temperaturowy

Tablica Z.1.4.

Charakterystyczne właściwości czynnika R1234ze(E),  
opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

Wielkość	Jednostka	Wartość	Uwagi
Masa cząsteczkowa	kg/kmol	114	
Temperatura wrzenia	°C	-29,4	p=101,4 kPa
Temperatura punktu potrójnego	°C		
Temperatura krytyczna	°C	109,37	
Ciśnienie krytyczne	bar	35,35	
Gęstość krytyczna	kg/m <sup>3</sup>	489,24	
Gęstość cieczy	kg/m <sup>3</sup>	1163	p=101,4 kPa; t=25 °C
Gęstość pary	kg/m <sup>3</sup>	5,78	p=101,4 kPa; t=25 °C
Lepkość dynamiczna cieczy	mPa·s	0,199	p=101,4 kPa; t=25 °C
Lepkość dynamiczna pary	mPa·s	0,012	p=101,4 kPa; t=25 °C
Ciepło właściwe cieczy	kJ/kg·K	1,383	p=101,4 kPa; t=25 °C
Ciepło właściwe pary	kJ/kg·K	0,982	p=101,4 kPa; t=25 °C
Ciepło parowania	kJ/kg	195,27	p=101,4 kPa; t=25 °C
Współczynnik przewodności cieplnej cieczy	W/m·K	0,078	p=101,4 kPa; t=25 °C
Współczynnik przewodności cieplnej pary	W/m·K	0,014	p=101,4 kPa; t=25 °C



Rys. Z.1.1. Wykres  $l_{gp} - h$  dla czynnika R1234ze(E), opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

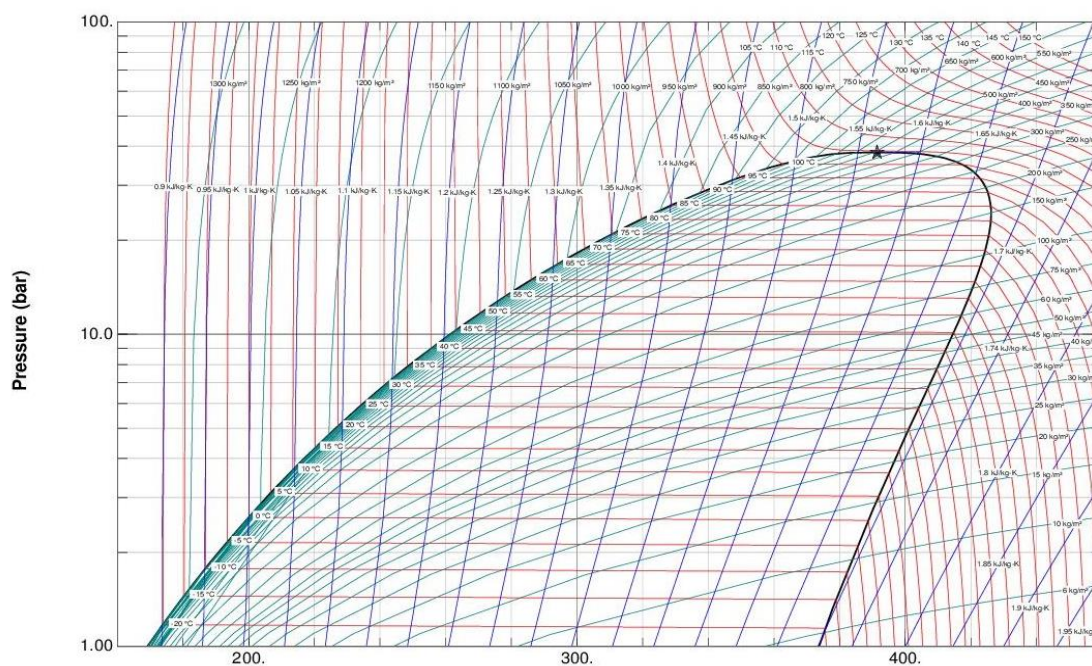




Tablica Z.1.6

Charakterystyczne właściwości czynnika R450A,  
opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

Wielkość	Jednostka	Wartość	Uwagi
Masa cząsteczkowa	kg/kmol	108,6	
Temperatura wrzenia	°C	-23,1	przy 1,013 bar
Gęstość cieczy	kg/m <sup>3</sup>	1257,7	przy 1,013 bar i 25 °C
Gęstość pary	kg/m <sup>3</sup>	5,443	przy 1,013 bar i 25 °C
Lepkość dynamiczna cieczy	mPa·s	0,194	przy 1,013 bar i 25 °C
Lepkość dynamiczna pary	mPa·s	0,012	przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło właściwe cieczy	kJ/kg·K	1,404	przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło właściwe pary	kJ/kg·K	1	przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło parowania	kJ/kg	203,64	przy 1,013 bar i 25 °C
Współczynnik przewodności cieplnej cieczy	W/m·K	0,076	przy 1,013 bar i 25 °C
Współczynnik przewodności cieplnej pary	W/m·K	0,014	przy 1,013 bar i 25 °C

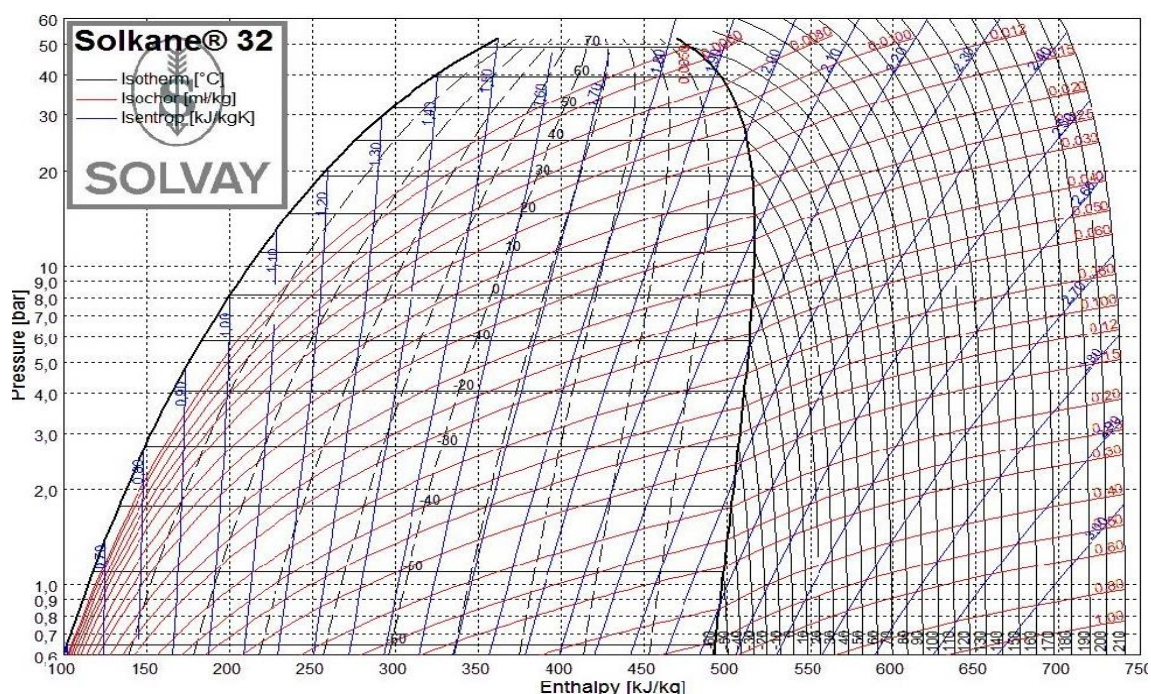


Rys. Z.1.3. Wykres  $l_{gp} - h$  dla czynnika R450A [116], opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

Tablica Z.1.7

Charakterystyczne właściwości czynnika R32,  
opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

Wielkość	Jednostka	Wartość	Uwagi
Masa cząsteczkowa	kg/kmol	52,02	
Temperatura wrzenia	°C	-51,7	przy 1,013 bar
Temperatura krytyczna	°C	78,2	
Ciśnienie krytyczne	bar	58	
Gęstość cieczy	kg/m <sup>3</sup>	1206,2	przy 1,013 bar i 25 °C
Gęstość pary	kg/m <sup>3</sup>	2,993	przy 1,013 bar i 25 °C
Lepkość dynamiczna cieczy	mPa·s	0,272	przy 1,013 bar i 25 °C
Lepkość dynamiczna pary	mPa·s	0,918	przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło właściwe cieczy	kJ/kg·K	1,649	przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło właściwe pary	kJ/kg·K	0,806	przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło parowania	kJ/kg		przy 1,013 bar i 25 °C
Współczynnik przewodności cieplnej cieczy	W/m·K	0,125	przy 1,013 bar i 25 °C
Współczynnik przewodności cieplnej pary	W/m·K	0,015	przy 1,013 bar i 25 °C

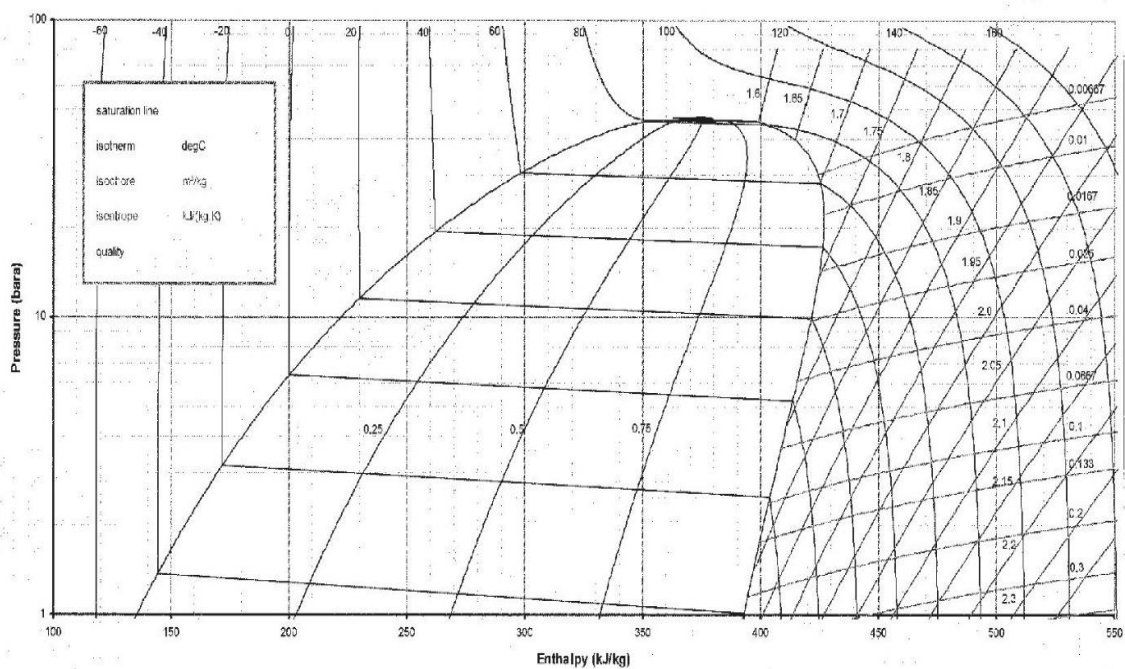


Rys. Z.1.4. Wykres  $lgp - h$  dla czynnika R32, opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

Tablica Z.1.8

Charakterystyczne właściwości czynnika R442A,  
opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

Wielkość	Jednostka	Wartość	Uwagi
Masa cząsteczkowa	kg/kmol	81,8	
Temperatura wrzenia	°C	-46,5	przy 1,013 bar
Temperatura krytyczna	°C	82,4	
Ciśnienie krytyczne	bar	47,6	
Gęstość cieczy	kg/m <sup>3</sup>	1108	przy 1,013 bar i 25 °C
Gęstość pary	kg/m <sup>3</sup>	47,7	przy 1,013 bar i 25 °C
Lepkość dynamiczna cieczy	mPa*s	0,143	przy 1,013 bar i 25 °C
Lepkość dynamiczna pary	mPa*s	0,013	przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło właściwe cieczy	kJ/kg*K		przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło właściwe pary	kJ/kg*K		przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło parowania	kJ/kg	266	przy 1,013 bar i 25 °C
Współczynnik przewodności cieplnej cieczy	W/m*K	0,062	przy 1,013 bar i 25 °C
Współczynnik przewodności cieplnej pary	W/m*K	0,015	przy 1,013 bar i 25 °C

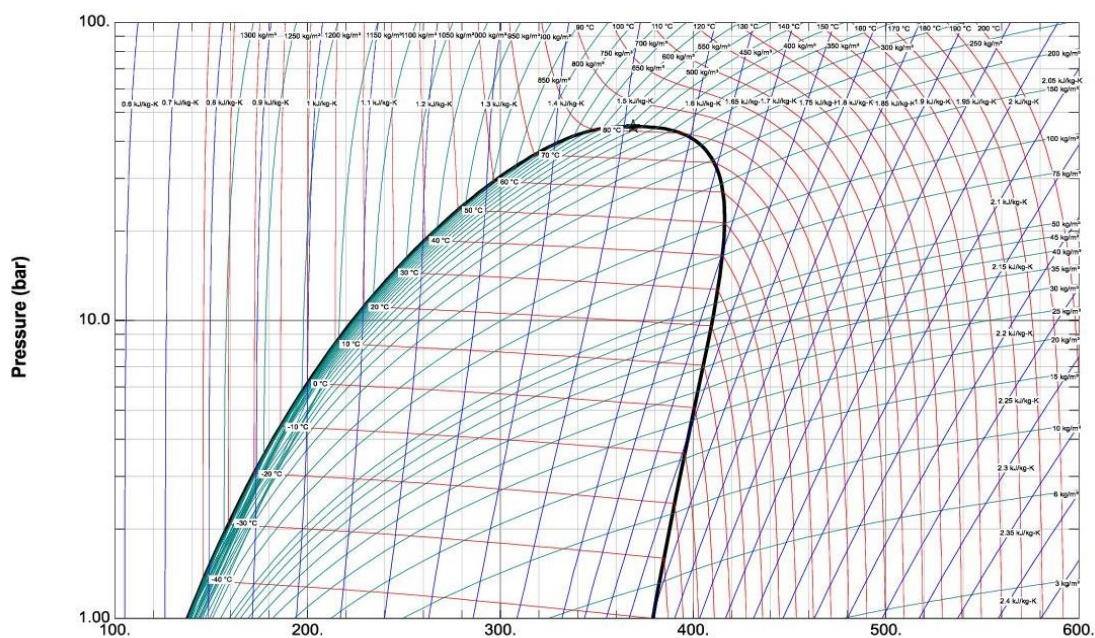


Rys. Z.1.5. Wykres  $l_{gp} - h$  dla czynnika R442A, opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

Tablica Z.1.9

Charakterystyczne właściwości czynnika R448A,  
opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

Wielkość	Jednostka	Wartość	Uwagi
Masa cząsteczkowa	kg/kmol	86,3	
Temperatura wrzenia	°C	-45,9	przy 1,013 bar
Gęstość cieczy	kg/m <sup>3</sup>	1192,5	przy 1,013 bar i 25 °C
Gęstość pary	kg/m <sup>3</sup>	4,701	przy 1,013 bar i 25 °C
Lepkość dynamiczna cieczy	mPa·s	0,138	przy 1,013 bar i 25 °C
Lepkość dynamiczna pary	mPa·s	0,013	przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło właściwe cieczy	kJ/kg·K	1,553	przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło właściwe pary	kJ/kg·K	1,165	przy 1,013 bar i 25 °C
Ciepło parowania	kJ/kg	241,1	przy 1,013 bar i 25 °C
Współczynnik przewodności cieplnej cieczy	W/m·K	0,081	przy 1,013 bar i 25 °C
Współczynnik przewodności cieplnej pary	W/m·K	0,015	przy 1,013 bar i 25 °C

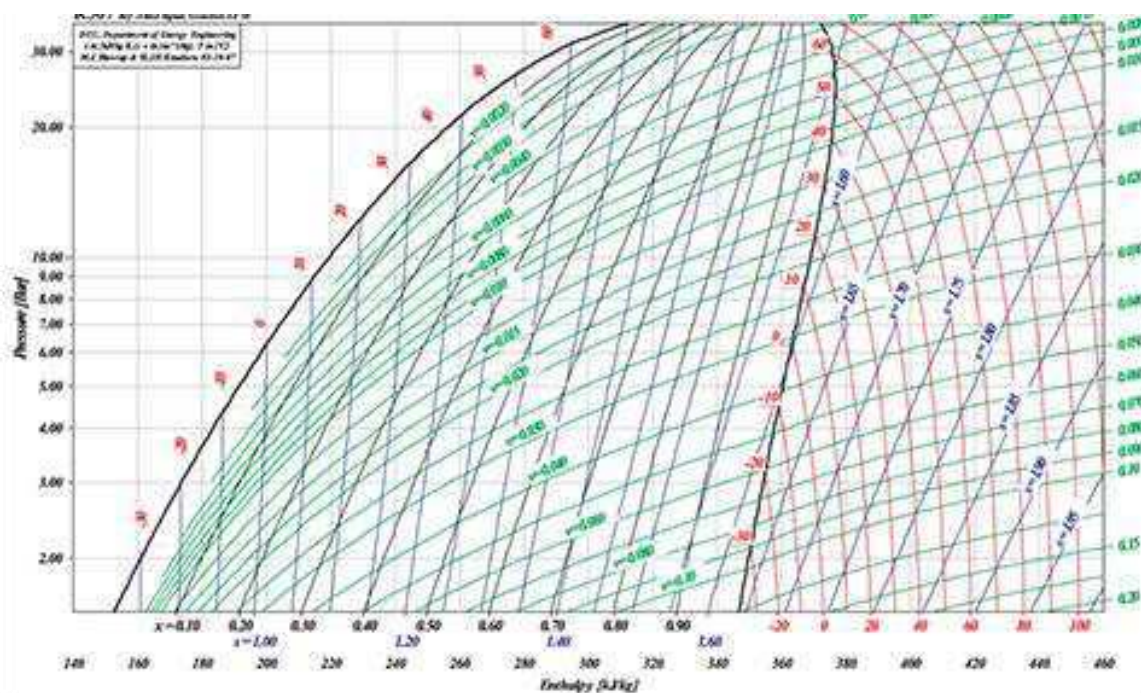


Rys. Z.1.6. Wykres  $l_{gp} - h$  dla czynnika R448A, opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

Tablica Z.1.10

Charakterystyczne właściwości czynnika R507,  
opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

Wielkość	Jednostka	Wartość	Uwagi
Masa molowa	kg/kmol	98,9	
Temperatura wrzenia	°C	-46,7	
Temperatura krytyczna	°C	70,9	
Temperatura zapłonu	Gaz niepalny		
Prężność par	bar	12,87	w tem. 25°C
Gęstość cieczy	kg/m <sup>3</sup>	Brak danych	
Gęstość pary	kg/m <sup>3</sup>	Brak danych	



Rys. Z.1.7. Wykres  $lgp - h$  dla czynnika R507, opracowano w oparciu o Raport Bitzera [116]

**ZAŁĄCZNIK nr 2**

**WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH NIESTABILNOŚCI  
CIŚNIENIOWYCH O CHARAKTERZE PERIODYCZNYM PODCZAS  
SKRAPLANIA CZYNNIKÓW CHŁODNICZYCH  
W MINIKANAŁACH RUROWYCH**





Załącznik 1 zawiera uzupełniające wyniki badań eksperymentalnych wpływu niestabilności dynamicznych generowanych okresowo w postaci sygnału zmiany ciśnienia  $v_p$  na proces skraplania czynników chłodniczych R134a, R1234yf, R1234ze, R404A, R507 i R448A w mini kanałach rurowych



Tablica Z.2.1.

Zestawienie eksperymentalnych wartości prędkości niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  dla czynników chłodniczych R134a, R1234yf i R1234ze, R404A, R507 i R448A w minikanalach z zakresu 1,40 ÷ 3,30 mm

$d_h = 3,30$ [mm]							
		R134a	R1234yf	R1234ze	R404A	R507	R448A
$\tau$ [s]	$\omega$ [rad/s]	$v_p$ [m/s]					
0,10	31,40	318	350	355	269	303	300
0,15	20,93	317	310	315	282	307	304
0,20	15,70	337	260	265	226	303	300
0,25	12,56	310	235	240	216	289	286
0,30	10,47	154	198	203	197	232	229
0,35	8,97	139	190	195	176	201	198
0,40	7,85	100	185	190	171	198	195
0,45	6,98	90	180	185	166	187	184
0,50	6,28	57	170	175	147	163	160
0,55	5,71	60	175	180	142	143	140
0,60	5,23	33	168	173	144	123	120
0,65	4,83	39	160	165	133	123	120
0,70	4,49	29	160	165	131	118	115
0,75	4,19	21	155	160	117	115	112
0,80	3,93	21	145	150	114	98	95
0,85	3,69	13	120	125	110	92	89
0,90	3,49	9	110	115	106	48	45
0,95	3,31	11	115	120	81	53	50
1,00	3,14	10	115	120	64	43	40
1,05	2,99	3	118	123	63	42	39
1,10	2,85	2	115	120	58	38	35
1,15	2,73	24	110	115	24	32	29
1,20	2,62		112	117			
1,25	2,51		115	120			

Tablica Z.2.1.c.d.

<b><math>d_h = 2,30</math> [mm]</b>							
		<b>R134a</b>	<b>R1234yf</b>	<b>R1234ze</b>	<b>R404A</b>	<b>R507</b>	<b>R448A</b>
<b><math>\tau</math> [s]</b>	<b><math>\omega</math> [rad/s]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>					
0,10	31,40	263	250	258	233	250	252
0,15	20,93	281	225	233	205	225	227
0,20	15,70	293	198	206	205	198	200
0,25	12,56	202	178	186	179	178	180
0,30	10,47	147	150	158	130	150	152
0,35	8,97	132	152	160	111	152	154
0,40	7,85	108	151	159	104	151	153
0,45	6,98	81	148	156	67	148	150
0,50	6,28	33	149	157	71	149	151
0,55	5,71	38	143	151	61	143	145
0,60	5,23	33	140	148	30	140	142
0,65	4,83	21	140	148	13	140	142
0,70	4,49	13	138	146	11	138	140
0,75	4,19	9	135	143	6	135	137
0,80	3,93	13	125	133	7	125	127
0,85	3,69	11	115	123	4	115	117
0,90	3,49	9	113	121	5	110	112
0,95	3,31	10	112	120	5	112	114
1,00	3,14	8	111	119	5	120	122
1,05	2,99	9	111	119	6	120	122
1,10	2,85	6	111	119	8	125	127
1,15	2,73	6	103	111	6	115	117
1,20	2,62		104	112			
1,25	2,51		103	111			

Tablica Z.2.1.c.d.

<b><math>d_h = 1,92</math> [mm]</b>							
		<b>R134a</b>	<b>R1234yf</b>	<b>R1234ze</b>	<b>R404A</b>	<b>R507</b>	<b>R448A</b>
<b><math>\tau</math> [s]</b>	<b><math>\omega</math> [rad/s]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>					
0,10	31,40	247	249	247	225	237	241
0,15	20,93	262	250	248	195	212	216
0,20	15,70	255	192	199	195	185	189
0,25	12,56	193	173	187	142	165	169
0,30	10,47	145	152	158	124	137	141
0,35	8,97	129	151	157	105	139	143
0,40	7,85	123	149	152	71	138	142
0,45	6,98	73	148	149	61	135	139
0,50	6,28	27	147	148	55	136	140
0,55	5,71	13	141	146	43	130	134
0,60	5,23	19	141	139	22	127	131
0,65	4,83	16	139	139	11	127	131
0,70	4,49	10	137	133	10	125	129
0,75	4,19	13	133	128	12	122	126
0,80	3,93	13	123	120	12	112	116
0,85	3,69	17	112	118	11	102	106
0,90	3,49	16	98	100	14	97	101
0,95	3,31	9	97	99	6	99	103
1,00	3,14	18	110	99	13	107	111
1,05	2,99	11	99	91	10	107	111
1,10	2,85	11	99	91	8	112	116
1,15	2,73	7	101	89		102	106
1,20	2,62		101	89			
1,25	2,51		102	89			

Tablica Z.2.1.c.d.

$d_h = 1,44$ [mm]							
		R134a	R1234yf	R1234ze	R404A	R507	R448A
$\tau$ [s]	$\omega$ [rad/s]	$v_p$ [m/s]					
0,10	31,40	199	210	221	220	209	203
0,15	20,93	191	190	215	173	211	187
0,20	15,70	199	189	214	151	185	183
0,25	12,56	154	178	199	99	174	172
0,30	10,47	135	155	191	51	155	156
0,35	8,97	125	150	188	46	150	150
0,40	7,85	98	147	168	34	122	146
0,45	6,98	55	147	165	21	121	148
0,50	6,28	27	145	155	14	117	143
0,55	5,71	34	140	149	10	118	137
0,60	5,23	19	142	149	14	105	139
0,65	4,83	10	138	141	11	101	133
0,70	4,49	22	132	139	10	98	134
0,75	4,19	14	130	132	9	55	128
0,80	3,93	13	124	133	9	58	124
0,85	3,69	11	111	128	8	32	114
0,90	3,49	10	80	122	7	28	80
0,95	3,31	11	78	111	8	26	74
1,00	3,14	9	73	84	5	25	68
1,05	2,99	10	70	81	6	15	65
1,10	2,85	9	80	80	4	12	63
1,15	2,73	8	75	77		11	63
1,20	2,62		73	76		9	57
1,25	2,51		70	73		5	53
1,30	2,42						47

Tablica Z.2.1.c.d.

$d_h = 1,40$ [mm]							
		R134a	R1234yf	R1234ze	R404A	R507	R448A
$\tau$ [s]	$\omega$ [rad/s]	$v_p$ [m/s]					
0,10	31,40	193	198	201	191	196	203
0,15	20,93	183	182	201	168	180	187
0,20	15,70	175	178	199	140	176	183
0,25	12,56	130	167	182	93	165	172
0,30	10,47	119	151	178	47	149	156
0,35	8,97	99	145	176	42	143	150
0,40	7,85	48	141	168	30	139	146
0,45	6,98	17	143	161	12	141	148
0,50	6,28	12	138	154	13	136	143
0,55	5,71	12	132	151	8	130	137
0,60	5,23	14	134	144	8	132	139
0,65	4,83	14	128	138	7	126	133
0,70	4,49	9	129	138	4	127	134
0,75	4,19	12	123	125	5	121	128
0,80	3,93	24	119	121	7	117	124
0,85	3,69	8	109	117	4	107	114
0,90	3,49	14	75	101	5	73	80
0,95	3,31	14	69	101	3	67	74
1,00	3,14	12	63	98	4	61	68
1,05	2,99	14	60	97	5	58	65
1,10	2,85	10	58	88	4	56	63
1,15	2,73	9	58	84	3	56	63
1,20	2,62	7	52	80		50	57
1,25	2,51	8	48	78		46	53
1,30	2,42	10	42	66		40	47
1,35	2,33	9	42	54		40	
1,40	2,24	7	36	51		34	
1,45	2,17	8	34	43		32	
1,50	2,09	6	28	40		26	
1,55	2,03	8	31	37		29	
1,60	1,96	9	27	25		25	
1,65	1,90	7	22	24		20	
1,70	1,85	6	23	19		21	

Tablica Z.2.2.

Zestawienie obliczeniowych wielkości stopnia zapelnienia  $\varphi$  w odniesieniu do uzyskanych prędkości niestabilności ciśnieniowych  $v_p$

$d_h = 3,30 \text{ mm}$											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$
257	0,81	350	0,86	355	0,87	269	0,87	303	0,87	300	0,87
293	0,81	310	0,84	315	0,85	282	0,85	307	0,85	304	0,85
337	0,82	260	0,84	265	0,84	226	0,84	303	0,84	300	0,84
321	0,82	235	0,82	240	0,82	216	0,84	289	0,84	286	0,84
209	0,79	198	0,79	203	0,79	197	0,83	232	0,81	229	0,81
162	0,78	190	0,78	195	0,78	176	0,83	201	0,79	198	0,80
128	0,76	185	0,76	190	0,76	171	0,84	198	0,78	195	0,79
90	0,71	180	0,71	185	0,71	166	0,81	187	0,77	184	0,78
72	0,69	170	0,69	175	0,69	147	0,79	163	0,75	170	0,76
60	0,66	175	0,66	180	0,68	142	0,77	153	0,71	163	0,73
47	0,64	168	0,64	173	0,67	144	0,75	148	0,69	162	0,72
39	0,60	160	0,60	165	0,65	133	0,72	141	0,68	159	0,70
29	0,59	160	0,59	165	0,64	131	0,70	131	0,67	156	0,68
21	0,54	155	0,57	160	0,63	117	0,69	124	0,66	156	0,66
21	0,51	145	0,55	150	0,61	114	0,66	122	0,65	151	0,64
13	0,62	120	0,52	125	0,50	110	0,65	123	0,63	151	0,61
9	0,60	110	0,50	115	0,48	106	0,63	120	0,61	146	0,59
11	0,63	115	0,48	120	0,47	81	0,61	120	0,60	147	0,56
10	0,56	115	0,46	120	0,46	64	0,61	120	0,58	136	0,53
3	0,57	118	0,44	123	0,44	63	0,60	113	0,52	133	0,49
2	0,59	115	0,40	120	0,40	58	0,59	111	0,48	126	0,46
		110	0,39	115	0,38			111	0,43	119	0,42
		112	0,37	117	0,37						
		115	0,35	120	0,35						



Tablica Z.2.2.c.d.

d <sub>h</sub> = 2,30 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
v <sub>p</sub> [m/s]	φ	v <sub>p</sub> [m/s]	φ	v <sub>p</sub> [m/s]	φ	v <sub>p</sub> [m/s]	φ	v <sub>p</sub> [m/s]	φ	v <sub>p</sub> [m/s]	φ
243	0,85	250	0,86	258	0,87	233	0,84	250	0,84	252	0,84
281	0,86	225	0,84	233	0,85	205	0,82	225	0,83	227	0,82
293	0,86	198	0,82	206	0,82	205	0,81	198	0,81	200	0,81
202	0,83	178	0,80	186	0,80	179	0,79	178	0,79	180	0,79
160	0,81	150	0,75	158	0,74	130	0,79	164	0,78	169	0,77
132	0,81	152	0,73	160	0,75	111	0,76	160	0,77	159	0,76
108	0,80	151	0,72	159	0,75	104	0,75	151	0,76	146	0,74
81	0,78	148	0,70	156	0,75	67	0,74	148	0,74	144	0,72
53	0,75	149	0,71	157	0,74	71	0,70	146	0,73	139	0,70
49	0,74	143	0,72	151	0,73	61	0,68	143	0,73	139	0,68
33	0,71	140	0,69	148	0,71	30	0,66	140	0,73	137	0,66
21	0,68	140	0,66	148	0,69	13	0,63	140	0,72	137	0,64
19	0,63	138	0,65	146	0,68	11	0,62	138	0,71	137	0,62
17	0,58	135	0,62	143	0,67	6	0,61	135	0,70	137	0,61
13	0,57	125	0,58	133	0,61	7	0,59	125	0,69	132	0,59
17	0,57	115	0,55	123	0,57	4	0,58	115	0,67	132	0,58
7	0,51	113	0,51	121	0,55	5	0,57	110	0,65	129	0,56
13	0,49	112	0,49	120	0,55	5	0,56	112	0,61	123	0,55
13	0,48	111	0,48	119	0,54	5	0,56	111	0,57	121	0,51
		111	0,45	119	0,52	6	0,56	109	0,53	120	0,48
		111	0,44	119	0,53	8	0,55	105	0,49	115	0,46
		103	0,42	111	0,42			105	0,44	110	0,43
		104	0,40	112	0,40						
		103	0,39	111	0,39						

Tablica Z.2.2.c.d.

d <sub>h</sub> = 1,92 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
v <sub>p</sub> [m/s]	φ	v <sub>p</sub> [m/s]	φ	v <sub>p</sub> [m/s]	φ	v <sub>p</sub> [m/s]	φ	v <sub>p</sub> [m/s]	φ	v <sub>p</sub> [m/s]	φ
223	0,87	249	0,88	247	0,89	225	0,87	237	0,86	241	0,86
262	0,88	250	0,88	248	0,89	195	0,86	212	0,85	216	0,84
255	0,88	192	0,84	199	0,85	195	0,86	185	0,82	189	0,83
193	0,85	173	0,82	187	0,83	142	0,85	165	0,80	169	0,81
145	0,83	152	0,78	158	0,79	124	0,83	148	0,79	166	0,81
129	0,83	151	0,78	157	0,78	105	0,81	139	0,78	157	0,79
123	0,83	149	0,78	152	0,77	71	0,80	138	0,77	151	0,78
104	0,82	148	0,77	149	0,77	61	0,77	135	0,77	149	0,77
86	0,82	147	0,77	148	0,77	55	0,76	136	0,76	140	0,76
72	0,81	141	0,76	146	0,76	43	0,73	130	0,75	134	0,73
59	0,81	141	0,77	139	0,75	22	0,71	127	0,75	131	0,71
45	0,80	139	0,76	139	0,73	11	0,66	127	0,74	128	0,68
32	0,77	137	0,75	133	0,72	10	0,62	125	0,73	124	0,66
13	0,71	133	0,74	128	0,71	12	0,62	122	0,72	116	0,62
7	0,69	123	0,73	120	0,69	12	0,60	112	0,70	116	0,60
8	0,68	112	0,70	118	0,68	11	0,58	102	0,68	110	0,57
5	0,66	98	0,64	100	0,64	14	0,56	97	0,65	107	0,55
9	0,64	97	0,61	99	0,61	6	0,55	99	0,61	102	0,53
7	0,64	110	0,67	99	0,65	13	0,54	97	0,58	101	0,51
11	0,57	99	0,57	91	0,57	10	0,54	95	0,54	97	0,49
11	0,56	99	0,56	91	0,56	8	0,52	92	0,51	92	0,47
7	0,56	101	0,54	89	0,56			93	0,45	92	0,44
		101	0,52	89	0,52						
		102	0,48	89	0,48						

Tablica Z.2.2.c.d.

$d_h = 1,44 \text{ mm}$											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$	$v_p$ [m/s]	$\varphi$
199	0,86	210	0,88	221	0,89	220	0,89	217	0,89	214	0,89
191	0,86	190	0,86	215	0,88	173	0,89	202	0,89	216	0,89
199	0,86	189	0,86	214	0,89	151	0,89	185	0,87	190	0,89
154	0,85	178	0,85	199	0,87	99	0,86	174	0,86	179	0,86
135	0,85	155	0,84	191	0,86	51	0,83	166	0,84	160	0,83
125	0,85	150	0,83	188	0,86	46	0,82	150	0,82	155	0,82
98	0,84	147	0,82	168	0,84	34	0,79	122	0,79	127	0,79
55	0,83	147	0,83	165	0,83	21	0,78	121	0,78	126	0,78
27	0,81	145	0,82	155	0,82	14	0,76	117	0,76	122	0,76
34	0,82	140	0,81	149	0,81	10	0,75	118	0,75	123	0,75
19	0,79	142	0,81	149	0,81	14	0,71	105	0,72	118	0,73
21	0,80	138	0,80	141	0,80	11	0,68	96	0,70	112	0,71
22	0,82	132	0,78	139	0,78	10	0,65	89	0,68	108	0,70
14	0,77	130	0,77	132	0,77	9	0,64	81	0,65	103	0,69
13	0,79	124	0,76	133	0,76	9	0,60	79	0,63	105	0,67
23	0,78	111	0,75	128	0,75	8	0,57	76	0,62	97	0,64
10	0,69	80	0,69	122	0,73	7	0,55	73	0,60	93	0,61
8	0,68	78	0,68	111	0,72	8	0,51	77	0,58	85	0,57
7	0,70	73	0,66	84	0,66	5	0,47	74	0,55	80	0,54
6	0,72	70	0,64	81	0,64	6	0,44	73	0,53	77	0,51
6	0,65	80	0,62	80	0,62	4	0,42	73	0,51	68	0,49
		75	0,61	77	0,61			74	0,49	67	0,47
		73	0,55	76	0,55			70	0,46	63	0,45
		70	0,45	73	0,45			73	0,44	56	0,43

Tablica Z.2.2.c.d.

d <sub>h</sub> = 1,40 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
V <sub>p</sub> [m/s]	φ	V <sub>p</sub> [m/s]	φ	V <sub>p</sub> [m/s]	φ	V <sub>p</sub> [m/s]	φ	V <sub>p</sub> [m/s]	φ	V <sub>p</sub> [m/s]	φ
193	0,90	198	0,92	201	0,91	152	0,93	196	0,91	203	0,90
183	0,90	182	0,90	201	0,91	139	0,93	180	0,90	187	0,90
107	0,89	178	0,89	199	0,91	81	0,92	176	0,90	183	0,89
75	0,88	167	0,88	182	0,90	44	0,90	165	0,88	172	0,88
53	0,87	151	0,87	178	0,89	35	0,89	149	0,88	156	0,87
33	0,85	145	0,86	176	0,89	33	0,88	143	0,87	150	0,85
25	0,84	141	0,86	168	0,89	26	0,87	139	0,85	138	0,83
28	0,82	143	0,86	161	0,89	19	0,86	124	0,84	122	0,82
29	0,85	138	0,85	154	0,88	21	0,86	120	0,83	112	0,80
45	0,86	132	0,85	151	0,88	18	0,84	107	0,79	103	0,79
39	0,86	134	0,85	144	0,87	16	0,84	93	0,77	98	0,77
29	0,85	128	0,85	138	0,85	13	0,83	90	0,77	96	0,75
25	0,84	127	0,84	138	0,86	17	0,83	80	0,73	84	0,72
24	0,85	123	0,85	125	0,85	14	0,82	75	0,72	80	0,70
24	0,78	119	0,84	121	0,84	14	0,82	68	0,70	78	0,68
20	0,76	109	0,83	117	0,83	10	0,81	72	0,68	77	0,65
14	0,72	75	0,80	101	0,80	8	0,80	65	0,67	78	0,64
24	0,84	69	0,79	101	0,79	7	0,79	67	0,65	74	0,62
24	0,81	63	0,78	98	0,78	6	0,77	61	0,65	68	0,60
14	0,60	60	0,77	97	0,77	7	0,66	58	0,62	65	0,58
15	0,70	58	0,75	88	0,75	5	0,63	56	0,61	63	0,55
9	0,57	58	0,73	84	0,73	7	0,62	56	0,59	63	0,52
15	0,69	52	0,69	80	0,72	5	0,61	59	0,57	57	0,50
16	0,63	48	0,67	78	0,71	3	0,60	58	0,56	53	0,47
13	0,67	42	0,65	66	0,68	4	0,59	54	0,54	47	0,44
9	0,60	42	0,64	54	0,65	1	0,58	54	0,53		
14	0,68	36	0,62	51	0,63	2	0,57	53	0,51		
17	0,64	34	0,60	43	0,60	4	0,56	51	0,49		
12	0,62	28	0,60	40	0,60	2	0,56	49	0,47		
14	0,61	31	0,58	37	0,58	3	0,54	50	0,46		
12	0,62	27	0,57	25	0,57	1	0,53	46	0,43		
14	0,59	22	0,56	24	0,56	2	0,52	46	0,41		
15	0,52	23	0,52	19	0,52	3	0,51	48	0,39		
						2	0,51				
						3	0,50				
						4	0,50				
						2	0,48				
						1	0,47				

Tablica Z.2.3.

Zestawienie obliczeniowych wielkości średniego jednostkowego strumienia ciepła  $q$  oraz różnicy ciśnienia  $\Delta p$  w odniesieniu do uzyskanych prędkości niestabilności ciśnieniowych

$$v_p$$

<b><math>d_h = 1,40</math> [mm]</b>								
<b>R134a</b>			<b>R1234yf</b>			<b>R1234ze</b>		
<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{\text{sr}}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{\text{sr}}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{\text{sr}}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>
193	62	30	198	65	35	201	62	34
171	62	32	182	65	40	201	62	38
139	62	42	178	65	42	199	62	40
100	61	50	167	64	50	182	61	48
75	61	65	151	64	56	178	61	54
59	61	65	145	63	58	176	61	56
48	58	70	125	60	70	168	58	68
17	56	70	128	59	66	161	56	65
12	55	64	138	58	61	154	55	60
12	52	70	123	55	71	151	57	69
14	55	70	134	58	72	144	55	70
14	54	70	126	57	68	138	54	66
9	57	59	133	59	64	138	57	62
12	54	64	122	56	74	125	54	72
24	52	80	111	55	80	121	52	78
8	51	75	118	54	75	117	51	73
14	49	80	75	52	89	101	49	87
14	50	80	69	52	90	101	50	89
12	48	80	63	51	94	98	48	92
14	49	85	78	52	87	97	49	85
10	49	86	82	49	86	88	48	84
9	49	76	58	57	95	84	48	93
7	50	85	87	53	85	80	48	83
8	49	85	99	52	82	78	47	80
10	47	90	54	50	93	66	47	92
9	45	90	42	48	95	54	45	94
7	44	90	36	46	96	51	44	95
8	44	97	34	46	97	43	44	95
6	45	90	28	48	98	40	45	96
8	43	100	31	46	100	37	43	98
9	29	120	27	32	117	25	29	115
7	31	120	22	34	120	24	31	118
						19	29	119

Tablica Z.2.3.c.d.

<b><math>d_h = 1,40</math> [mm]</b>								
<b>R404A</b>			<b>R507</b>			<b>R448A</b>		
<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>
191	62	27	196	62	28	203	62	30
168	62	27	180	62	29	187	62	30
140	62	27	176	62	30	183	62	30
93	61	27	165	61	32	172	61	30
47	61	30	149	61	32	156	61	33
42	61	32	143	61	33	150	61	35
30	58	32	139	58	36	146	59	35
12	56	42	141	56	38	148	59	45
13	55	42	136	55	40	143	59	45
8	56	47	130	57	42	137	57	50
8	55	47	132	55	44	139	59	50
7	54	47	126	54	48	133	57	50
4	55	57	127	57	51	134	58	60
5	54	52	121	54	52	128	57	55
7	52	52	117	52	53	124	56	55
4	51	57	107	51	57	114	56	60
5	49	57	73	49	60	80	55	60
3	50	57	67	50	61	74	53	60
4	48	57	61	48	63	68	51	60
5	49	57	58	49	69	65	52	60
4	48	57	56	48	71	63	51	60
3	48	60	56	48	72	63	51	63
			50	48	75	57	49	64
			46	47	77	53	47	64
			42	47	79	47	46	65
			40	45	80			
			34	44	81			
			32	44	84			
			26	45	86			
			29	43	90			
			25	41	92			
			20	42	94			
			21	41	98			

Tablica Z.2.3.c.d.

<b><math>d_h = 1,44</math> [mm]</b>								
R134a			R1234yf			R1234ze		
<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>
225	56	28	210	55	30	221	56	29
191	55	32	203	54	33	215	55	33
199	56	32	189	54	35	214	56	38
154	52	36	178	51	38	199	52	40
168	53	34	172	52	39	191	53	44
125	50	40	163	49	41	188	50	49
99	49	46	157	48	42	168	49	51
80	49	49	147	47	47	165	49	56
27	43	58	156	48	44	155	46	58
34	44	55	140	43	48	149	44	60
19	41	60	142	44	50	149	44	63
29	41	57	138	42	52	141	42	67
55	43	52	132	42	53	139	43	69
43	45	53	130	44	56	132	43	72
41	42	55	124	41	61	133	42	78
68	46	50	120	41	67	128	42	82
40	40	53	80	32	80	122	40	88
20	39	62	109	37	72	111	39	91
20	36	61	105	34	78	84	36	96
19	34	63	91	33	79	81	34	99
20	33	64	80	31	82	80	33	101
18	29	68	75	28	81	77	29	102
			73	27	83	76	27	102
			70	26	86	73	26	103

Tablica Z.2.3.c.d.

<b><math>d_h = 1,44</math> [mm]</b>								
<b>R404A</b>			<b>R507</b>			<b>R448A</b>		
<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>
220	56	25	209	56	26	203	56	27
173	55	25	211	55	26	187	55	27
151	56	25	185	56	27	183	56	27
99	52	25	174	52	27	172	52	27
51	51	28	155	51	30	156	51	30
46	50	30	150	50	31	150	50	32
34	49	30	122	49	38	146	49	32
21	49	40	121	49	39	148	49	42
14	46	40	117	46	40	143	48	42
10	44	45	118	44	41	137	46	47
14	44	45	105	44	43	139	45	47
11	42	45	101	42	45	133	45	47
10	43	55	98	43	46	134	45	57
9	43	50	55	38	55	128	45	52
9	42	50	58	37	53	124	44	52
8	42	55	32	35	59	114	43	57
7	40	55	28	38	60	80	38	57
8	39	55	26	37	60	74	37	57
5	36	55	25	36	61	68	36	57
6	34	55	15	34	66	65	34	57
4	32	55	12	32	70	63	32	57
			11	31	74	63	31	58
			9	28	77	57	28	59
			5	28	83	53	28	62
						47	27	63



Tablica Z.2.3.c.d.

<b><math>d_h = 1,92</math> [mm]</b>								
R134a			R1234yf			R1234ze		
<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>
237	48	27	249	46	27	247	48	27
262	49	27	250	47	27	248	49	28
255	49	27	192	47	32	199	49	31
193	46	28	173	44	35	187	46	33
156	43	31	153	41	41	158	43	38
129	42	37	151	40	43	157	42	40
117	42	38	144	40	43	152	42	41
73	39	45	143	37	45	149	39	42
27	38	62	132	36	47	148	38	45
13	34	70	130	32	50	146	34	47
19	36	60	127	35	52	139	36	49
16	36	65	126	34	54	139	36	51
10	35	65	118	33	58	133	35	53
13	35	65	116	33	60	128	35	55
13	30	83	113	29	63	120	30	57
17	33	83	111	31	66	118	33	59
16	33	75	109	31	68	100	33	61
9	33	81	108	31	69	99	33	65
18	28	85	107	26	69	99	28	66
11	27	90	103	25	73	91	27	67
11	26	90	105	25	70	91	26	69
7	22	105	101	20	73	89	22	71
			106	23	73	89	21	72
			102	19	75	89	18	74

Tablica Z.2.3.c.d.

<b><math>d_h = 1,92</math> [mm]</b>								
R404A			R507			R448A		
<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>
225	48	24	237	48	24	241	53	26
195	49	24	212	49	24	216	51	26
195	49	24	185	49	25	189	49	26
142	46	24	165	46	25	169	46	26
124	43	27	137	43	30	141	42	29
105	42	29	139	42	30	143	42	31
71	42	29	138	42	31	142	42	31
61	39	39	135	39	31	139	41	41
55	38	39	136	38	31	140	39	41
43	36	44	130	36	33	134	38	46
22	34	44	127	34	33	131	37	46
11	34	44	127	34	33	131	35	46
10	32	54	125	32	34	129	34	48
12	32	49	122	32	35	126	35	51
12	30	49	112	30	36	116	33	51
11	33	54	102	28	38	106	30	56
14	33	54	97	25	42	101	26	56
6	31	54	99	26	39	103	28	56
13	28	54	107	28	38	111	31	56
10	27	54	107	27	39	111	32	56
8	26	54	112	29	38	116	32	56
			102	24	41	106	24	57

Tablica Z.2.3.c.d.

<b><math>d_h = 2,30</math> [mm]</b>								
R134a			R1234yf			R1234ze		
<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>
263	41	25	250	40	25	258	41	25
281	41	25	225	39	26	233	41	27
293	40	25	198	39	28	206	40	28
202	39	25	178	38	30	186	39	33
147	35	27	156	33	34	158	35	36
132	33	30	160	31	32	160	33	36
108	31	32	145	29	38	159	31	38
81	28	36	148	27	39	156	28	39
41	27	40	149	26	35	157	27	40
38	26	42	143	24	38	151	26	41
33	26	45	135	24	42	148	26	42
21	25	50	140	24	41	148	25	41
13	24	55	138	22	39	146	24	42
9	23	59	128	21	43	143	23	43
13	25	57	125	23	45	133	25	45
11	24	58	115	20	47	123	24	48
7	24	61	113	20	50	121	24	50
8	24	62	107	19	59	120	24	55
11	22	64	111	21	57	119	22	57
			111	20	55	119	18	58
			111	19	52	119	16	59
			103	19	60	111	15	60
			104	17	62	112	14	62
			103	16	64	111	13	65

Tablica Z.2.3.c.d.

<b><math>d_h = 2.30</math> [mm]</b>								
<b>R404A</b>			<b>R507</b>			<b>R448A</b>		
<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>	<b><math>v_p</math> [m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math> [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math> [kPa]</b>
233	41	25	250	41	22	252	41	25
205	41	25	225	41	23	227	41	25
205	40	25	198	40	23	200	40	25
179	39	25	178	39	23	180	39	25
130	35	26	150	35	25	152	35	26
111	33	27	152	33	24	154	33	27
104	31	27	151	31	24	153	31	27
67	28	30	148	28	25	150	28	30
71	28	36	149	28	24	151	28	36
61	29	36	143	29	25	145	29	36
30	26	36	140	26	26	142	26	36
13	22	42	140	25	26	142	25	42
11	22	48	138	25	27	140	25	48
6	23	50	135	25	27	137	25	50
7	22	50	125	23	28	127	23	50
4	21	50	115	21	31	117	21	50
5	21	55	110	21	31	112	21	55
5	22	55	112	22	29	114	22	55
5	22	56	120	22	29	122	22	56
6	18	56	120	22	29	122	22	56
8	16	56	125	23	28	127	23	56
6	15	60	115	20	29	117	20	55

Tablica Z.2.3.c.d.

<b><math>d_h = 3,30</math> [mm]</b>								
R134a			R1234yf			R1234ze		
<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{\dot{s}r}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{\dot{s}r}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{\dot{s}r}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>
318	30	25	350	29	25	355	30	25
317	30	25	310	29	25	315	30	25
337	30	25	260	30	25	265	30	25
310	29	25	235	29	25	240	29	25
154	25	24	198	24	25	203	25	26
139	23	25	190	23	26	195	23	27
100	22	29	185	22	26	190	22	28
90	21	30	180	21	26	185	21	29
71	19	31	173	19	27	175	19	29
60	20	33	160	20	28	180	20	30
33	19	45	168	18	27	173	19	30
39	17	38	153	17	28	165	17	31
29	16	50	160	16	29	165	16	32
21	17	50	147	17	31	160	17	31
21	14	50	145	14	31	150	14	33
13	13	55	134	13	33	125	13	35
9	14	60	123	13	34	115	14	37
11	14	60	115	11	36	120	14	38
10	13	65	124	12	36	120	13	37
3	12	70	129	11	35	123	12	36
2	10	70	109	10	38	120	10	40
			107	10	42	115	10	43
			108	8	44	117	9	46
			105	8	50	120	8	51

Tablica Z.2.3.c.d.

<b><math>d_h = 3.30</math> [mm]</b>								
R404A			R507			R448A		
<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>	<b><math>v_p</math></b> <b>[m/s]</b>	<b><math>q_{sr}</math></b> <b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta p</math></b> <b>[kPa]</b>
269	30	24	303	30	19	300	30	24
282	30	24	307	30	20	304	30	24
226	30	24	303	30	20	300	30	24
216	29	24	289	29	20	286	29	24
197	25	28	232	25	20	229	25	28
176	23	29	201	23	21	198	23	29
171	22	32	198	22	21	195	22	32
166	21	35	187	21	21	184	21	35
147	19	40	163	19	21	160	19	40
142	20	40	143	20	21	140	20	40
144	19	44	123	19	23	120	19	44
133	19	44	123	19	23	120	18	44
131	19	44	118	19	23	115	19	44
117	17	47	115	17	24	112	17	47
114	17	47	98	17	29	95	17	47
110	16	52	92	16	30	89	16	52
106	17	56	48	17	39	45	14	56
81	14	56	53	14	37	50	14	56
64	13	59	43	13	42	40	13	59
63	12	75	42	12	45	39	12	75
58	10	75	38	10	49	35	10	75
24	5	85	32	5	52	30	5	85

**ZAŁĄCZNIK nr 3**

**WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH NIESTABILNOŚCI  
TEMPERATROWYCH O CHARAKTERZE PERIODYCZNYM  
PODCZAS SKRAPLANIA CZYNNIKÓW CHŁODNICZYCH  
W MINIKANAŁACH RUROWYCH**





Załącznik 3 zawiera uzupełniające wyniki badań eksperymentalnych wpływu niestabilności dynamicznych generowanych periodycznie w postaci sygnału zmiany temperatury  $v_T$  na proces skraplania czynników chłodniczych R134a, R1234yf, R1234ze, R404A, R507 i R448A w mini kanałach rurowych.



Tablica Z.3.1.

Zestawienie eksperymentalnych wartości prędkości niestabilności temperaturowych  $v_T$  dla czynników chłodniczych R134a, R1234yf i R1234ze, R404A, R507 i R448A w minikanalach z zakresu średnicy hydraulicznej  $d_h = 1,40 \div 3,30$  mm

$d_h = 3,30$ [mm]							
		R134a	R1234ze	R1234yf	R404A	R507	R448A
$\tau$ [s]	$\omega$ [rad/s]	$v_T$ [m/s]					
0,10	31,40	4,98	5,74	5,79	5,15	4,88	5,09
0,15	20,93	4,80	5,71	5,76	5,18	4,21	5,10
0,20	15,70	4,34	4,80	4,85	5,09	4,12	5,10
0,25	12,56	4,08	4,31	4,36	5,01	3,92	4,89
0,30	10,47	3,91	4,12	4,17	4,99	3,63	4,34
0,35	8,97	3,33	4,09	4,14	4,99	3,08	4,29
0,40	7,85	3,13	3,88	3,93	4,98	2,98	4,19
0,45	6,98	3,06	3,69	3,74	4,91	2,90	4,11
0,50	6,28	2,78	3,40	3,45	4,89	2,11	3,32
0,55	5,71	2,62	3,29	3,34	4,88	1,99	3,20
0,60	5,23	2,42	3,02	3,07	4,89	1,92	3,13
0,65	4,83	2,38	2,87	2,92	4,88	1,89	3,10
0,70	4,49	2,21	2,78	2,83	4,88	1,77	2,98
0,75	4,19	2,13	2,72	2,77	4,88	1,11	2,32
0,80	3,93	2,07	2,52	2,57	4,87		2,32
0,85	3,69	1,99	2,29	2,34	4,83		2,31
0,90	3,49	1,78	2,09	2,14	4,80		2,28
0,95	3,31	1,71	1,92	1,97	4,66		
1,00	3,14	1,68	1,81	1,86	4,53		
1,05	2,99	1,61	1,71	1,76	4,57		
1,10	2,85	1,56	1,68	1,73	4,44		
1,15	2,73		1,49	1,54	4,10		
1,20	2,62		1,49	1,54			
1,25	2,51		1,38	1,43			
1,30	2,42		1,42	1,47			
1,35	2,33		1,29	1,34			
1,40	2,24		1,27	1,32			
1,45	2,17		1,22	1,27			
1,50	2,09		1,11	1,16			
1,55	2,03		1,04	1,09			
1,60	1,96		0,89	0,94			
1,65	1,90		0,92	0,97			
1,70	1,85		0,82	0,87			
1,75	1,79		0,71	0,76			
1,80	1,74		0,68	0,73			
1,85	1,70		0,61	0,66			
1,90	1,65		0,59	0,64			
1,95	1,61		0,56	0,61			
2,00	1,57		0,55	0,60			

Tablica Z.3.1.c.d.

<b><math>d_h = 2,30</math> [mm]</b>							
		<b>R134a</b>	<b>R1234ze</b>	<b>R1234yf</b>	<b>R404A</b>	<b>R507</b>	<b>R448A</b>
<b><math>\tau</math> [s]</b>	<b><math>\omega</math> [rad/s]</b>	<b><math>v_T</math> [m/s]</b>					
0,10	31,40	4,61	4,26	4,52	4,94	3,87	4,90
0,15	20,93	4,59	4,37	4,63	4,93	3,88	4,91
0,20	15,70	4,16	4,23	4,49	4,91	3,92	4,95
0,25	12,56	4,03	4,02	4,28	4,87	3,71	4,74
0,30	10,47	3,48	3,36	3,62	4,77	3,21	4,24
0,35	8,97	3,22	3,25	3,51	4,69	2,99	4,02
0,40	7,85	3,09	3,11	3,37	4,62	2,38	3,41
0,45	6,98	3,01	2,79	3,05	4,51	2,32	3,35
0,50	6,28	2,57	2,58	2,84	4,45	2,29	3,32
0,55	5,71	2,33	2,46	2,72	4,31	2,29	3,32
0,60	5,23	2,21	2,35	2,61	4,09	1,90	2,93
0,65	4,83	2,18	2,11	2,37	3,48	1,81	2,84
0,70	4,49	2,11	2,16	2,42	3,17	1,71	2,74
0,75	4,19	1,96	1,82	2,08	3,01	1,65	2,68
0,80	3,93	1,91	1,67	1,93	2,97	1,23	2,26
0,85	3,69	1,88	1,62	1,88	2,57	1,20	2,23
0,90	3,49	1,71	1,47	1,73	2,12		2,22
0,95	3,31	1,69	1,42	1,68	2,02		
1,00	3,14	1,71	1,41	1,67	1,92		
1,05	2,99	1,65	1,39	1,65	1,78		
1,10	2,85	1,48	1,38	1,64	1,61		
1,15	2,73		1,39	1,65	1,52		
1,20	2,62		1,36	1,62			
1,25	2,51		1,34	1,60			
1,30	2,42		1,35	1,61			
1,35	2,33		1,35	1,61			
1,40	2,24		1,35	1,61			
1,45	2,17		1,34	1,60			
1,50	2,09		1,34	1,60			
1,55	2,03		1,33	1,59			
1,60	1,96		1,32	1,58			
1,65	1,90		1,29	1,55			
1,70	1,85		1,30	1,56			
1,75	1,79		1,26	1,52			
1,80	1,74		1,26	1,52			
1,85	1,70		1,20	1,46			
1,90	1,65		1,20	1,46			
1,95	1,61		1,17	1,43			
2,00	1,57		1,07	1,33			

Tablica Z.3.1.c.d.

<b>d<sub>h</sub> = 1,92 [mm]</b>							
		<b>R134a</b>	<b>R1234ze</b>	<b>R1234yf</b>	<b>R404A</b>	<b>R507</b>	<b>R448A</b>
<b>τ [s]</b>	<b>ω [rad/s]</b>	<b>v<sub>τ</sub> [m/s]</b>					
0,10	31,40	4,48	4,47	3,76	4,89	3,29	4,48
0,15	20,93	4,32	4,51	3,87	4,72	3,30	4,48
0,20	15,70	4,01	4,55	3,73	4,70	3,34	4,53
0,25	12,56	3,97	4,38	3,52	4,72	3,13	4,32
0,30	10,47	3,14	3,69	2,86	4,68	2,63	3,82
0,35	8,97	3,01	3,57	2,75	4,58	2,41	3,59
0,40	7,85	2,91	3,38	2,61	4,42	1,80	2,99
0,45	6,98	2,51	3,25	2,29	4,21	1,74	2,93
0,50	6,28	2,31	3,08	2,08	4,11	1,71	2,90
0,55	5,71	2,20	2,77	1,96	4,01	1,71	2,90
0,60	5,23	2,18	2,74	1,85	3,57	1,32	2,51
0,65	4,83	2,01	2,58	1,61	3,02	1,23	2,42
0,70	4,49	1,97	2,44	1,66	2,57	1,13	2,32
0,75	4,19	1,91	2,33	1,32	2,31	1,07	2,26
0,80	3,93	1,78	2,17	1,17	2,25	0,65	1,84
0,85	3,69	1,71	2,07	1,12	2,11	0,62	1,81
0,90	3,49	1,66	2,05	0,97	2,03	0,56	1,74
0,95	3,31	1,49	1,98	0,92	1,97		1,75
1,00	3,14	1,41	1,91	0,91	1,92		
1,05	2,99	1,39	1,89	0,89	1,78		
1,10	2,85	1,41	1,84	0,88	1,71		
1,15	2,73	1,31	1,77	0,89	1,64		
1,20	2,62		1,71	0,86			
1,25	2,51		1,65	0,84			
1,30	2,42		1,58	0,85			
1,35	2,33		1,55	0,85			
1,40	2,24		1,54	0,85			
1,45	2,17		1,55	0,84			
1,50	2,09		1,53	0,84			
1,55	2,03		1,47	0,83			
1,60	1,96		1,46	0,82			
1,65	1,90		1,36	0,79			
1,70	1,85		1,38	0,80			
1,75	1,79		1,31	0,76			
1,80	1,74		1,27	0,76			
1,85	1,70		1,25	0,70			
1,90	1,65		1,23	0,70			
1,95	1,61		1,11	0,67			
2,00	1,57		1,01	0,57			

Tablica Z.3.1.c.d.

<b><math>d_h = 1,44</math> [mm]</b>							
		<b>R134a</b>	<b>R1234ze</b>	<b>R1234yf</b>	<b>R404A</b>	<b>R507</b>	<b>R448A</b>
<b><math>\tau</math> [s]</b>	<b><math>\omega</math> [rad/s]</b>	<b><math>v_\tau</math> [m/s]</b>					
0,10	31,40	4,23	3,39	3,51	4,57	2,89	4,39
0,15	20,93	4,01	3,56	3,68	4,51	2,87	4,37
0,20	15,70	3,58	2,89	3,01	4,49	2,89	4,38
0,25	12,56	3,44	2,78	2,86	4,48	2,43	3,93
0,30	10,47	2,89	2,37	2,49	4,01	2,49	3,98
0,35	8,97	2,71	2,28	2,40	3,98	2,34	3,84
0,40	7,85	2,29	1,93	2,05	3,81	1,99	3,49
0,45	6,98	2,21	1,94	2,06	3,11	1,34	2,84
0,50	6,28	2,04	1,77	1,89	3,02	1,02	2,51
0,55	5,71	2,01	1,70	1,82	2,68	0,91	2,40
0,60	5,23	1,94	1,66	1,78	2,42	0,84	2,34
0,65	4,83	1,78	1,40	1,52	2,12	0,81	2,30
0,70	4,49	1,78	1,32	1,44	1,97	0,74	2,24
0,75	4,19	1,63	1,27	1,39	1,87	0,63	2,13
0,80	3,93	1,54	1,20	1,32	1,52	0,64	2,13
0,85	3,69	1,58	1,18	1,30	1,45	0,54	2,04
0,90	3,49	1,41	1,16	1,28	1,38	0,44	1,94
0,95	3,31	1,41	1,15	1,27	1,29	0,29	1,78
1,00	3,14	1,38	1,08	1,20	1,31		1,76
1,05	2,99	1,22	1,09	1,21	1,21		
1,10	2,85	1,18	1,05	1,17	1,17		
1,15	2,73	1,15	0,99	1,11	1,11		
1,20	2,62	1,01	1,02	1,14			
1,25	2,51	0,99	0,70	0,82			
1,30	2,42	1,01	0,67	0,79			
1,35	2,33	0,95	0,62	0,74			
1,40	2,24	0,94	0,53	0,65			
1,45	2,17	0,78	0,51	0,63			
1,50	2,09	0,69	0,47	0,59			
1,55	2,03	0,58	0,42	0,54			
1,60	1,96	0,59	0,40	0,52			
1,65	1,90	0,55	0,36	0,48			
1,70	1,85	0,51	0,35	0,47			
1,75	1,79		0,31	0,43			
1,80	1,74		0,32	0,44			
1,85	1,70		0,31	0,43			
1,90	1,65		0,20	0,32			
1,95	1,61		0,17	0,29			
2,00	1,57		0,12	0,24			

Tablica Z.3.1.c.d.

<b><math>d_h = 1,40</math> [mm]</b>							
		<b>R134a</b>	<b>R1234ze</b>	<b>R1234yf</b>	<b>R404A</b>	<b>R507</b>	<b>R448A</b>
<b><math>\tau</math> [s]</b>	<b><math>\omega</math> [rad/s]</b>	<b><math>v_T</math> [m/s]</b>					
0,10	31,40	3,99	3,10	3,28	4,54	2,85	4,12
0,15	20,93	3,77	3,27	3,45	4,44	2,83	4,10
0,20	15,70	3,34	2,60	2,78	4,48	2,85	4,12
0,25	12,56	3,20	2,49	2,63	4,28	2,39	3,66
0,30	10,47	2,65	2,08	2,26	3,78	2,45	3,72
0,35	8,97	2,47	1,99	2,17	3,30	2,30	3,57
0,40	7,85	2,05	1,64	1,82	3,07	1,95	3,22
0,45	6,98	1,97	1,65	1,83	2,59	1,30	2,57
0,50	6,28	1,80	1,48	1,66	2,51	0,98	2,25
0,55	5,71	1,77	1,41	1,59	2,12	0,87	2,14
0,60	5,23	1,70	1,37	1,55	2,01	0,80	2,07
0,65	4,83	1,54	1,11	1,29	1,98	0,77	2,04
0,70	4,49	1,54	1,03	1,21	1,91	0,70	1,97
0,75	4,19	1,39	0,98	1,16	1,75	0,59	1,86
0,80	3,93	1,30	0,91	1,09	1,69	0,60	1,87
0,85	3,69	1,34	0,89	1,07	1,52	0,50	1,77
0,90	3,49	1,17	0,87	1,05	1,47	0,40	1,67
0,95	3,31	1,17	0,86	1,04	1,41	0,25	1,52
1,00	3,14	1,14	0,79	0,97	1,31	0,23	1,23
1,05	2,99	0,98	0,80	0,98	1,22		1,53
1,10	2,85	0,94	0,76	0,94	1,18		
1,15	2,73	0,91	0,70	0,88	1,15		
1,20	2,62	0,77	0,73	0,91			
1,25	2,51	0,75	0,41	0,59			
1,30	2,42	0,77	0,38	0,56			
1,35	2,33	0,71	0,33	0,51			
1,40	2,24	0,70	0,24	0,42			
1,45	2,17	0,54	0,22	0,40			
1,50	2,09	0,45	0,18	0,36			
1,55	2,03	0,34	0,13	0,31			
1,60	1,96	0,35	0,11	0,29			
1,65	1,90	0,31	0,07	0,25			
1,70	1,85	0,27	0,06	0,24			
			0,02	0,20			
			0,03	0,21			
			0,02	0,20			

Tablica Z.3.2.

Zestawienie obliczeniowych wielkości stopnia zapełnienia  $\varphi$  w odniesieniu do uzyskanych prędkości niestabilności temperaturowych  $v_T$

d <sub>h</sub> = 3,30 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ
4,98	0,81	5,79	0,83	5,74	0,83	5,15	0,87	4,88	0,87	5,09	0,87
4,80	0,81	5,76	0,84	5,71	0,84	5,18	0,85	4,21	0,85	5,10	0,85
4,34	0,82	4,85	0,84	4,80	0,84	5,09	0,84	4,12	0,84	5,10	0,84
4,08	0,82	4,36	0,81	4,31	0,81	5,01	0,84	3,92	0,84	4,89	0,84
3,91	0,79	4,17	0,79	4,12	0,79	4,99	0,83	3,63	0,83	4,34	0,83
3,33	0,78	4,14	0,79	4,09	0,79	4,99	0,83	3,08	0,83	4,29	0,83
3,13	0,76	3,93	0,79	3,88	0,79	4,98	0,84	2,98	0,84	4,19	0,84
3,06	0,71	3,74	0,78	3,69	0,78	4,91	0,81	2,90	0,81	4,11	0,81
2,78	0,69	3,45	0,78	3,40	0,78	4,89	0,79	2,11	0,79	3,32	0,79
2,62	0,66	3,34	0,77	3,29	0,77	4,88	0,77	1,99	0,77	3,20	0,77
2,42	0,64	3,07	0,77	3,02	0,77	4,89	0,75	1,92	0,75	3,13	0,75
2,38	0,60	2,92	0,76	2,87	0,76	4,88	0,72	1,89	0,72	3,10	0,72
2,21	0,59	2,83	0,73	2,78	0,73	4,88	0,70	1,77	0,70	2,98	0,70
2,13	0,54	2,77	0,67	2,72	0,67	4,88	0,69	1,11	0,69	2,32	0,69
2,07	0,51	2,57	0,65	2,52	0,65	4,87	0,66			2,32	0,66
1,99	0,62	2,34	0,64	2,29	0,64	4,83	0,65			2,31	0,65
1,78	0,60	2,14	0,62	2,09	0,62	4,80	0,63			2,28	0,63
1,71	0,63	1,97	0,60	1,92	0,60	4,66	0,61				
1,68	0,56	1,86	0,60	1,81	0,60	4,53	0,61				
1,61	0,57	1,76	0,53	1,71	0,53	4,57	0,60				
1,56	0,59	1,73	0,52	1,68	0,52	4,44	0,59				
		1,54	0,52	1,49	0,52	4,10	0,52				
		1,54	0,50	1,49	0,50						
		1,43	0,48	1,38	0,48						
		1,47	0,46	1,42	0,46						
		1,34	0,45	1,29	0,45						
		1,32	0,43	1,27	0,43						
		1,27	0,42	1,22	0,42						
		1,16	0,40	1,11	0,40						
		1,09	0,38	1,04	0,38						
		0,94	0,36	0,89	0,36						
		0,97	0,35	0,92	0,35						
		0,87	0,35	0,82	0,35						
		0,76	0,34	0,71	0,34						
		0,73	0,33	0,68	0,33						
		0,66	0,31	0,61	0,31						
		0,64	0,30	0,59	0,30						
		0,61	0,29	0,56	0,29						
		0,60	0,27	0,55	0,27						



Tablica Z.3.2. c.d.

d <sub>h</sub> = 2,30 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ
4,61	0,85	4,52	0,85	4,26	0,85	4,94	0,84	3,87	0,84	4,90	0,84
4,59	0,86	4,63	0,86	4,37	0,86	4,93	0,82	3,88	0,82	4,91	0,82
4,16	0,86	4,49	0,86	4,23	0,86	4,91	0,81	3,92	0,81	4,95	0,81
4,03	0,83	4,28	0,83	4,02	0,83	4,87	0,79	3,71	0,79	4,74	0,79
3,48	0,81	3,62	0,81	3,36	0,81	4,77	0,79	3,21	0,79	4,24	0,79
3,22	0,81	3,51	0,81	3,25	0,81	4,69	0,76	2,99	0,76	4,02	0,76
3,09	0,80	3,37	0,81	3,11	0,81	4,62	0,75	2,38	0,75	3,41	0,75
3,01	0,78	3,05	0,80	2,79	0,80	4,51	0,74	2,32	0,74	3,35	0,74
2,57	0,75	2,84	0,80	2,58	0,80	4,45	0,70	2,29	0,70	3,32	0,70
2,33	0,74	2,72	0,79	2,46	0,79	4,31	0,68	2,29	0,68	3,32	0,68
2,21	0,71	2,61	0,79	2,35	0,79	4,09	0,66	1,90	0,66	2,93	0,66
2,18	0,68	2,37	0,78	2,11	0,78	3,48	0,63	1,81	0,63	2,84	0,63
2,11	0,63	2,42	0,75	2,16	0,75	3,17	0,62	1,71	0,62	2,74	0,62
1,96	0,58	2,08	0,69	1,82	0,69	3,01	0,61	1,65	0,61	2,68	0,61
1,91	0,57	1,93	0,67	1,67	0,67	2,97	0,59	1,23	0,59	2,26	0,59
1,88	0,57	1,88	0,66	1,62	0,66	2,57	0,58	1,20	0,58	2,23	0,58
1,71	0,51	1,73	0,64	1,47	0,64	2,12	0,57			2,22	0,57
1,69	0,49	1,68	0,62	1,42	0,62	2,02	0,56				
1,71	0,48	1,67	0,62	1,41	0,62	1,92	0,56				
1,65	0,44	1,65	0,55	1,39	0,55	1,78	0,56				
1,41	0,48	1,64	0,54	1,38	0,54	1,61	0,55				
		1,65	0,54	1,39	0,54	1,52	0,54				
		1,62	0,52	1,36	0,52						
		1,60	0,50	1,34	0,50						
		1,61	0,48	1,35	0,48						
		1,61	0,47	1,35	0,47						
		1,61	0,45	1,35	0,45						
		1,60	0,44	1,34	0,44						
		1,60	0,42	1,34	0,42						
		1,59	0,40	1,33	0,40						
		1,58	0,38	1,32	0,38						
		1,55	0,37	1,29	0,37						
		1,56	0,37	1,30	0,37						
		1,52	0,36	1,26	0,36						
		1,52	0,35	1,26	0,35						
		1,46	0,33	1,20	0,33						
		1,46	0,32	1,20	0,32						
		1,43	0,31	1,17	0,31						
		1,33	0,29	1,07	0,29						

Tablica Z.3.2. c.d.

d <sub>h</sub> = 1,92 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ
4,48	0,87	3,76	0,87	4,47	0,87	4,89	0,87	3,29	0,87	4,48	0,87
4,32	0,88	3,87	0,88	4,51	0,88	4,72	0,86	3,30	0,86	4,48	0,86
4,01	0,88	3,73	0,88	4,55	0,88	4,70	0,86	3,34	0,86	4,53	0,86
3,97	0,85	3,52	0,85	4,38	0,85	4,72	0,85	3,13	0,85	4,32	0,85
3,14	0,83	2,86	0,83	3,69	0,83	4,68	0,83	2,63	0,83	3,82	0,83
3,01	0,83	2,75	0,83	3,57	0,83	4,58	0,81	2,41	0,81	3,59	0,81
2,91	0,83	2,61	0,83	3,38	0,83	4,42	0,80	1,80	0,80	2,99	0,80
2,51	0,82	2,29	0,82	3,25	0,82	4,21	0,77	1,74	0,77	2,93	0,77
2,31	0,82	2,08	0,82	3,08	0,82	4,11	0,76	1,71	0,76	2,90	0,76
2,20	0,81	1,96	0,81	2,77	0,81	4,01	0,73	1,71	0,73	2,90	0,73
2,18	0,81	1,85	0,81	2,74	0,81	3,57	0,71	1,32	0,71	2,51	0,71
2,01	0,80	1,61	0,80	2,58	0,80	3,02	0,66	1,23	0,66	2,42	0,66
1,97	0,77	1,66	0,77	2,44	0,77	2,57	0,62	1,13	0,62	2,32	0,62
1,91	0,71	1,32	0,71	2,33	0,71	2,31	0,62	1,07	0,62	2,26	0,62
1,78	0,69	1,17	0,69	2,17	0,69	2,25	0,60	0,65	0,60	1,84	0,60
1,71	0,68	1,12	0,68	2,07	0,68	2,11	0,58	0,62	0,58	1,81	0,58
1,66	0,66	0,97	0,66	2,05	0,66	2,03	0,56	0,56	0,56	1,74	0,56
1,49	0,64	0,92	0,64	1,98	0,64	1,97	0,55			1,75	0,55
1,41	0,64	0,91	0,64	1,91	0,64	1,92	0,54				
1,39	0,57	0,89	0,57	1,89	0,57	1,78	0,54				
1,41	0,56	0,88	0,56	1,84	0,56	1,71	0,52				
1,31	0,56	0,89	0,56	1,77	0,56	1,64	0,56				
		0,86	0,54	1,71	0,54						
		0,84	0,52	1,65	0,52						
		0,85	0,50	1,58	0,50						
		0,85	0,49	1,55	0,49						
		0,85	0,47	1,54	0,47						
		0,84	0,46	1,55	0,46						
		0,84	0,44	1,53	0,44						
		0,83	0,42	1,47	0,42						
		0,82	0,40	1,46	0,40						
		0,79	0,39	1,36	0,39						
		0,80	0,39	1,38	0,39						
		0,76	0,38	1,31	0,38						
		0,76	0,37	1,27	0,37						
		0,70	0,35	1,25	0,35						
		0,70	0,34	1,23	0,34						
		0,67	0,33	1,11	0,33						
		0,57	0,31	1,01	0,31						

Tablica Z.3.2. c.d.

d <sub>h</sub> = 1,44 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ	v <sub>T</sub> [m/s]	φ
4,26	0,86	3,51	0,86	3,39	0,86	4,57	0,89	2,89	0,89	4,39	0,89
4,11	0,86	3,68	0,86	3,56	0,86	4,51	0,89	2,87	0,89	4,37	0,89
3,66	0,86	3,01	0,86	2,89	0,86	4,49	0,89	2,89	0,89	4,38	0,89
3,55	0,85	2,86	0,85	2,78	0,85	4,48	0,86	2,43	0,86	3,93	0,86
2,98	0,85	2,49	0,85	2,37	0,85	4,01	0,83	2,49	0,83	3,98	0,83
2,78	0,85	2,40	0,85	2,28	0,85	3,98	0,82	2,34	0,82	3,84	0,82
2,35	0,84	2,05	0,84	1,93	0,84	3,81	0,79	1,99	0,79	3,49	0,79
2,29	0,83	2,06	0,83	1,94	0,83	3,11	0,78	1,34	0,78	2,84	0,78
2,16	0,81	1,89	0,81	1,77	0,81	3,02	0,76	1,02	0,76	2,51	0,76
2,10	0,82	1,82	0,82	1,70	0,82	2,68	0,75	0,91	0,75	2,40	0,75
1,97	0,79	1,78	0,79	1,66	0,79	2,42	0,71	0,84	0,71	2,34	0,71
1,91	0,80	1,52	0,80	1,40	0,80	2,12	0,68	0,81	0,68	2,30	0,68
1,81	0,82	1,44	0,82	1,32	0,82	1,97	0,65	0,74	0,65	2,24	0,65
1,74	0,77	1,39	0,77	1,27	0,77	1,87	0,64	0,63	0,64	2,13	0,64
1,71	0,79	1,32	0,79	1,20	0,79	1,52	0,60	0,64	0,60	2,13	0,60
1,63	0,78	1,30	0,78	1,18	0,78	1,45	0,57	0,54	0,57	2,04	0,57
1,48	0,69	1,28	0,69	1,16	0,69	1,38	0,55	0,44	0,55	1,94	0,55
1,39	0,68	1,27	0,68	1,15	0,68	1,29	0,51	0,29	0,51	1,78	0,51
1,32	0,70	1,20	0,70	1,08	0,70	1,31	0,47			1,76	0,47
1,36	0,72	1,21	0,72	1,09	0,72	1,21	0,44				
1,20	0,65	1,17	0,65	1,05	0,65	1,17	0,42				
1,11	0,67	1,11	0,67	0,99	0,67	1,11	0,37				
		1,14	0,63	1,02	0,63						
		0,82	0,61	0,70	0,61						
		0,79	0,58	0,67	0,58						
		0,74	0,57	0,62	0,57						
		0,65	0,55	0,53	0,55						
		0,63	0,54	0,51	0,54						
		0,59	0,51	0,47	0,51						
		0,54	0,49	0,42	0,49						
		0,52	0,48	0,40	0,48						
		0,48	0,43	0,36	0,43						
		0,47	0,41	0,35	0,41						
		0,43	0,40	0,31	0,40						
		0,44	0,40	0,32	0,40						
		0,43	0,40	0,31	0,40						
		0,32	0,38	0,20	0,38						
		0,29	0,37	0,17	0,37						
		0,24	0,37	0,12	0,37						

Tablica Z.3.2. c.d.

$d_h = 1,40 \text{ mm}$											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
$v_T$ [m/s]	$\varphi$	$v_T$ [m/s]	$\varphi$	$v_T$ [m/s]	$\varphi$	$v_T$ [m/s]	$\varphi$	$v_T$ [m/s]	$\varphi$	$v_T$ [m/s]	$\varphi$
4,23	0,90	3,28	0,90	3,10	0,90	4,54	0,90	2,85	0,90	4,12	0,90
4,01	0,90	3,45	0,90	3,27	0,90	4,44	0,90	2,83	0,90	4,10	0,90
3,58	0,89	2,78	0,89	2,60	0,89	4,48	0,90	2,85	0,90	4,12	0,90
3,44	0,88	2,63	0,88	2,49	0,88	4,28	0,88	2,39	0,88	3,66	0,88
2,89	0,87	2,26	0,87	2,08	0,87	3,78	0,85	2,45	0,85	3,72	0,85
2,71	0,85	2,17	0,85	1,99	0,85	3,30	0,84	2,30	0,84	3,57	0,84
2,29	0,84	1,82	0,84	1,64	0,84	3,07	0,80	1,95	0,80	3,22	0,80
2,21	0,82	1,83	0,82	1,65	0,82	2,59	0,78	1,30	0,78	2,57	0,78
2,04	0,85	1,66	0,85	1,48	0,85	2,51	0,76	0,98	0,76	2,25	0,76
2,01	0,86	1,59	0,86	1,41	0,86	2,12	0,75	0,87	0,75	2,14	0,75
1,94	0,86	1,55	0,86	1,37	0,86	2,01	0,71	0,80	0,71	2,07	0,71
1,78	0,85	1,29	0,85	1,11	0,85	1,98	0,68	0,77	0,68	2,04	0,68
1,78	0,84	1,21	0,84	1,03	0,84	1,91	0,65	0,70	0,65	1,97	0,65
1,63	0,85	1,16	0,85	0,98	0,85	1,75	0,64	0,59	0,64	1,86	0,64
1,54	0,78	1,09	0,78	0,91	0,78	1,69	0,60	0,60	0,60	1,87	0,60
1,58	0,76	1,07	0,76	0,89	0,76	1,52	0,57	0,50	0,57	1,77	0,57
1,41	0,72	1,05	0,72	0,87	0,72	1,47	0,55	0,40	0,55	1,67	0,55
1,41	0,84	1,04	0,84	0,86	0,84	1,41	0,51	0,25	0,51	1,52	0,51
1,38	0,81	0,97	0,81	0,79	0,81	1,31	0,47	0,23	0,47	1,23	0,47
1,22	0,60	0,98	0,60	0,80	0,60	1,22	0,44			1,53	0,44
1,18	0,70	0,94	0,70	0,76	0,70	1,18	0,42				
1,15	0,57	0,88	0,57	0,70	0,57	1,15	0,37				
1,01	0,69	0,91	0,69	0,73	0,69						
0,99	0,63	0,59	0,63	0,41	0,63						
1,01	0,67	0,56	0,67	0,38	0,67						
0,95	0,60	0,51	0,60	0,33	0,60						
0,94	0,68	0,42	0,68	0,24	0,68						
0,78	0,64	0,40	0,64	0,22	0,64						
0,69	0,62	0,36	0,62	0,18	0,62						
0,58	0,61	0,31	0,61	0,13	0,61						
0,59	0,62	0,29	0,62	0,11	0,62						
0,55	0,59	0,25	0,59	0,07	0,59						
0,51	0,52	0,24	0,52	0,06	0,52						
		0,20	0,50	0,02	0,50						
		0,21	0,48	0,03	0,48						
		0,20	0,45	0,02	0,45						

Tablica Z.3.3.

Zestawienie obliczeniowych wielkości amplitudy oscylacji  $\Delta T$  temperatury skraplania  
w odniesieniu do uzyskanych prędkości niestabilności temperaturowych  $v_T$

d <sub>h</sub> = 3,30 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT
4,98	0,72	5,79	0,44	5,74	0,30	5,15	0,54	4,88	0,05	5,09	1,08
4,80	0,81	5,76	0,81	5,71	0,35	5,18	1,19	4,21	1,10	5,10	1,71
4,34	1,02	4,85	0,87	4,80	0,43	5,09	2,41	4,12	2,30	5,10	1,97
4,08	1,10	4,36	1,13	4,31	0,48	5,01	2,89	3,92	2,83	4,89	2,23
3,91	1,11	4,17	1,31	4,12	0,57	4,99	3,77	3,63	3,53	4,34	2,77
3,33	1,30	4,14	1,41	4,09	0,65	4,99	4,09	3,08	4,36	4,29	3,16
3,13	1,39	3,93	1,63	3,88	0,68	4,98	4,66	2,98	5,20	4,19	4,02
3,06	1,51	3,74	1,69	3,69	0,71	4,91	4,94	2,90	5,51	4,11	4,85
2,78	1,71	3,45	1,82	3,40	0,77	4,89	5,19	2,11	6,96	3,32	5,21
2,62	1,80	3,34	1,97	3,29	0,79	4,88	5,74	1,99	8,30	3,20	6,86
2,42	1,85	3,07	2,05	3,02	0,86	4,89	6,30	1,92	10,18	3,13	7,57
2,38	2,04	2,92	2,10	2,87	0,89	4,88	7,43	1,89	11,20	3,10	7,97
2,21	2,20	2,83	2,15	2,78	0,90	4,88	7,98	1,77	11,91	2,98	8,55
2,13	2,23	2,77	2,29	2,72	0,92	4,88	8,32	1,11	12,14	2,32	9,45
2,07	2,51	2,57	2,39	2,52	0,98	4,87	9,70			2,32	10,39
1,99	2,63	2,34	2,48	2,29	1,04	4,83	9,99			2,31	10,80
1,78	2,88	2,14	2,57	2,09	1,12	4,80	10,63			2,28	11,73
1,71	2,95	1,97	2,80	1,92	1,16	4,66	11,62				
1,68	3,00	1,86	2,86	1,81	1,18	4,53	12,63				
1,61	3,17	1,76	2,90	1,71	1,34	4,57	13,29				
1,56	3,26	1,73	3,13	1,68	1,47	4,44	13,34				
		1,54	3,23	1,49	1,51	4,10	13,63				
		1,54	3,27	1,49	1,55						
		1,43	3,30	1,38	1,59						
		1,47	3,36	1,42	1,62						
		1,34	3,40	1,29	1,70						
		1,32	3,41	1,27	1,74						
		1,27	3,55	1,22	1,76						
		1,16	3,68	1,11	1,82						
		1,09	3,73	1,04	1,87						
		0,94	3,77	0,89	1,92						
		0,97	3,83	0,92	1,97						
		0,87	3,87	0,82	2,00						
		0,76	4,03	0,71	2,05						
		0,73	4,07	0,68	2,14						
		0,66	4,11	0,61	2,18						
		0,64	4,13	0,59	2,23						
		0,61	4,22	0,56	2,32						
		0,60	4,31	0,55	2,32						

Tablica Z.3.2. c.d.

d <sub>h</sub> = 2,30 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT
4,61	0,45	4,52	0,51	4,26	0,35	4,94	1,39	3,87	0,55	4,90	0,81
4,59	0,69	4,63	0,81	4,37	0,39	4,93	1,75	3,88	1,11	4,91	1,14
4,16	0,87	4,49	0,87	4,23	0,40	4,91	2,01	3,92	2,24	4,95	2,28
4,03	1,10	4,28	1,14	4,02	0,48	4,87	2,25	3,71	2,83	4,74	2,85
3,48	1,16	3,62	1,33	3,36	0,51	4,77	2,40	3,21	3,70	4,24	4,05
3,22	1,47	3,51	1,42	3,25	0,66	4,69	3,03	2,99	4,90	4,02	4,85
3,09	1,53	3,37	1,52	3,11	0,78	4,62	4,06	2,38	5,51	3,41	5,39
3,01	1,74	3,05	1,56	2,79	0,79	4,51	4,37	2,32	7,01	3,35	6,36
2,57	1,85	2,84	1,61	2,58	0,92	4,45	4,66	2,29	7,73	3,32	7,27
2,33	1,87	2,72	1,68	2,46	1,05	4,31	5,15	2,29	8,30	3,32	7,59
2,21	2,03	2,61	1,84	2,35	1,17	4,09	5,28	1,90	8,93	2,93	8,19
2,18	2,11	2,37	1,93	2,11	1,19	3,48	5,58	1,81	9,65	2,84	9,53
2,11	2,21	2,42	1,98	2,16	1,23	3,17	6,53	1,71	10,61	2,74	10,19
1,96	2,31	2,08	2,04	1,82	1,38	3,01	7,43	1,65	11,20	2,68	10,77
1,91	2,53	1,93	2,09	1,67	1,47	2,97	7,69	1,23	13,19	2,26	12,14
1,88	2,59	1,88	2,17	1,62	1,55	2,57	8,09	1,20	13,59	2,23	13,30
1,71	2,62	1,73	2,23	1,47	1,58	2,12	8,82			2,22	13,96
1,69	2,77	1,68	2,38	1,42	1,60	2,02	9,34				
1,71	2,97	1,67	2,44	1,41	1,63	1,92	10,67				
1,65	3,00	1,65	2,46	1,39	1,65	1,78	11,78				
1,41	3,28	1,64	2,50	1,38	1,77	1,61	13,30				
		1,65	2,61	1,39	0,59	1,52	13,82				
		1,62	2,69	1,36	0,66						
		1,60	2,83	1,34	0,67						
		1,61	2,92	1,35	0,74						
		1,61	2,93	1,35	0,77						
		1,61	2,95	1,35	0,84						
		1,60	2,97	1,34	0,90						
		1,60	2,97	1,34	0,98						
		1,59	3,02	1,33	1,17						
		1,58	3,06	1,32	1,22						
		1,55	3,11	1,29	1,24						
		1,56	3,16	1,30	1,34						
		1,52	3,25	1,26	1,41						
		1,52	3,33	1,26	1,54						
		1,46	3,35	1,20	1,67						
		1,46	3,32	1,20	1,73						
		1,43	3,35	1,17	1,57						
		1,33	3,40	1,07	1,67						

Tablica Z.3.2. c.d.

d <sub>h</sub> = 1,92 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT
4,48	0,69	3,76	0,74	4,47	0,70	4,89	1,16	3,29	0,54	4,48	0,30
4,32	0,81	3,87	0,81	4,51	0,73	4,72	2,45	3,30	1,22	4,48	1,66
4,01	0,83	3,73	0,91	4,55	0,86	4,70	2,97	3,34	2,01	4,53	2,51
3,97	1,18	3,52	1,04	4,38	0,91	4,72	4,31	3,13	2,27	4,32	2,81
3,14	1,35	2,86	1,22	3,69	0,95	4,68	5,21	2,63	2,83	3,82	3,73
3,01	1,52	2,75	1,24	3,57	0,99	4,58	5,29	2,41	3,19	3,59	4,85
2,91	1,76	2,61	1,51	3,38	1,13	4,42	5,95	1,80	4,05	2,99	5,20
2,51	1,96	2,29	1,65	3,25	1,16	4,21	6,56	1,74	4,36	2,93	5,75
2,31	2,17	2,08	1,79	3,08	1,20	4,11	7,38	1,71	5,18	2,90	7,02
2,20	2,22	1,96	1,84	2,77	1,22	4,01	7,99	1,71	5,29	2,90	7,27
2,18	2,47	1,85	1,96	2,74	1,39	3,57	8,07	1,32	5,88	2,51	7,32
2,01	2,59	1,61	2,05	2,58	1,55	3,02	9,02	1,23	7,13	2,42	7,60
1,97	2,75	1,66	2,11	2,44	1,57	2,57	10,01	1,13	7,98	2,32	7,85
1,91	2,84	1,32	2,24	2,33	1,60	2,31	10,89	1,07	8,61	2,26	8,49
1,78	2,96	1,17	2,37	2,17	1,61	2,25	11,25	0,65	10,21	1,84	9,12
1,71	3,08	1,12	2,44	2,07	1,83	2,11	11,72	0,62	10,87	1,81	10,12
1,66	3,32	0,97	2,52	2,05	1,91	2,03	12,30	0,56	11,19	1,74	10,68
1,49	3,50	0,92	2,57	1,98	1,93	1,97	12,99			1,75	11,34
1,41	3,68	0,91	2,67	1,91	1,97	1,92	13,89				
1,39	3,76	0,89	2,72	1,89	1,99	1,78	14,27				
1,41	3,98	0,88	2,85	1,84	2,05	1,71	15,39				
1,31	4,30	0,89	2,90	1,77	2,10	1,64	15,61				
		0,86	3,04	1,71	2,19						
		0,84	3,16	1,65	2,31						
		0,85	3,23	1,58	2,35						
		0,85	3,30	1,55	2,40						
		0,85	3,33	1,54	2,63						
		0,84	3,37	1,55	2,74						
		0,84	3,46	1,53	2,76						
		0,83	3,55	1,47	2,79						
		0,82	3,69	1,46	2,86						
		0,79	3,71	1,36	3,02						
		0,80	3,79	1,38	3,06						
		0,76	3,88	1,31	3,10						
		0,76	4,02	1,27	3,11						
		0,70	4,14	1,25	3,13						
		0,70	4,26	1,23	3,21						
		0,67	4,32	1,11	3,38						
		0,57	4,58	1,01	3,52						

Tablica Z.3.2. c.d.

d <sub>h</sub> = 1,44 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT
4,26	0,16	3,51	0,27	3,39	0,71	4,57	0,67	2,89	0,55	4,39	0,62
4,11	0,50	3,68	0,33	3,56	0,73	4,51	1,09	2,87	1,39	4,37	1,14
3,66	0,70	3,01	0,42	2,89	0,79	4,49	2,25	2,89	2,25	4,38	1,71
3,55	0,74	2,86	0,60	2,78	0,96	4,48	2,51	2,43	2,78	3,93	2,49
2,98	0,75	2,49	0,70	2,37	1,09	4,01	2,62	2,49	3,31	3,98	3,09
2,78	0,79	2,40	0,83	2,28	1,17	3,98	3,29	2,34	4,02	3,84	4,56
2,35	1,00	2,05	0,93	1,93	1,21	3,81	3,80	1,99	4,61	3,49	5,12
2,29	1,13	2,06	1,12	1,94	1,28	3,11	4,39	1,34	5,18	2,84	5,39
2,16	1,41	1,89	1,24	1,77	1,30	3,02	4,97	1,02	5,56	2,51	5,82
2,10	1,51	1,82	1,28	1,70	1,59	2,68	5,60	0,91	6,01	2,40	7,27
1,97	1,78	1,78	1,53	1,66	1,67	2,42	5,98	0,84	7,02	2,34	7,88
1,91	1,92	1,52	1,59	1,40	1,89	2,12	7,12	0,81	7,96	2,30	8,25
1,81	2,12	1,44	1,67	1,32	2,01	1,97	7,43	0,74	8,50	2,24	9,55
1,74	2,26	1,39	1,69	1,27	2,03	1,87	8,00	0,63	8,67	2,13	10,13
1,71	2,54	1,32	1,78	1,20	2,07	1,52	8,26	0,64	9,66	2,13	10,45
1,63	2,88	1,30	2,00	1,18	2,25	1,45	8,82	0,54	10,54	2,04	10,45
1,48	3,22	1,28	2,09	1,16	2,26	1,38	9,69	0,44	10,81	1,94	11,03
1,39	6,41	1,27	2,15	1,15	2,30	1,29	10,58	0,29	11,27	1,78	11,99
1,32	10,06	1,20	2,33	1,08	2,43	1,31	11,00			1,76	12,98
1,36	11,45	1,21	2,51	1,09	2,56	1,21	11,79				
1,20	14,58	1,17	2,58	1,05	2,69	1,17	12,32				
1,11	0,16	1,11	2,82	0,99	2,74	1,11	13,54				
		1,14	3,05	1,02	2,78						
		0,82	3,29	0,70	2,83						
		0,79	3,53	0,67	2,88						
		0,74	4,88	0,62	3,05						
		0,65	6,86	0,53	3,10						
		0,63	7,87	0,51	3,11						
		0,59	8,03	0,47	3,17						
		0,54	8,66	0,42	3,28						
		0,52	9,33	0,40	3,59						
		0,48	9,80	0,36	3,69						
		0,47	10,93	0,35	3,97						
		0,43	11,87	0,31	5,37						
		0,44	12,35	0,32	7,70						
		0,43	13,07	0,31	11,19						
		0,32	14,54	0,20	12,13						
		0,29	16,25	0,17	13,91						
		0,24	16,68	0,12	16,71						



Tablica Z.3.2. c.d.

d <sub>h</sub> = 1,40 mm											
R134a		R1234yf		R1234ze		R404		R507		R448A	
v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT	v <sub>T</sub> [m/s]	ΔT
4,23	0,69	3,28	0,42	3,10	1,89	4,54	1,16	2,85	1,08	4,12	1,06
4,01	0,90	3,45	0,50	3,27	1,91	4,44	1,27	2,83	1,72	4,10	1,71
3,58	1,28	2,78	0,73	2,60	1,92	4,48	1,62	2,85	2,25	4,12	2,23
3,44	1,39	2,63	0,82	2,49	1,96	4,28	2,01	2,39	2,62	3,66	2,57
2,89	1,49	2,26	0,84	2,08	2,13	3,78	2,53	2,45	2,89	3,72	3,21
2,71	1,56	2,17	0,87	1,99	2,18	3,30	2,60	2,30	3,23	3,57	3,75
2,29	1,69	1,82	1,11	1,64	2,32	3,07	3,27	1,95	4,05	3,22	4,84
2,21	1,77	1,83	1,23	1,65	2,38	2,59	3,80	1,30	4,61	2,57	5,23
2,04	1,81	1,66	1,29	1,48	2,58	2,51	4,61	0,98	4,90	2,25	7,02
2,01	1,86	1,59	1,39	1,41	2,71	2,12	4,88	0,87	5,18	2,14	7,94
1,94	1,90	1,55	1,52	1,37	2,80	2,01	5,19	0,80	5,29	2,07	9,45
1,78	1,92	1,29	1,61	1,11	3,07	1,98	5,30	0,77	5,95	2,04	10,13
1,78	1,95	1,21	1,70	1,03	3,20	1,91	5,58	0,70	6,54	1,97	10,71
1,63	2,31	1,16	1,80	0,98	3,29	1,75	5,91	0,59	7,09	1,86	11,08
1,54	2,56	1,09	1,85	0,91	3,47	1,69	6,25	0,60	7,96	1,87	12,05
1,58	2,78	1,07	1,96	0,89	3,65	1,52	6,56	0,50	8,05	1,77	13,30
1,41	2,86	1,05	2,02	0,87	3,78	1,47	7,06	0,40	8,62	1,67	13,63
1,41	3,07	1,04	2,07	0,86	3,95	1,41	7,38	0,25	9,58	1,52	14,02
1,38	3,36	0,97	2,17	0,79	4,01	1,31	7,75	0,23	10,26	1,23	15,02
1,22	3,49	0,98	2,40	0,80	4,03	1,22	8,07			1,53	16,31
1,18	3,74	0,94	2,48	0,76	4,07	1,18	8,70				
1,15	3,82	0,88	3,40	0,70	4,28	1,15	9,10				
1,01	6,40	0,91	3,49	0,73	4,46						
0,99	10,35	0,59	3,63	0,41	4,70						
1,01	11,16	0,56	3,68	0,38	5,32						
0,95	11,71	0,51	3,79	0,33	7,24						
0,94	14,46	0,42	4,20	0,24	8,51						
0,78	18,26	0,40	6,61	0,22	8,61						
0,69	19,61	0,36	8,17	0,18	12,90						
0,58	20,40	0,31	11,14	0,13	16,93						
0,59	23,19	0,29	14,45	0,11	17,97						
0,55	24,90	0,25	17,06	0,07	19,24						
		0,24	18,81	0,06	22,29						
		0,20	19,56	0,02	24,86						
		0,21	19,55	0,03	27,28						
		0,20	23,12	0,02	28,51						



## **ZAŁĄCZNIK NR 4**

### **ANALIZA WYMIAROWA**

**OPRACOWANIE ZALEŻNOŚCI EKSPERYMENTALNYCH  
OPISUJĄCYCH PRĘDKOŚĆ PRZEMIESZCZANIA SIĘ SYGNAŁU  
ZMIANY CIŚNIENIA I SYGNAŁU ZMIANY TEMPERATURY**



Załącznik 4 zawiera analizę wymiarową bezwymiarowych zależności prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych i temperaturowych



W celu wyprowadzenia zależności opisującej prędkość  $v_p$  przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia i sygnału zmiany temperatury  $v_T$  w postaci równań wykorzystano procedury analizy wymiarowej, z uwzględnieniem teorematu  $\Pi$ -*Buckinghama*. Zakłada on, że liczba modułów bezwymiarowych równa się liczbie niezależnych parametrów fizycznych pomniejszonych o liczbę wymiarów podstawowych, takich jak: metr, sekunda, kilogram, Kelwin itp. [86,121].

Sygnał zmiany ciśnienia  $v_p$  uzależniono od następujących parametrów:

$$v_p = f(\Delta p, \rho_k, v', d, w, \varphi) \quad (\text{Z.4.1})$$

W tabelicy Z.1 przedstawiono zależności wymiarowe wielkości uwzględnionych w opisie prędkości  $v_p$  sygnału zmiany ciśnienia.

Tabela Z.4.1

Zależności wymiarowe parametrów opisujących prędkości sygnału zmiany ciśnienia  $v_p$

Wielkość	Jednostki SI			Zależność
	[kg]	[m]	[s]	
$v_p$	0	1	-1	Liczba funkcyjna
$\Delta p$	1	-1	-2	$\Pi_1$
$\rho_k$	1	-1	-2	Zmienna niezależna
$v'$	0	2	-1	Zmienna niezależna
$d$	0	1	0	Zmienna niezależna
$w$	0	1	-1	$\Pi_2$
$\varphi$	0	0	0	bezwymiarowa

Przyjęto, jako zmienne niezależne parametry  $\rho_k$ ,  $v'$ ,  $d$  dla których wyznacznik z miar jest różny od zera:

$$\det \begin{bmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = 1 \quad (\text{Z.4.2})$$

Wyznaczono na tej podstawie bezwymiarowe liczby  $\Pi_1$  i  $\Pi_2$ .

Funkcja zależności  $\Pi_1$ :

$$\Delta p = \Pi_1 \rho_k^{a_{11}} v'^{a_{12}} d^{a_{13}} \quad (\text{Z.4.3})$$

Równania na podstawie miar:

$$[kg^1 m^{-1} s^{-2}] = [kg^1 m^{-1} s^{-2}]^{a_{11}} \cdot [kg^0 m^2 s^{-1}]^{a_{12}} \cdot [kg^0 m^1 s^0]^{a_{13}}, \quad (Z.4.4)$$

$$kg : 1 = 1 \cdot a_{11} + 0 \cdot a_{12} + 0 \cdot a_{13}, \quad (Z.4.5)$$

$$m : -1 = -1 \cdot a_{11} + 2 \cdot a_{12} + 1 \cdot a_{13}, \quad (Z.4.6)$$

$$s : -2 = -2 \cdot a_{11} - 1 \cdot a_{12} + 0 \cdot a_{13}. \quad (Z.4.7)$$

Z rozwiązania podanego wyżej układu równań uzyskano:  $a_{11} = 1$ ,  $a_{12} = 0$ ,  $a_{13} = 0$ , w związku, z czym liczba  $\Pi_1$  przyjmuje postać:

$$\Delta p^+ = \Pi_1 \rho_k^1 v^0 d^0 \Rightarrow \Pi_1 = \frac{\Delta p}{\rho_k}. \quad (Z.4.8)$$

Funkcja zależności  $\Pi_2$ :

$$w = \Pi_1 \rho_k^{a_{21}} v^{a_{22}} d^{a_{23}} \quad (Z.4.9)$$

Równania na podstawie miar:

$$[kg^0 m^1 s^{-1}] = [kg^1 m^{-1} s^{-2}]^{a_{21}} \cdot [kg^0 m^2 s^{-1}]^{a_{22}} \cdot [kg^0 m^1 s^0]^{a_{23}} \quad (Z.4.10)$$

$$kg : 0 = 1 \cdot a_{21} + 0 \cdot a_{22} + 0 \cdot a_{23}, \quad (Z.4.11)$$

$$m : 1 = -1 \cdot a_{21} + 2 \cdot a_{22} + 1 \cdot a_{23}, \quad (Z.4.12)$$

$$s : -1 = -2 \cdot a_{21} - 1 \cdot a_{22} + 0 \cdot a_{23}. \quad (Z.4.13)$$

Rozwiązanie układu równań:  $a_{21} = 0$ ,  $a_{22} = 1$ ,  $a_{23} = -1$ , liczba  $\Pi_2$  przyjmuje postać:

$$w = \Pi_2 \rho_k^0 v^1 d^{-1} \Rightarrow \Pi_2 = \frac{w}{\eta \cdot \frac{1}{\rho}} = \frac{w \rho \cdot d}{\eta} = Re_{TPF}. \quad (Z.4.14)$$

Wyznaczenie bezwymiarowej zależności funkcyjnej prędkość przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia  $v_p$ :

$$v_p = f(\Pi_1 \cdot \Pi_2) \rho_k^{b_1} \cdot v^{b_2} \cdot d^{b_3}, \quad (Z.4.15)$$

$$[kg^0 m^1 s^{-1}] = [kg^1 m^{-1} s^{-2}]^{b_1} \cdot [kg^0 m^2 s^{-1}]^{b_2} \cdot [kg^0 m^1 s^0]^{b_3}, \quad (Z.4.16)$$

$$kg : 0 = 1 \cdot b_1 + 0 \cdot b_2 + 0 \cdot b_3, \quad (Z.4.17)$$

$$m : 1 = -1 \cdot b_1 + 2 \cdot b_2 + 1 \cdot b_3, \quad (Z.4.18)$$

$$s : -1 = -2 \cdot b_1 - 1 \cdot b_2 + 0 \cdot b_3. \quad (Z.4.19)$$

Rozwiązanie układu równań:  $b_1 = 0$ ,  $b_2 = 1$ ,  $b_3 = -1$ ,

$$v_p = f(\Pi_1 \cdot \Pi_2) \rho_k^0 \cdot v^1 \cdot d^{-1}. \quad (Z.4.20)$$



Przemieszczanie się niestabilności ciśnieniowych  $v_p$  jest funkcyjnie zależna również od bezwymiarowej wartości stopnia zapełnienia  $\varphi$ . W związku z powyższym uzyskuje ona następującą postać funkcyjną:

$$\frac{V_p}{W} = C \cdot \Pi_1^a \cdot \Pi_2^b \cdot \varphi^c, \quad (\text{Z.4.21})$$

$$\frac{V_p}{W} = C \cdot \left( \frac{w\rho \cdot d}{\eta} \right)^a \cdot \left( \frac{\Delta p}{\rho_k} \right)^b \cdot \varphi^c. \quad (\text{Z.4.22})$$

Ostateczna postać równania:

$$v_p^+ = C \cdot \text{Re}_{TPF}^a \cdot (\Delta p^+)^b \cdot \varphi^c. \quad (\text{Z.4.23})$$

Współczynniki równania dla poszczególnych czynników chłodniczych uzyskano za pomocą metody regresji nieliniowej wykorzystując program *Statistica*, oraz procedury *quasi-Newtona* i *Symplex* zaimplementowane w tym programie. Wyniki przedstawiono w rozdziale 6.

Sygnal zmiany temperatury  $v_T$  uzależniono od funkcji zależnej od parametrów:

$$v_T = f(\Delta T, T_k, v', d, w, \varphi). \quad (\text{Z.4.24})$$

W tabelicy Z.2 przedstawiono zależności wymiarowe wielkości uwzględnionych w opisie prędkości sygnału zmiany temperatury  $v_T$ .

Tabela Z.4.2

Parametry wymiarowe opisujących prędkości sygnału zmiany temperatury  $v_T$

Wielkość	Jednostki SI			Zależność
	[K]	[m]	[s]	
$v_T$	0	1	-1	Liczba funkcyjna
$\Delta T$	1	0	0	$\Pi_1$
$T_k$	1	0	0	Zmienna niezależna
$v'$	0	2	-1	Zmienna niezależna
$d$	0	1	0	Zmienna niezależna
$w$	0	1	-1	$\Pi_2$
$Ta$	0	0	0	bezwymiarowa

Przyjęto, jako zmienne niezależne parametry  $T_k$ ,  $v'$ ,  $d$ , dla których wyznacznik z miar jest różny od zera:

$$\det \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = -1. \quad (\text{Z.4.25})$$

Wyznaczono na tej podstawie bezwymiarowe liczby  $\Pi_1, \Pi_2$ .

Funkcja zależności  $\Pi_1$ :

$$\Delta T = \Pi_1 T_k^{a_{11}} v^{a_{12}} d^{a_{13}}. \quad (\text{Z.4.26})$$

Równania na podstawie miar:

$$[K^1 m^0 s^0] = [K^1 m^0 s^0]^{a_{11}} \cdot [K^0 m^2 s^{-1}]^{a_{12}} \cdot [K^0 m^1 s^0]^{a_{13}}, \quad (\text{Z.4.27})$$

$$K : 1 = 1 \cdot a_{11} + 0 \cdot a_{12} + 0 \cdot a_{13}, \quad (\text{Z.4.28})$$

$$m : 0 = 0 \cdot a_{11} + 2 \cdot a_{12} + 1 \cdot a_{13}, \quad (\text{Z.4.29})$$

$$s : 0 = 0 \cdot a_{11} - 1 \cdot a_{12} + 0 \cdot a_{13}. \quad (\text{Z.4.30})$$

Rozwiązanie układu równań:  $a_{11} = 1, a_{12} = 0, a_{13} = 0$ , liczba  $\Pi_1$  przyjmuje postać:

$$\Delta T^+ = \Pi_1 T_k^1 v^{10} d^0 \Rightarrow \Pi_1 = \frac{\Delta T}{T_k}, \quad (\text{Z.4.31})$$

Funkcja zależności  $\Pi_2$ :

$$w = \Pi_2 T_k^{a_{21}} v^{a_{22}} d^{a_{23}}, \quad (\text{Z.4.32})$$

Równania na podstawie miar:

$$[K^0 m^1 s^{-1}] = [K^1 m^0 s^0]^{a_{21}} \cdot [K^0 m^2 s^{-1}]^{a_{22}} \cdot [K^0 m^1 s^0]^{a_{23}}, \quad (\text{Z.4.31})$$

$$K : 0 = 1 \cdot a_{21} + 0 \cdot a_{22} + 0 \cdot a_{23}, \quad (\text{Z.4.33})$$

$$m : 1 = 0 \cdot a_{21} + 2 \cdot a_{22} + 1 \cdot a_{23}, \quad (\text{Z.4.34})$$

$$s : -1 = 0 \cdot a_{21} - 1 \cdot a_{22} + 0 \cdot a_{23}. \quad (\text{Z.4.35})$$

Rozwiązanie układu równań:  $a_{21} = 0, a_{22} = 1, a_{23} = -1$ , liczba  $\Pi_2$  przyjmuje postać:

$$w = \Pi_2 T_k^0 v^{11} d^{-1} \Rightarrow \Pi_2 = \frac{w}{\frac{\eta}{\rho} \cdot \frac{1}{d}} = \frac{w \rho \cdot d}{\eta} = \text{Re}_{TPF}. \quad (\text{Z.4.36})$$

Wyznaczenie bezwymiarowej zależności funkcyjnej prędkość przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia  $v_T$ :

$$v_T = f(\Pi_1, \Pi_2) T_k^{b_1} \cdot v^{b_2} \cdot d^{b_3}, \quad (\text{Z.4.37})$$

$$[K^0 m^1 s^{-1}] = [K^1 m^0 s^0]^{b_1} \cdot [K^0 m^2 s^{-1}]^{b_2} \cdot [K^0 m^1 s^0]^{b_3}, \quad (\text{Z.4.38})$$

$$K : 0 = 1 \cdot b_1 + 0 \cdot b_2 + 0 \cdot b_3, \quad (\text{Z.4.39})$$

$$m : 1 = 0 \cdot b_1 + 2 \cdot b_2 + 1 \cdot b_3, \quad (\text{Z.4.40})$$

$$s : -1 = 0 \cdot b_1 - 1 \cdot b_2 + 0 \cdot b_3. \quad (\text{Z.4.41})$$

Rozwiązanie układu równań:  $b_1 = 0$ ,  $b_2 = 1$ ,  $b_3 = -1$ ,

$$v_T = f(\Pi_1 \cdot \Pi_2) T_k^0 \cdot v^1 \cdot d^{-1}. \quad (\text{Z.4.42})$$

Postać liczby bezwymiarowej opisującej prędkość przemieszczania się sygnału zmiany temperatury  $v_T$ :

$$\frac{v_T}{w} = C \cdot \Pi_1^a \cdot \Pi_2^b \cdot \varphi^c, \quad (\text{Z.4.43})$$

$$\frac{v_T}{w} = C \cdot \left( \frac{w \rho \cdot d}{\eta} \right)^a \cdot \left( \frac{\Delta T}{T_k} \right)^b \cdot \varphi^c. \quad (\text{Z.4.44})$$

Ostateczna postać równania:

$$v_T^+ = C \cdot \text{Re}_{TPF}^a \cdot (\Delta T^+)^b \cdot \varphi^c. \quad (\text{Z.4.45})$$

Współczynniki powyższego równania dla poszczególnych czynników chłodniczych, które rozpatrywano w rozdziale 6 uzyskano za pomocą metody regresji nieliniowej wykorzystując program *Statistica*, oraz procedury *quasi-Newtona* *Symplex* zaimplementowane w tym programie.



**ZAŁĄCZNIK nr 5**

**OCENA BŁĘDÓW POMIAROWYCH**



W pomiarach eksperymentalnych ośrodków jednofazowych, a zwłaszcza w badaniach przepływów dwufazowych (mieszaniny) bardzo trudno jest uzyskać wielokrotnie takie same parametry początkowe stanu ustalonego układu (tzw. wejściowe). W analizie obliczeniowej przyjmuje się zwykle wartości średnie parametrów opisujących dany stan układu. Bardzo ważne jest określenie liczby pomiarów, dla której można poprawnie zdefiniować niedokładności wykonanych badań. Istotne jest uwzględnienie niepewności aparatury pomiarowej. Określa się tzw. niepewność całkowitą, w której zawarta jest klasa dokładności stosowanej aparatury.

Na przykładzie eksperymentalnego określenia prędkości  $v_P$  przemieszczania się sygnału zmiany (oscylacji) ciśnienia oraz prędkości  $v_T$  przemieszczania się sygnału zmiany temperatury (*frontu skraplania*) w minikanale rurowym przedstawiono procedurę określenia niepewności pomiarowych. Pojedyncze wartości  $v_{Pi}$  i  $v_{Ti}$  charakteryzowały się zauważalnym „rozrzutem” od wartości średnich  $\bar{v}_P$  i  $\bar{v}_T$ , czyli *odchyleniem standardowym*.

Określenie prędkości przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia i temperatury związane było z ustaleniem (w warunkach dynamicznych zakłóceń generowanych periodycznie) czasu  $\tau$ , w jakim przemieszczają się zmiany sygnału ciśnienia i temperatury na długości minikanalu rurowego. Uwzględniając doświadczenie autorów [82,85,86,123], na potrzeby estymacji punktowej dla posiadanych wyników pomiarów wprowadzono następujące wielkości:

- wartość średnia:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (\text{Z.5.1})$$

- odchylenie standardowe:

$$\bar{S}_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (\text{Z.5.2})$$

które odpowiada niepewności typu A ( $u_A$ ).

Dla założonego prawdopodobieństwa  $P = 0,9$  przyjęto, że dokładność  $q_\alpha$  zdefiniowana jako bezwzględne odchylenie średnie dla liczby  $n$  pomiarów i wielkości  $\Delta\tau_p$  oraz  $\Delta\tau_T$  nie przekroczy  $q_\alpha = 0,4$  wartości odchylenia standardowego  $\bar{S}_x$ . Wielkość  $q_\alpha$  zdefiniowano następująco [86]:

$$q_\alpha \stackrel{\text{def}}{=} \frac{t_\alpha}{\sqrt{n}}, \quad (\text{Z.5.3})$$

gdzie:

$$t_{\alpha} = \frac{\bar{x} - x_i}{S_{\bar{x}}} \sqrt{n}. \quad (\text{Z.5.4})$$

Korzystając z tablic [86,123] określono, że dla poziomu istotności  $\alpha = 1 - P = 0,1$  oraz  $q_{\alpha} = 0,4$  liczba pomiarów nie może być mniejsza, niż  $n = 19$ . Stosując się do tej zasady ustalono, że liczba pomiarów, czyli ilość wartości przesunięcia czasowego dla  $\Delta\tau$  dla każdej częstotliwości, będzie wynosić  $19 < n < 120$  dla każdego z badanych minikanatów.

Do oszacowania niepewności aparatury pomiarowej, wyrażonej za pomocą niepewności typu  $B$ , wykorzystano charakterystykę oprzyrządowania:

$$u_B = \frac{\Delta_g}{\sqrt{3}}, \quad (\text{Z.5.5})$$

gdzie  $\Delta_g$  jest wartością graniczną błędu, określoną na podstawie klasy dokładności przyrządu ( $K$ ) oraz zakresu pomiarowego ( $Z$ ) z wyrażenia:

$$\Delta_g = \frac{Z \cdot K}{100}. \quad (\text{Z.5.6})$$

Do oceny niepewności całkowitej w pomiarach bezpośrednich wykorzystano niepewności standardowe typu  $A$  i  $B$ , korzystając z następującej formuły:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (\text{Z.5.7})$$

Błąd bezwzględny  $\Delta y$  wielkości określonych pośrednio  $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  będzie obliczany według wzoru:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3} \Delta x_3\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2}, \quad (\text{Z.5.8})$$

gdzie  $\Delta x = u$ , natomiast błąd względny wyznaczono z zależności:

$$\delta y = \frac{\Delta y}{y} \cdot 100\%. \quad (\text{Z.5.9})$$

W przypadku pomiaru ciśnienia (do ustalenia przesunięcia czasowego), zastosowano kartę pomiarową o częstotliwości próbkowania  $10^6$  Hz. Biorąc jednak pod uwagę szereg ograniczeń wynikających z możliwości technicznych stanowiska, częstotliwość pomiarów ograniczono do  $10^3$  Hz, co uznano, jako zadowalające.

Sposób obliczania niepewności całkowitej pokazano na poniższym przykładzie. Do pomiaru ciśnienia użyto czujników piezoelektryczne firmy *Endress Hauser*



o klasie dokładności  $k = 0,5$  i zakresie  $Z = 0 \div 1,6$  MPa. Niepewność standardową wykonanych pomiarów  $u_A$  przyjęto na poziomie 0,8 kPa:

$$u_p = \sqrt{800^2 + \left(\frac{0,5 \cdot 1600000}{100 \cdot \sqrt{3}}\right)^2} = 4688 \text{ Pa.} \quad (\text{Z.5.10})$$

Analogicznie wyznaczono pozostałe wartości:

- dla przepływomierza typu *Coriolis Mass Flow Endress Hauser*:

$$u_{\dot{m}} = \sqrt{0,01^2 + \left(\frac{0,5 \cdot 5}{100 \cdot \sqrt{3}}\right)^2} = 0,0176 \frac{\text{kg}}{\text{h}}, \quad (\text{Z.5.11})$$

- dla czujników temperatury typu *K*:

$$u_T = \sqrt{0,1^2 + \left(\frac{0,1 \cdot 1000}{100 \cdot \sqrt{3}}\right)^2} = 0,59 \text{ K.} \quad (\text{Z.5.12})$$

W analizie pomiarów określono również niepewności:

- różnicy ciśnienia  $\Delta p$  czynnika chłodniczego,
- prędkości przemieszczania się sygnałów zmiany ciśnienia  $v_p$  i temperatury  $v_T$ ,
- strumienia masy czynnika  $G$  w warunkach zaburzeń periodycznych.

Niepewność pomiaru spadku ciśnienia skraplania  $\Delta p$  w warunkach zaburzeń periodycznych wyznaczono następująco:

$$\Delta p_s = p_1 - p_2, \quad (\text{Z.5.13})$$

gdzie:

$p_1$  – pomiar ciśnienia na dopływie czynnika do minikanalu [MPa],

$p_2$  – pomiar ciśnienia na granicy strefy skraplania właściwego [MPa],

$\Delta(\Delta p)$  – błąd bezwzględny wyznaczenia różnicy ciśnień  $\Delta p$ :

$$\Delta(\Delta p_{sp}) = \sqrt{(\Delta p_1)^2 + (\Delta p_2)^2} = \sqrt{2} \cdot 4688 \text{ Pa} = 6629 \text{ Pa.} \quad (\text{Z.5.14})$$

Maksymalny błąd bezwzględny pomiaru różnicy ciśnienia wnosi  $\Delta(\Delta p) = 6629 \text{ Pa}$ .

Niepewność określenia prędkości przemieszczania się sygnału zmiany ciśnienia  $v_p$  i temperatury  $v_T$ :

$$v = \frac{l}{\Delta \tau}, \quad (\text{Z.5.15})$$

gdzie:

$l$  – odległość pomiędzy czujnikami,

$\Delta \tau$  – różnica czasu pomiędzy zmierzonymi wartościami ciśnienia i temperatury rejestrowanymi przez czujniki znajdujące się w odległości  $l$ ;

- błąd względny wynosi:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta t}{t} = \frac{1}{110} + \frac{1}{30} = 4,2\%. \quad (\text{Z.5.16})$$

Maksymalna wartość błędu względnego określenia prędkości przemieszczania się sygnałów  $v_p$  i  $v_T$  wynosi 4,2% wielkości obliczonej.

Gęstość strumienia masy czynnika  $G$  w warunkach stacjonarnych i zaburzeń periodycznych oblicza się z zależności:

$$G = \frac{\dot{m}}{A}, \quad (\text{Z.5.17})$$

$\dot{m}$  – masowe natężenie przepływu [kg/h],

$A$  – pole przekroju kanału rurowego [m<sup>2</sup>],

zaś błąd bezwzględny pomiaru gęstości strumienia masy opisany jest wzorem:

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} + \frac{\Delta A}{A} = \frac{0,0176}{1,85} + \frac{0,1}{1,54} = 7,4\%. \quad (\text{Z.5.18})$$

Maksymalny błąd względny  $G$  wynosi 7,4% dla badanych minikanatów w zakresie średnicy wewnętrznej: 1,40 ÷ 3,30 [mm]. W tabelicy Z.5.1 podano zestawienie obliczonych wartości błędów pomiarowych w prezentowanym przykładzie.

Tabela Z.5.1

Zestawienie błędów pomiarowych

Wielkości wyznaczone eksperymentalnie	Niepewność standardowa pomiaru
Ciśnienie $p$	$\Delta p = \sqrt{800^2 + \left(\frac{0,5 \cdot 1600000}{100 \cdot \sqrt{3}}\right)^2} = 4688 \text{ Pa}$
Strumień masy $\dot{m}$	$\Delta \dot{m} = \sqrt{0,01^2 + \left(\frac{0,5 \cdot 5}{100 \cdot \sqrt{3}}\right)^2} = 0,0176 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$
Temperatura $T$	$\Delta T = \sqrt{0,1^2 + \left(\frac{0,1 \cdot 1000}{100 \cdot \sqrt{3}}\right)^2} = 0,59 \text{ K}$
Pole przekroju kanału $A$	$\Delta A = 0,0000001 \text{ [m}^2\text{]}$
Odległość pomiędzy czujnikami	$\Delta l = 0,001 \text{ [m]}$
Wielkości wyznaczone pośrednio	Obliczony błąd maksymalny
Różnicy ciśnień $\Delta p$	$\Delta(\Delta p) = 6629 \text{ Pa}$
Prędkość przemieszczania się sygnały zmiany ciśnienia $v_p$ i temperatury $v_T$ ,	$\frac{\Delta v}{v} = 4,2\%$
Strumień masy czynnika ( $w_p$ )	$\Delta(G) = \pm 0,0022 \div 0,00042 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$

Aleksander Denis

**Badanie niestabilności dynamicznych skraplania proekologicznych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych**

(Streszczenie)

Niniejsza rozprawa doktorska pod tytułem *Badanie niestabilności dynamicznych skraplania proekologicznych czynników chłodniczych w minikanalach rurowych* skupia się na podobieństwach i różnicach pomiędzy czynnikami chłodniczymi wycofywanymi obecnie z użytkowania oraz ich zamiennikami. Czynnik chłodniczy R134a, szeroko stosowany jako czynnik roboczy w pompach ciepła, małych klimatyzatorach oraz innych małych urządzeniach chłodniczych jak lodówki, w najbliższym czasie zostanie zastąpiony przez czynniki chłodnicze nowej generacji R1234yf oraz R1234ze. Czynnik chłodniczy R404A, powszechnie stosowany w dużych instalacjach chłodniczych i klimatyzacyjnych, zostanie zastąpiony przejściowo przez R507, a docelowo przez R448A. Wymienione czynniki chłodnicze oraz ich zamienniki posiadają zbliżone właściwości termodynamiczne, jednakże, ze względów bezpieczeństwa zasadnym jest przebadanie nowych czynników pod względem ich zachowania w warunkach niestabilnych.

Literatura przedmiotu przedstawia oraz wyjaśnia wiele różnych niestabilności, jednak autor pracy skupia się tylko na dwóch niestabilnościach dyspersyjnych: propagacji *fali akustycznej* z prędkością  $v_p$  oraz propagacji *frontu skraplania* z prędkością  $v_T$ . Obie niestabilności były wywoływane przy pomocy programowalnego zaworu odcinającego, aby ustalić zależność prędkości  $v_p$  oraz  $v_T$  od częstotliwości pracy zaworu.

Rozprawa składa się z 8 rozdziałów. Rozdział 1 zawiera wstęp na temat aktualnych trendów w energetyce oraz sektorze chłodnictwa: miniaturyzacja, zmniejszenie oddziaływania na środowisko oraz ilości czynników chłodniczych w instalacjach. Rozdział 2 odnosi się to przeszłych, teraźniejszych oraz przyszłych substancji stosowanych w obiegach lewobieżnych. Rozdział 3 zajmuje się przebiegiem przemiany skraplania oraz towarzyszącymi mu niestabilnościami. Rozdział 4 ma charakter formalny i wskazuje uzasadnienie podjęcia badań, hipotezę oraz cel rozprawy. Rozdział 5 skupia się na stanowisku badawczym oraz metodologii badań eksperymentalnych, natomiast rozdział 6 obejmuje zbiorcze zestawienie wyników badań. Rozdział 7 opisuje modelowanie fizyczne oparte na analizie wymiarowej, a ostatni rozdział zamyka i podsumowuje całą rozprawę.

Rozprawa zawiera również 5 załączników: wykaz parametrów czynników chłodniczych, dane eksperymentalne dla niestabilności ciśnieniowych, dane eksperymentalne dla niestabilności temperaturowych, procedura analizy wymiarowej oraz analiza niepewności pomiarów.



---

**Aleksander Denis**

**Research the instability of dynamic condensation of environmentally friendly refrigerants in pipe minichannels**

(Abstract)

The following dissertation, entitled *Experimental research on dynamic instabilities during condensation of pro-ecological refrigerants inside tubular minichannels*, focuses on similarities and differences between refrigerants currently being phased out and their substitutes. The R134a refrigerant, a very popular working fluid of heat pumps systems, individual air conditioning systems and other small appliances like fridges, will soon be replaced by R1234yf and R1234ze. The R404A refrigerant, commonly used for industrial purposes like large refrigeration systems and collective air conditioning systems, will be replaced by R507 and R448A. The refrigerants have similar thermodynamic properties, however, for the safety purposes it is vital to investigate their behaviour while working under unstable conditions.

In the literature, there are plenty of identified and well explained instabilities, nonetheless, the following dissertation focuses only on two types of dispersive instabilities: the propagation of an *acoustic wave with velocity  $v_p$*  and the propagation of a *condensation front* with velocity  $v_T$ . Both instabilities were induced using programmable cut-off valve in order to establish how the *and  $v_T$*  velocities depends on the frequency of valve operation.

The dissertation consist of 8 chapters. Chapter 1 contains a brief foreword about current trends in power industry and its refrigeration sector like miniaturization and lowering both refrigerants charge and their environmental impact. Chapter 2 refers to past, present and the future substances used as working fluids for refrigeration cycles. Chapter 3 covers the course of the condensation and the influence of various instabilities on the process. Chapter 4 is rather formal and lays out the justification for research, hypothesis and the main goal of the dissertation. Chapter 5 focuses on the experimental setup and the methodology used for the research and chapter 6 comprises compiled

experimental results. Chapter 7 includes modelling based on dimensional analysis and the last chapter wraps up the entire dissertation with a summary.

The dissertation is also complemented with 5 attachments: list of refrigerant parameters, compiled data on pressure instabilities, compiled data on temperature analysis, dimensional analysis procedure and uncertainty analysis.