

Wpływ struktury przepływu na wymianę ciepła w procesie skraplania proekologicznych czynników chłodniczych w minikanalach

Influence of the flow structure on heat transfer in the condensation process of environmentally friendly refrigerants in mini-channels

MAŁGORZATA SIKORA, TADEUSZ BOHDAL

DOI 10.36119/15.2022.5.4

Podczas procesu skraplania w minikanalach następuje zmiana mechanizmów przenoszenia ciepła i masy wynikająca ze zmiany stopnia suchości x i stopnia wypełnienia ϕ , które wpływają na proces formowania się różnych struktur przepływu. Miara efektywności energetycznej procesu jest współczynnik przejmowania ciepła α , który zależy od charakteru przepływu dwufazowego. W niniejszym artykule zaprezentowano wpływ formujących się struktur przepływu dwufazowego na proces wymiany ciepła podczas procesu skraplania czynników chłodniczych w poziomych minikanalach rurowych. Badania przeprowadzono dla trzech proekologicznych czynników niskociśnieniowych HFE7000, HFE7100, Novec649, o niskich wskaźnikach ODP i GWP. Proces skraplania zachodził w minikanalach rurowych o średnicy wewnętrznej $d_h = 2,0; 1,2; 0,8; 0,5$ mm.

Słowa kluczowe: skraplanie, minikanale, struktury przepływu, wymiana ciepła, HFE7000, HFE7100, Novec649

During the condensation process in the mini-channels, the heat and mass transfer mechanisms change, resulting from the change in the vapor quality x and the void fraction ϕ , which in turn affect the process of formation of various flow structures. The measure of the energy efficiency of the process is the heat transfer coefficient α , which depends on the kind of the two-phase flow. This article presents the influence of the two-phase flow structures formed during the condensation process in horizontal pipe mini-channels on the heat transfer process. The research was carried out on three pro-ecological low-pressure refrigerants with low ODP and GWP coefficients, HFE7000, HFE7100, and Novec649. The condensation process took place in pipe mini-channels with an internal diameter of $d_h = 2.0; 1.2; 0.8; 0.5$ mm

Keywords: condensation, mini-channels, flow structures, heat transfer, HFE7000, HFE7100, Novec649

Struktury przepływu w procesie skraplania

Zagadnienia przepływu ciepła i masy mają duże znaczenie w obecnym rozwoju technologicznym. Ważną rolę odgrywają tutaj przepływy dwufazowe z wymianą ciepła. Struktury przepływowe powstające w procesie skraplania mają istotny wpływ na intensywność procesu kondensacji. Wpływa na to mając: wielkość stopnia wypełnienia ϕ , stopień suchości pary x , gęstość strumienia masy G i kształt granicy rozdziału faz. Stopień suchości pary x jest to stosunek masy pary m_v do masy całej mieszaniny ($m_v + m_l$) w całej objętości kanału:

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_l} \quad (1)$$

Stopień wypełnienia ϕ natomiast jest stosunkiem objętości zajmowanej przez

fazę parową V_v do całkowitej objętości np. kanału:

$$\phi = \frac{V_v}{V_l + V_v} \quad (2)$$

gdzie V_l jest objętością zajmowaną przez ciecz. Z tego powodu, oprócz badania wymiany ciepła lub oporów przepływu podczas procesu kondensacji w minikanalach, duże znaczenie ma obserwacja dwufazowych struktur powstających w przepływie nieadiabatyicznym. W przepływie nieadiabatyicznym bardzo ważne jest określenie zakresu wyżej wymienionych parametrów, przy których występują poszczególne struktury przepływów. Struktury dwufazowego przepływu adiabatycznego, m.in. przy przepływie wody i powietrza są najszerszej opisane w literaturze. Jednak w urządzeniach grzewczych i chłodniczych najczęściej stosuje się prze-

pływy dwufazowe nieadiabatyczne, takie jak wrzenie lub kondensacja. Ze względu na stopień trudności procesu kondensacji i jego obserwacji w minikanalach, znacznie częściej prowadzone i opisywane są wyniki badań struktur przepływowych w procesie wrzenia.

Najszerze badania dotyczące procesów kondensacji w minikanalach przeprowadzili Coleman i Garimella [1]. Zbadano kondensację czynnika chłodniczego R134a w dziewięciu minikanalach o różnych przekrojach (kołowym, kwadratowym i prostokątnym), o średnicy hydraulicznej $d_h = 1 \div 4,91$ mm i gęstości strumienia masy w zakresie $G = 50 \div 150$ kg/(m²s). Kanały były chłodzone powietrzem. Przepływ wizualizowano podczas procesu skraplania i na podstawie tych ustaleń dokonano klasyfikacji struktur przepływu i podstruktur. Obserwowano głównie

cztery struktury: pierścieniową, falową, przerywaną i rozproszoną. Zbadano również wpływ grawitacji, oddziaływań międzyfazowych i siły bezwładności. Wykazano, że zmiany stopnia suchości pary i gęstości strumienia masy wpływają na strukturę przepływu. Potwierdzono również wpływ wielkości średnicy kanału na istniejące struktury [2]. Xiao i Hrnjak [3] prowadzili badania nad kondensacją czynników chłodniczych: R134a, R1234ze, R32, R245fa i R1233zd w kanałach o średnicy hydraulicznej $d_h = 1,4 \div 6$ mm. Opisali przejście pomiędzy różnymi strukturami powstałymi w procesie skraplania. Stwierdzili, że przepływ pierścieniowy charakteryzuje się głównie obecnością napięcia powierzchniowego i sił ścinających. Wraz ze wzrostem grubości filmu kondensatu siła grawitacji osiąga wartość wyższą niż siła napięcia powierzchniowego i siły ścinające. W tym momencie przepływ zmienia się w przepływ warstwowy. Jige i in. [4] natomiast, badali skraplanie czynnika chłodniczego R32 w prostokątnych multiportach o średnicy hydraulicznej $d_h = 0,5 \div 1$ mm. Wyniki pokazują, że struktura tłokowa występuje przy niskim stopniu suchości, podczas gdy struktura pierścieniowa ma miejsce przy wysokiej wartości stopnia suchości i dużej gęstości strumienia masy.

Nema i in. [5] zaproponowali nowe granice przejścia dla poszczególnych struktur przepływowych, wykorzystując bazę danych dla kondensacji czynnika R134a w kanałach o średnicy hydraulicznej w zakresie $d_h = 1 \div 4,91$ mm i gęstości strumienia masy $G = 150 \div 750$ kg/(m²s). Tym samym wykazali wpływ średnicy kanału i wymiany ciepła na występowanie niektórych struktur przepływowych, porównując go z przepływem adiabatycznym, dwufazowym powietrzno-wodnym w podobnych warunkach. W przypadku przepływu adiabatycznego nie zaobserwowano występowania struktur „dyskretne falowej” i „falowo-dyspersyjnej”, ale granice poszczególnych struktur różniły się istotnie w obu przypadkach. Podobnie jest z wpływem średnicy kanału na zasięg występowania poszczególnych struktur. Zmniejszenie średnicy kanału powoduje przesunięcie większości granic w kierunku wyższego stopnia suchości pary x . Na to przesunięcie z kolei wpływa wzrost wartości lepkości μ i napięcia powierzchniowego σ , ma to też wpływ na proces skraplania w następstwie zmniejszenia średnicy kanału i wpływu sił grawitacyjnych. Enoki i in. [6] obserwowali struktury przepływu dwufazowego czynnika chłodniczego R410A w kanałach o przekroju kołowym, prostokątnym i trójkątnym o średnicy

hydraulicznej $d_h = 1$ mm. Badania przeprowadzono w zakresie gęstości strumienia masy $G = 30 \div 400$ kg/(m²s), stopnia suchości pary $x = 0,05 \div 0,9$ i temperaturze nasycenia $t_s = 10^\circ\text{C}$. Wyniki ujawniły powstawanie struktur: rzutowej, rozwarstwionej, falowej, pianowej i pierścieniowej. Na podstawie tych wyników autorzy dokonali modyfikacji mapy struktury przepływu opracowanej przez Chen i in. [7], która powstała na podstawie badań dwufazowego przepływowego czynnika R134a w kanałach rurowych o średnicy hydraulicznej $d_h = 1,10; 2,01; 2,88$ i $4,26$ mm.

Zhuang i in. [8] wykonali badania dwufazowego przepływu czynnika chłodniczego R170 w poziomym, gładkim szklanym kanale o średnicy hydraulicznej $d_h = 4$ mm. Podczas badań zaobserwowano struktury, takie jak rzutowa, pierścieniowo-falowa i pierścieniowa. Wyniki eksperymentalne porównano z mapami opublikowanymi przez Brebera, Tandong, Cavalliniego, El Hajala i Barbieri, a następnie autorzy zmodyfikowali mapę opracowaną przez Kim i in. [9], wyznaczyli również granice przejścia pomiędzy poszczególnymi strukturami przepływowymi za pomocą zmodyfikowanej liczby Webera (We^*) oraz parametru Lockharta–Martinelli'ego:

- pierścieniowa / pierścieniowo-falowa: $We^* = 29,25 \chi_H^{0,27}$,
- pierścieniowo-falowa/prześciowa: $We^* = 18,91 \chi_H^{0,33}$,
- prześciowa/rzutowa: $We^* = 9,62 \chi_H^{0,35}$,
- rzutowa/tłokowa: $We^* = 4,38 \chi_H^{0,45}$.

W procesie identyfikacji dwufazowych struktur przepływu mapy struktury przepływu są bardzo przydatnym narzędziem. Nasrferd i in. [10] przeanalizowali skuteczność map przepływu zaproponowanych przez El Hajala i inni, Kim i inni, Tandong i inni, oraz Cavallini i inni, porównując je z wynikami własnych badań eksperymentalnych dotyczących skraplania czynnika chłodniczego R141b w poziomym, gładkim okrągłym kanale o średnicy hydraulicznej $d_h = 8$ mm. Stwierdzono, że opisane wcześniej mapy struktury przepływu nie pokrywały się z wynikami wizualizacji. Dlatego autorzy zaproponowali własną mapę, będącą modyfikacją El Hajala i inni [11] mapą funkcjonującą w dolnym zakresie wartości stopnia suchości pary. Xiao i Hrnjak [3] zaproponowali mapę struktur przepływowych powstających podczas kondensacji czynników R134a, R1234ze, R32, R245fa i R1233zd w kanałach o średnicy hydraulicznej $d_h = 1,4$ i 6 mm. Entalpia właściwa czynnika chłodniczego została przyjęta jako jeden z parametrów określających granice

występowania poszczególnych struktur przepływowych. Procedura ta uwzględniła wymianę ciepła zachodzącą podczas procesu kondensacji. Stworzona w ten sposób mapa jest również modyfikacją mapy El Hajala i inni.

W literaturze jest wiele badań adiabatycznych przepływów dwufazowych. Niektórzy autorzy opublikowali mapy struktur przepływu dla adiabatycznych i nieadiabatycznych przepływów dwufazowych. Brakuje jednak badań wizualizacyjnych dotyczących kondensacji nowych, przyjaznych dla środowiska czynników chłodniczych o niskim ODP i GWP. Proces skraplania tych czynników chłodniczych w minikanalach nie jest jeszcze przebadany w szerokim zakresie. W literaturze brakuje map struktury przepływu dla procesu skraplania nowych czynników chłodniczych. Nowością w niniejszej pracy są wyniki badań struktur przepływu skraplania nowych niskociśnieniowych czynników chłodniczych z grupy Novec firmy 3M w minikanalach. Badania przeprowadzono w bardzo szerokim zakresie procesu skraplania w minikanalach. Jak dotąd tylko Al-Zaidi i in. [12] badali struktury przepływowe powstające podczas kondensacji czynnika HFE7100 w multiportach wykonanych z prostokątnych minikanatów, w zakresie parametrów $d_h = 0,57$ mm, $T_s = 60^\circ\text{C}$ i $G = 48 \div 126$ kg/(m²s). Mikielewicz i in. [13] przeprowadzili badania kondensacji czynnika chłodniczego HFE 7000 i HFE 7100 w minikanale o średnicy wewnętrznej $d_h = 2,3$ mm dla zakresu gęstości strumienia masy $G = 240 \div 850$ kg/m²s, ale autorzy nie badali struktur przepływu podczas skraplania tego czynnika chłodniczego. Czynniki chłodnicze Novec znajdują zastosowanie w szerokiej gamie urządzeń grzewczych i chłodniczych. Mohamadi i inni [14] badali przenoszenie ciepła za pomocą nanopłynu składającego się z czynnika chłodniczego HFE7000 i Al₂O₃ oraz nanocząstek SiO₂ [15] zaproponowali zastosowanie czynnika chłodniczego HFE7000 w połączeniu z CO₂ w kaskadowym urządzeniu chłodniczym. Woodcock i inni [16] badali zastosowanie czynnika chłodniczego HFE7000 w silikonowym miniwymienniku ciepła (MECH-X), który jest reaktorem pochłaniającym ciepło o grubości 800 μm . Wymiennik służył do chłodzenia podzespołów elektronicznych, które zostały rozgrzane do temperatury 90°C. Badania wrzenia czynnika chłodniczego Novec (HFE7000, HFE7100, FC-72, HFE-649), przeprowadzili Eraghubia i inni [17], Piasecka i inni [18] oraz Cao i inni [19], którzy przygotowali wizualizacje wrzenia

w objętości czynnika HFE-649. Inni naukowcy zaproponowali zastosowanie czynnika chłodniczego Novoc w organicznym obiegu Rankine'a [20] i trójstopniowym układzie chłodniczym [21]. W literaturze można też znaleźć prace dotyczące modelowania przepływu dwufazowego tego rodzaju czynników. Modelowanie jest bardzo często stosowane w celu ograniczenia kosztownych badań eksperymentalnych również w dziedzinie struktur przepływowych [22].

Opis stanowiska i metodyki badawczej

Badania procesu skraplania niskociśnieniowych czynników chłodniczych HFE7000, HFE7100 i Novoc649 przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym. Na stanowisku można było jednocześnie wykonywać badania ciepło-przepływowe i wizualizacyjne w zakresie dwufazowych struktur przepływowych. Na rys. 1 przedstawiono schemat ideowy stanowiska badawczego, zaś na rys. 2 jego widok ogólny. Stanowisko badawcze składało się z dwóch odcinków pomiarowych oznaczonych symbolami A i B (rys. 1). Sekcja A była przeznaczona do przeprowadzenia eksperymentalnych badań ciepło-przepływowych

kondensacji czynników chłodniczych w minikanatach. Sekcja pomiarowa A (rys. 1) została wykonana ze stali nierdzewnej. Sekcja B zbudowana jest w postaci szklanego minikanatu służącego do wizualizacji dwufazowego przepływu czynnika chłodniczego w procesie kondensacji.

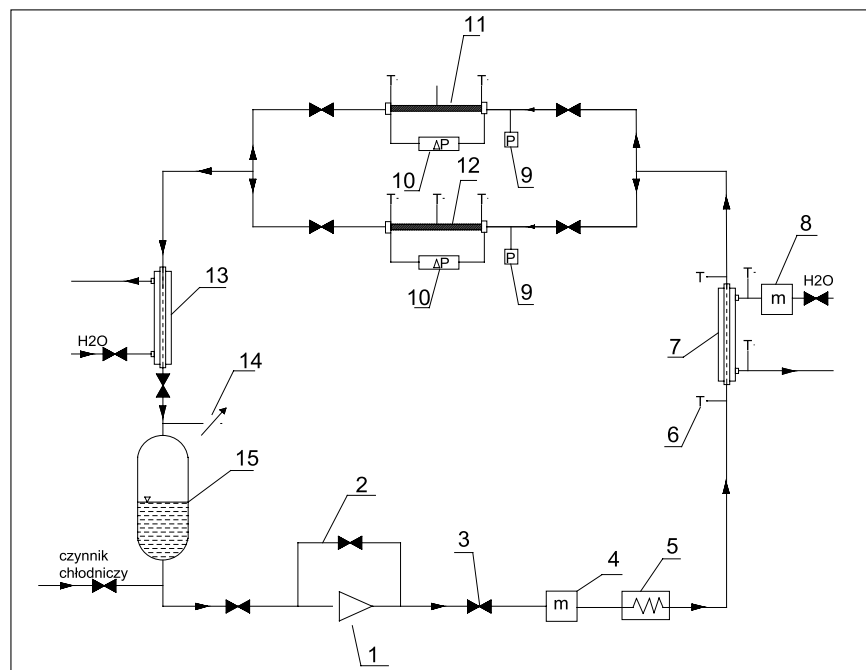


Rys. 2. Widok ogólny stanowiska pomiarowego

W układzie przedstawionym na rys. 1 ciekły czynnik chłodniczy jest zasysany przez pompę ceramiczną 1 i włączany do wymiennika ciepła w postaci węzownicy zanurzonej w zbiorniku wodnym 5, który pełni funkcję parownika. System grzałek elektrycznych służy do dostarczania ciepła do wody, w której zanurzona jest węzownica z przepływającym czynnikiem chłodniczym. Czynnik chłodniczy jest podgrzewany aż do odparowania. Temperatura pary

opuszczającej parownik jest mierzona i utrzymywana na stałym poziomie przez termostat. Na wlocie ciekłego czynnika chłodniczego do parownika 5 zainstalowano przepływomierz masowy typu Coriolis 34XIP67 4, wykonany w klasie 0,5. Na wlocie do odcinków pomiarowych 11 i 12 zainstalowany jest wymiennik wstępny 7, chłodzony wodą w celu regulacji stopnia suchości pary czynnika chłodniczego. Z bilansu cieplnego tego wymiennika wyznaczono wartość stopnia suchości pary x na wlocie do odcinka pomiarowego. Minikanat ze stali nierdzewnej został umieszczony w kanale wodnym o wymiarach 250 x 25 x 30 mm. Ciepło kondensacji zostało odbierane przez wodę chłodzącą. Długość minikanatu na odcinku pomiarowym wynosiła $L = 250$ mm. Na długości minikanatu w odległości 125 mm zainstalowano czujniki temperatury typu K do pomiaru temperatury zewnętrznej powierzchni kanatu. Natężenie przepływu wody chłodzącej było stałe. Ciśnienie czynnika chłodniczego w odcinkach pomiarowych mierzono czujnikiem piezorezystancyjnym 9 z przetwornikiem PMP 131-A1401A1W produkcji Endress + Hauser o zakresie pomiarowym $0 \div 40$ MPa i klasie 0,5. Spadek ciśnienia w minikanale mierzono czujnikiem różnicy ciśnień 10, przetwornikiem Deltabar SPMP o zakresie pomiarowym $0 \div 1,5$ MPa i klasie wykonania 0,075. Na odcinku do badań cieplnych 12 w 3 miejscach mierzono temperaturę zewnętrznej ściany minikanatu na jego długości oraz temperaturę wody chłodzącej na wlocie i wylocie z kanatu. W sekcji wizualizacyjnej 11 mierzono temperaturę medium na wlocie i wylocie ze szklanego kanatu. Do tego celu wykorzystano 7 czujników termoparowych typu K (o średnicy termopary 0,1 mm). Wszystkie czujniki termoelektryczne przed zamontowaniem na stoisku zostały poddane weryfikacji w stosunku do standardowego termometru szklanego o podziałce $0,1^\circ\text{C}$. Stopień suchości pary czynnika chłodniczego był kontrolowany przez natężenie przepływu wody chłodzącej w dochładzacz 13. Następnie czynnik chłodniczy był kierowany do zbiornika cieczy. Dodatkowo zainstalowano obejście 2 z zaworami regulacyjnymi 3, aby sterować natężeniem przepływu czynnika chłodniczego.

W przypadku sekcji wizualizacyjnej, składającej się ze szklanego minikanatu, oprócz czujników ciśnienia i temperatury zainstalowano dodatkowo kamerę poklatkową Olympus i-SPEED 3 z matrycą CMOS, z maksymalną prędkością nagrywania 10 000 fps i maksymalnej rozdzielczości 1280 x 1024 pikseli wraz z oprogramowaniem i systemem akwizycji



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska do badań ciepło-przepływowych i wizualizacyjnych przepływu dwufazowego; A – sekcja do badań ciepło-przepływowych kondensacji czynnika, B – sekcja do badań wizualizacyjnych dwufazowych struktur przepływowych; 1 – pompa ceramiczna, 2 – obejście do regulacji natężenia przepływu, 3 – zawór, 4 – przepływomierz elektroniczny czynnika chłodniczego, 5 – parownik, 6 – czujniki temperatury (termopary typu K), 7 – wymiennik wstępny typu „rura w rurze”, 8 – przepływomierz elektroniczny do pomiaru natężenia przepływu wody, 9 – czujnik ciśnienia na wlocie do odcinka pomiarowego, 10 – czujnik różnicy ciśnień, 11 – odcinek poziomy do wizualizacji przepływu, 12 – odcinek poziomy do badań ciepło-przepływowych, 13 – wymiennik ciepła (dochładzacz), 14 – manowakometr, 15 – zbiornik ciekłego czynnika chłodniczego

danych. W badaniach wykorzystano obiektyw AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED oraz szerokokątny obiektyw Nikkor AF 18-35 mm f/3.5-4.5D IF-ED firmy Nikon.

Badania cieplno-przepływowe przeprowadzono w minikanalach ze stali nierdzewnej, natomiast badania wizualizacyjne przeprowadzono w szklanych minikanalach. W obu przypadkach zastosowano kanały o średnicy hydraulicznej $d_h = 2$ mm; 1,2 mm; 0,8 mm; 0,5 mm i długości 250 mm. Wynikało to z konieczności porównania wyników badań cieplno-przepływowych z wynikami wizualizacji. Celem badań było opisanie zakresu występowania poszczególnych struktur przepływowych za pomocą parametrów cieplno-przepływowych w postaci mapy struktur przepływu dla procesu kondensacji niskociśnieniowego czynnika chłodniczego w minikanalach [23,24].

W badaniach eksperymentalnych zastosowano czynniki niskociśnieniowe: HFE 7000, HFE 7100, Novec 649. Badania przeprowadzono w zakresach zmian charakterystycznych parametrów kondensacji:

- gęstość strumienia masy: $G = 180 \div 5500$ kg / (m²s),
- gęstość strumienia ciepła: $q = 0 \div 200$ kW/m²,
- temperatura nasycenia: $t_s = 30 \div 70^\circ\text{C}$,
- stopień suchości pary: $x = 1 \div 0$.

Wybrane czynniki chłodnicze to substancje niskociśnieniowe, co pozwalało na wizualizację procesu kondensacji w szklanych minikanalach. Zaletą tych czynników jest łatwa dostępność na rynku europejskim oraz niskie wartości wskaźników ODP i GWP, co oznacza, że mają stosunkowo niewielki wpływ na degradację środowiska. Uzyskane wyniki dla tych czynników, po uogólnieniu, można przenosić również na inne, powszechnie stosowane czynniki chłodnicze. W sekcji A stanowiska badawczego bezpośrednio mierzono następujące parametry:

- rozkład temperatury ścianki na długości kanału t_k ,
 - ciśnienie czynnika chłodniczego na wlocie do kanału p ,
 - spadek ciśnienia na długości minikanalu Δp ,
 - temperatura wody chłodzącej na długości kanału t_w .
- W sekcji B zmierzono:
- temperaturę czynnika chłodniczego na wlocie i wylocie z odcinka pomiarowego t_r ,
 - ciśnienie czynnika chłodniczego na wlocie i wylocie odcinka pomiarowego, p .

Masowe natężenie przepływu czynnika \dot{m} , mierzono bezpośrednio na stanowisku

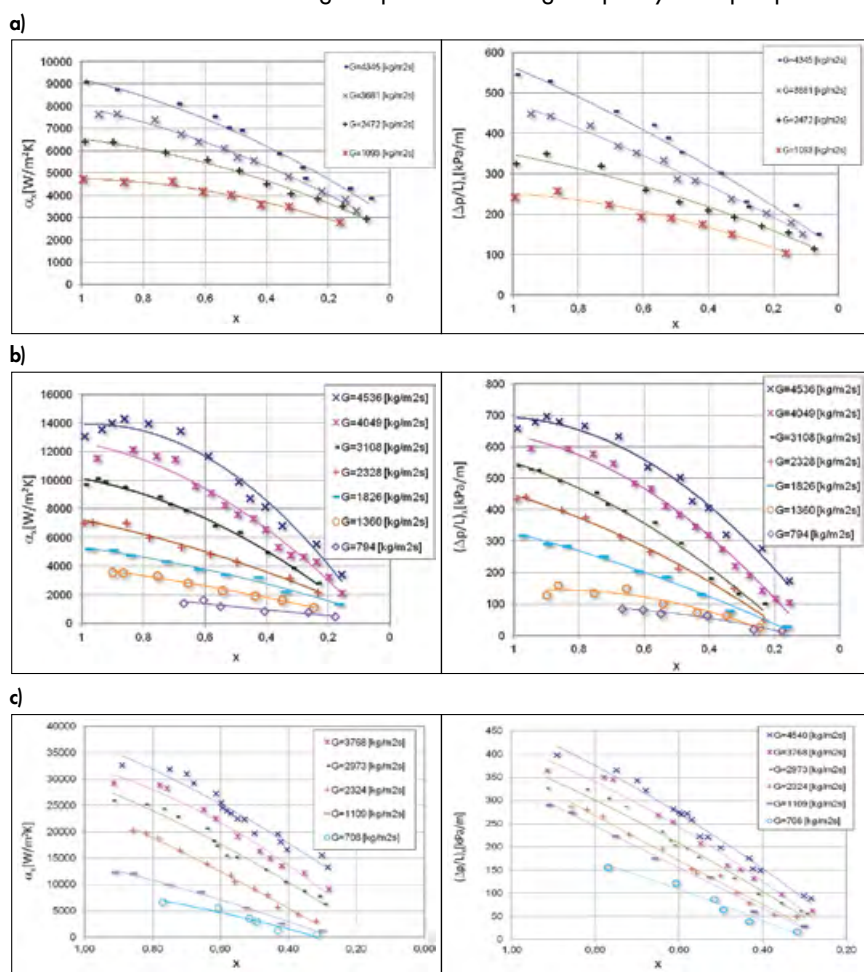
laboratoryjnym. W celu określenia stopnia suchości pary czynnika chłodniczego x na wlocie do odcinka pomiarowego wykonano bilanse cieplne wymiennika wstępnego 8 (rys. 1). W tym celu mierzono temperaturę wody chłodzącej i czynnika chłodniczego zarówno na dopływie jak i wypływie z wymiennika. Mierzono również natężenie przepływu wody chłodzącej przez wymiennik 8. W współczynnik przejmowania ciepła α podczas kondensacji czynnika chłodniczego wyznaczono pośrednio z dokładnością $\pm 10\%$. Opory przepływu wyznaczono natomiast z dokładnością $\pm 8\%$. Ilość ciepła wymienianego z otoczeniem w procesie kondensacji czynnika chłodniczego w minikanalach wyznaczono metodą opracowaną na podstawie koncepcji przedstawionej w pracy [25]. Metodologię badań wizualizacyjnych i analizy obrazu opisano w pracach [26–28].

Wyniki badań i ich analiza

Na rys. 3 przedstawiono przykładowe lokalne charakterystyki cieplno – przepływowe w zależności od lokalnego stopnia

suchości x przy różnych gęstościach strumieniach masy G , dla minikanalu o średnicy hydraulicznej $d_h = 1,2$ mm. Porównanie doświadczalnych, lokalnych charakterystyk spadków ciśnienia od lokalnej wartości stopnia suchości x pokazują, że w określonej strefie kondensacji ($x = 1 \div 0$) następuje spadek wartości lokalnych oporów przepływu $(\Delta p/l)_x$. Wraz ze spadkiem stopnia suchości pary następuje wzrost zawartości fazy ciekłej w całej objętości przepływającej mieszaniny dwufazowej. Jak widać, największe spadki ciśnienia w danych warunkach uzyskano podczas kondensacji czynnika HFE7000. Podobnie ma się sprawa wymiany ciepła. Jak widać na rys. 3 zależności współczynnika przejmowania ciepła od stopnia suchości mają zbliżony charakter do charakterystyk oporów przepływu.

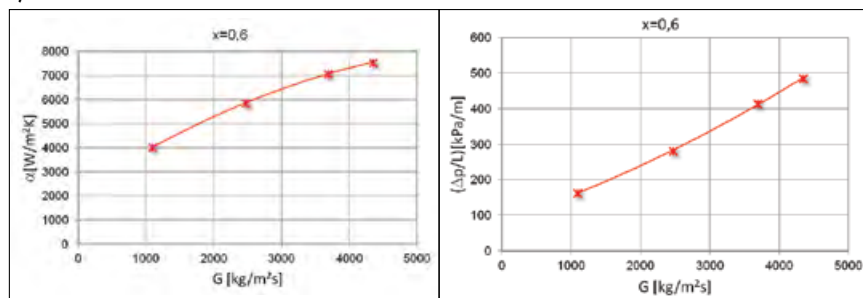
Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe, eksperymentalne charakterystyki cieplno-przepływowe kondensacji badanych czynników chłodniczych w minikanale o średnicy hydraulicznej $d_h = 1,2$ mm. Wartości średnich spadków ciśnienia i średniego współczynnika przejmowania



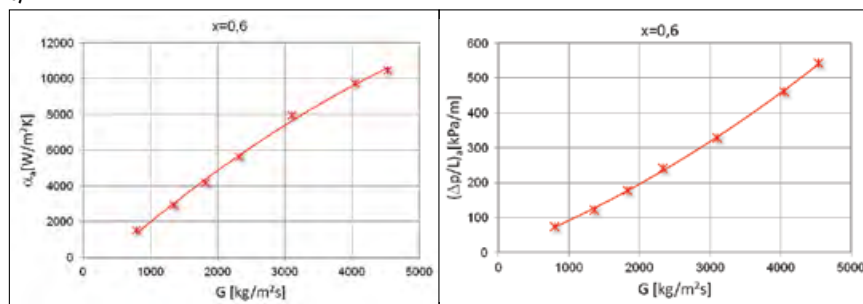
Rys. 3. Doświadczalne, lokalne charakterystyki cieplno-przepływowe w zależności od stopnia suchości pary x podczas kondensacji w minikanale o średnicy hydraulicznej $d_h = 1,2$ mm, czynników chłodniczych: a) HFE7000; b) Novec649; c) HFE7100

ciepła wyznaczono dla całej określonej strefy kondensacji. Charakterystyki obu wykresów pokazują wpływ gęstości strumienia masy zarówno na spadki ciśnienia jak i współczynnik przejmowania ciepła. Wzrost gęstości strumienia masy G wpływa na wzrost średniej wartości współczynnika przejmowania ciepła i oporów przepływu przy stałym stopniu suchości x . Jak widać, najwyższe wartości współczynnika przejmowania ciepła wystąpiły podczas kondensacji czynnika HFE7100.

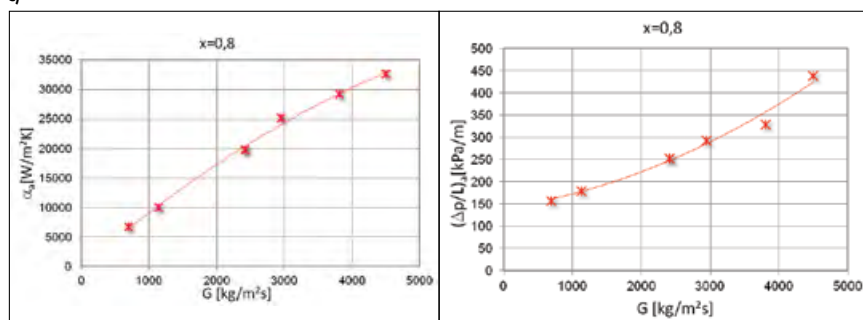
a)



b)



c)



Rys. 4.

Doświadczalne charakterystyki cieplno-przepływowe w postaci zależności współczynnika przejmowania ciepła α i oporów przepływu Δp od gęstości strumienia masy G podczas kondensacji w minikanale o średnicy hydraulicznej $d_h = 1,2$ mm ($t_s \approx 50^\circ\text{C}$), czynniki chłodnicze: a) HFE7000; b) Novec649; c) HFE7100

Autorzy wykonali własne badania wizualizacyjne skraplania czynników chłodniczych HFE7000, HFE7100 i Novec649 w minikanalach rurowych o średnicy wewnętrznej $d_h = 2$ mm; 1,2 mm; 0,8 mm i 0,5 mm. Na tej podstawie dokonano klasyfikacji struktur przepływu na struktury i substruktury.

> Struktura dyspersyjna:

- Substruktura mgłowa (*mist flow*) – nazywana jest też przepływem kropelkowym; w tym przypadku całym prze-

krojem poprzecznym kanału przepływa gaz z „zawieszonymi” w nim drobnymi kropelkami cieczy.

> Struktura rozwarstwiona (*stratified flow*):

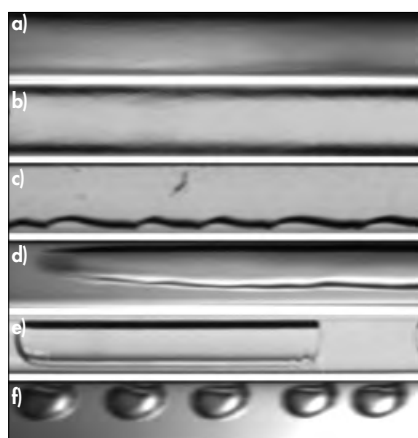
- Substruktura pierścieniowa (*annular flow*) – faza gazowa przepływa z dużą prędkością w rdzeniu kanału, a na jego powierzchni wewnętrznej tworzy się film cieczowy, którego grubość jest asymetryczna w stosunku do przekroju poprzecznego kanału i ma większą grubość u dołu kanału.

mogą osiągnąć wielkość porównywalną z wymiarem średnicy kanału i przemieszczają się głównie w górnej części przekroju.

- Struktura rzutowa (*slug*) – przy rosnącym natężeniu przepływu, naprężenia ścinające powodują wzrost zakresu fal formujących pęcherzyki gazu wzdłuż kierunku przepływu w kanale; w ten sposób w kanale przepływa na zmianę pewna ilość cieczy z małymi pęcherzykami oraz duże pęcherze zajmujące większą część przekroju poprzecznego kanału.

- Struktura pęcherzykowa (*bubbly flow*) – jest to struktura fazy gazowej (rozproszona faza gazowa) przepływająca, jako pęcherzyki w ciągłej fazie ciekłej, które zajmują małą część przekroju poprzecznego kanału.

Na podstawie wyników uzyskanych w badaniach wizualizacyjnych kondensacji czynników chłodniczych HFE7000, HFE7100 i Novec649 w minikanale skonstruowano własne mapy struktur przepływowych. Ze względu na fakt, że czynnik HFE7100 ma znacznie wyższą gęstość fazy parowania w porównaniu z czynnikami HFE7000 i Novec649, napotkano znaczne trudności podczas budowy wspólnej mapy struktur przepływowych we współrzędnych $G - x$ dla trzech badanych czynników. Próbuąc uogólnić wyniki badań eksperymentalnych uzyskanych dla tych trzech czynników, zaproponowano przedstawienie eksperymentalnej mapy dwufazowych struktur przepływowych powstających podczas kondensacji w minikanalach o średnicy wewnętrznej $d_h = 2,0 \div 0,5$ mm we współrzędnych $G - \varphi$. Na rys. 6 przedstawiono oryginalną mapę struktur przepływu powstałą w wyniku badań wizualizacyjnych i analizy obrazu.



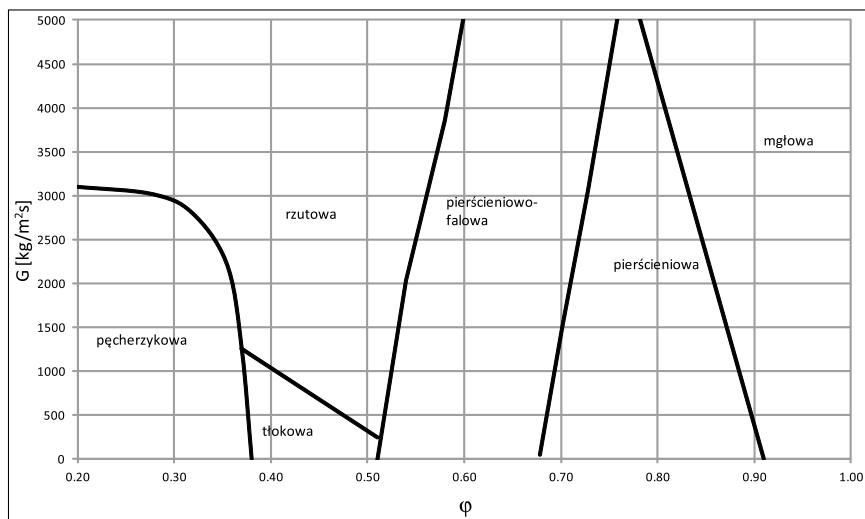
Rys. 5.

Klasyfikacja własna struktur przepływu dwufazowego podczas skraplania w minikanalach: a) struktura mgłowa, b) struktura pierścieniowa, c) struktura falowa, d) struktura rzutowa, e) struktura łokowa, f) struktura pęcherzykowa

- Substruktura falowa (*wave flow*) – podobnie, jak w strukturze rozwarstwionej, ciecz przepływa w dolnej części kanału, zaś gaz w górnej. Ze wzrostem prędkości fazy gazowej powstają zakłócenia na granicy rozdziału faz, powodujące powstawanie fal na jej powierzchni, które poruszają się wzdłuż kierunku przepływu.

> Struktura nieciągła (*intermittent flow*)

- Struktura łokowa (*plug*) – w przepływie formują się pęcherze gazu, które



Rys. 6
Propozycja uogólnionej mapy struktur przepływowych podczas kondensacji czynników HFE7000, HFE7100 i Novec649 w minikanalach o średnicy wewnętrznej $d_h = 2,0 \div 0,5$ mm

Na rys. 7 przedstawiono jak kształtują się wartości liczby Nusselta, charakteryzującej wymianę ciepła, dla poszczególnych struktur przepływu. Jak widać najwyższe wartości liczby Nusselta Nu , a co za tym idzie wartości współczynnika przejmowania ciepła, występują przy strukturze dyspersyjnej, niższe przy strukturze rozwar-

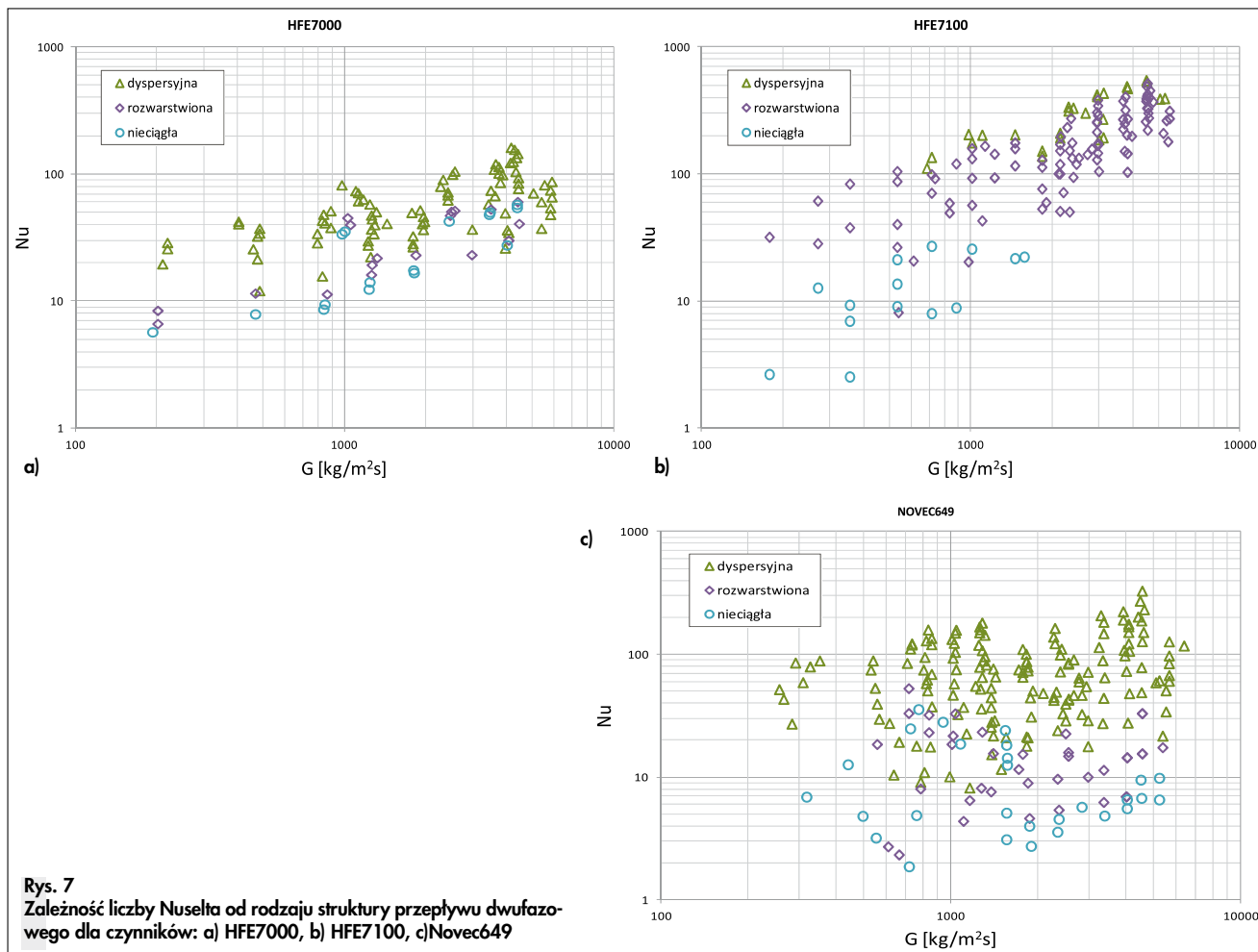
stwionej a najniższe dla struktury nieciągłej, niezależnie od rodzaju czynnika.

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań kondensacji czynników chłodniczych HFE7000, HFE7100 i Novec649.

Wyniki badań cieplnych połączone z wynikami badań wizualizacyjnych skraplania tych czynników. Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Podczas procesu kondensacji w minikanalach najwyższe wartości współczynnika przejmowania ciepła uzyskano dla czynnika HFE7100, natomiast najniższe wartości dla czynnika HFE7000. Wynika to z właściwości fizykochemicznych tych czynników chłodniczych.
2. Kształtowanie się struktur przepływu w procesie kondensacji wpływa na intensywność wymiany ciepła. Najwyższe wartości współczynnika przejmowania ciepła uzyskuje się w przepływie dyspersyjnym, a najniższe w grupie przepływów przerywanych. Wynika to ze zwiększenia grubości warstwy kondensatu, która pełni funkcję izolacji na wewnętrznej powierzchni kanału.
3. Struktury przepływu mają również wpływ na stabilność pracy układów wykorzystujących przemiany dwufazowe. Największe zaburzenia przepływu daje struktura rzutowa i przejście między strukturą pierścieniowo-falową a strukturą rzutową.



Rys. 7
Zależność liczby Nusselta od rodzaju struktury przepływu dwufazowego dla czynników: a) HFE7000, b) HFE7100, c) Novec649

4. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na opracowanie propozycji uogólnionej mapy struktur przepływu podczas kondensacji niskociśnieniowych czynników chłodniczych: HFE7000, HFE7100 i Novex649 w minikanatach o średnicy wewnętrznej w przedziale $d_h = 2,0 \div 0,5$ mm (rys. 6).

Wykaz ważniejszych oznaczeń

d	średnica, [m]
G	gęstość strumienia masy, [kg/m ² s]
j	prędkość pozorną, [m/s]
p	ciśnienie, [Pa]
q	gęstość strumienia ciepła, [W/m ²]
t	temperatura, [°C]
x	stopień suchości pary, [-]
φ	stopień zapełnienia, [-]
μ	współczynnik lepkości dynamicznej, [Pa·s]
σ	napięcie powierzchniowe, [N/m]
Nu	liczba Nusselta
We	liczba Webera
χ _{fit}	parameter Lockharta-Martinellego
(Δp/l) _x	lokalne opory przepływu [Pa/m]

Indeksy

h	hydrauliczne
k	krytyczne
l	ciecz
r	czynnik chłodniczy
s	nasycenia
v	para

BIBLIOGRAFIA

[1] Coleman JW, Garimella S. Two-phase flow regimes in round, square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a. *Int J Refrig* 2003;26:117–28. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(02\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(02)00013-0).

[2] Kandlikar, S.G., Garimella, S., Li, D., Colin, S., King MR. Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. Elsevier Inc.; 2006.

[3] Xiao J, Hrnjak P. A flow regime map for condensation in macro and micro tubes with non-equilibrium effects taken into account. *Int J Heat Mass Transf* 2019;130:893–900. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.081>.

[4] Jige D, Kikuchi S, Eda H, Inoue N, Koyama S. Two-phase flow characteristics of R32 in horizon-

tal multiport minichannels: Flow visualization and development of flow regime map. *Int J Refrig* 2018;95:156–64. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.09.005>.

[5] Nema G, Garimella S, Fronk BM. Flow regime transitions during condensation in microchannels. *Int J Refrig* 2014;40:227–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.11.018>.

[6] Enoki K, Mori H, Miyata K, Hamamoto Y. Flow patterns of the Vapor-liquid two phase flow in small tubes. *Trans of the JSRAE* 2013.

[7] Chen L, Tian YS, Karayiannis TG. The effect of tube diameter on vertical two-phase flow regimes in small tubes. *Int J Heat Mass Transf* 2006;49:4220–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.03.025>.

[8] Zhuang X, Gong M, Chen G, Zou X, Shen J. Two-phase flow pattern map for R170 in a horizontal smooth tube. *Int J Heat Mass Transf* 2016;102:1141–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.094>.

[9] Kim S-M, Kim J, Mudawar I. Flow condensation in parallel micro-channels. Part 1: Experimental results and assessment of pressure drop correlations. *Int J Heat Mass Transf* 2012;55:971–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.013>.

[10] Nasrward H, Rahimzadeh H, Ahmadpour A, Naderan H. Experimental study of condensation heat transfer for R141b in intermittent flow regime within a smooth horizontal tube. *Exp Therm Fluid Sci* 2019;105:109–22. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.03.019>.

[11] El Hajal J, Thome J, Cavallini A. Condensation in horizontal tubes, part 1: two-phase flow pattern map. *Int J Heat Mass Transf* 2003;46:3349–63. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00139-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00139-X).

[12] Al-Zaidi AH, Mahmoud MM, Karayiannis TG. Condensation flow patterns and heat transfer in horizontal microchannels. *Exp Therm Fluid Sci* 2018;90:153–73. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.09.009>.

[13] Mikielewicz D, Wąjs J, Andrzejczyk R, Klugmann M. Pressure drop of HFE7000 and HFE7100 during flow condensation in minichannels. *Int J Refrig* 2016;39:2:123–146. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.03.005>.

[14] Mohamadi S, Yazdi MH, Solomin E, Fudholi A, Sopian K, Chong PL. Heat transfer and entropy generation analysis of internal flow of nanorefrigerant with slip condition at wall. *Therm Sci Eng Prog* 2021;22:100829. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100829>.

[15] Adebayo V, Abid M, Adedeji M, Dagbasi M, Bamsile O. Comparative thermodynamic performance analysis of a cascade refrigeration system with new refrigerants paired with CO₂. *Appl Therm Eng* 2021;184:116286. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116286>.

[16] Woodcock C, Ng'oma C, Sweet M, Wang Y, Peles Y, Plawsky J. Ultra-high heat flux dissipation with Piranha Pin Fins. *Int J Heat Mass Transf* 2019;128:504–515. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.030>.

[17] Eraghubi M, Di Marco P, Robinson AJ. Low mass flux upward vertical forced flow boiling of HFE7000. *Exp Therm Fluid Sci* 2019;102:291–301 <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.11.011>.

[18] Strąk K, Piasecka M. The applicability of heat transfer correlations to flows in minichannels and new correlation for subcooled flow boiling. *Int J Heat Mass Transf* 2020;158:119933. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119933>.

[19] Cao Z, Wu Z, Sundén B. Pool Boiling of NOVEC-649 on Microparticle-Coated and Nanoparticle-Coated Surfaces. *Heat Transf Eng* 2020;42:1732–1747. <https://doi.org/10.1080/01457632.2020.1818419>.

[20] Wang H, Li H, Wang L, Bu X. Thermodynamic Analysis of Organic Rankine Cycle with Hydrofluoroethers as Working Fluids. *Energy Procedia* 2017;105:1889–94. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.554>.

[21] Sun Z, Wang Q, Dai B, Wang M, Xie Z. Options of low Global Warming Potential refrigerant group for a three-stage cascade refrigeration system. *Int J Refrig* 2019;100:471–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.12.019>.

[22] Xiang J, Liu Z, Zhang C, Zhou C, Chen C. Finite Element Simulation of the Machining Process of Boiling Structures in a Novel Radial Heat Sink for High-Power LEDs. *Materials (Basel)* 2020;13:3958. <https://doi.org/10.3390/ma13183958>.

[23] Bohdal T, Charun H, Sikora M. Empirical study of heterogeneous refrigerant condensation in pipe minichannels. *Int J Refrig* 2015; 59:210–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.07.002>.

[24] Sikora M, Bohdal T. Heat and flow investigation of NOVEC649 refrigerant condensation in pipe minichannels. *Energy* 2020;209: 118447. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118447>.

[25] Bohdal T, Charun H, Sikora M. Comparative investigations of the condensation of R134a and R404A refrigerants in pipe minichannels. *Int J Heat Mass Transf* 2011;54:1963–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.01.005>.

[26] Sikora M, Bohdal T. Application of computer image analyzes in the investigation of refrigerants condensation in minichannels. *Arch Thermodyn* 2019;40. <https://doi.org/10.24425/ather.2019.128292>.

[27] Sikora M. Flow Structure Investigations during Novex Refrigerant Condensation in Minichannels. *Materials (Basel)* 2021;14:6889. <https://doi.org/10.3390/ma14226889>.

[28] Bohdal T, Sikora M, Widomska K, Radchenko AM. Investigation of flow structures during HFE-7100 refrigerant condensation. *Arch Thermodyn* 2015;36:25–34. <https://doi.org/10.1515/aoter-2015-0030>.