

Skraplanie czynników chłodniczych w kompaktowych wymiennikach ciepła

Abstract. Compact refrigeration condensers, build on base of pipe minichannels, are already use with success in miniaturized cooling – air-conditioner installations. Particular example of their employment are instalations, where requirement of accompanying exists to enclosing high density of heat flows in safe and ecological manner (e.g. electronic devices).

Key words: compact heat exchanger, minichannel, condensation, heat transfer, pressure drop, refrigerant

Wstęp

Na przełomie XX i XXI wieku nastąpił gwałtowny rozwój postępu technicznego obserwowany wzrostem jakościowym oraz ilościowym produkcji urządzeń, zwłaszcza w dwóch dziedzinach, tzn. w technice kosmicznej i elektronice. Są one nierozzerwalnie ze sobą związane i wyznaczają trend miniaturyzacji tych urządzeń. Warto przy tym mieć na uwadze, że przykładowo wartość bezwzględna mocy cieplnej w układach komputerowych nie jest zbyt duża, natomiast gęstość strumienia ciepła, czyli ilość ciepła przekazywana przez jednostkę pola powierzchni wymiany ciepła osiąga znaczne wartości, nawet ponad 1000 W/cm^2 , na co wskazują *Baummer et al.* [1]. Dotychczasowe, tradycyjne sposoby przekazywania lub odbioru takich gęstości strumienia ciepła są mało przydatne. Omówienie obecnie stosowanych metod i zalecanych w przyszłości zawiera praca autorów *Obhan and Garimella* [2]. Stosowanie ośrodków dwufazowych, pośredniczących w wymianie ciepła staje się w tych sytuacjach priorytetowe. Praktyczne ich wykorzystanie sprowadza się do wdrożenia metod intensyfikacji konwekcyjnej wymiany ciepła z przemianami fazowymi. Jedną z biernych metod intensyfikujących proces konwekcyjnej wymiany ciepła jest obniżenie średnicy kanałów, dla przepływu czynników realizujących proces wymiany ciepła. Miarą efektywności tej intensyfikacji jest, między innymi, wzrost wartości współczynnika przejmowania ciepła. Można wskazać, że w budowie współczesnych chłodniczo-klimatyzacyjnych wymienników ciepła powinny być spełnione kryteria techniczno – ekologiczne, takie jak: małe wymiary gabarytowe, wysoka efektywność przekazywania ciepła i niekonfliktowe oddziaływanie na środowisko [3].

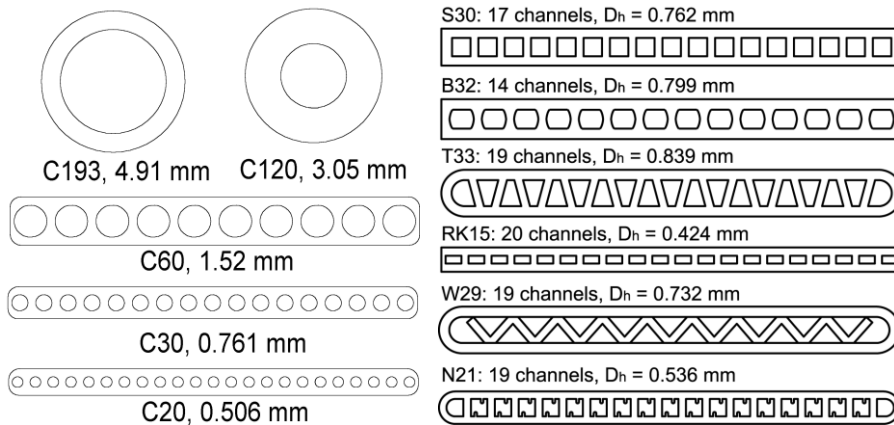
Kompaktowe wymienniki ciepła

Pod pojęciem *kompaktowego wymiennika ciepła* należy rozumieć taki wymiennik, w którym wskaźnik wyrażony stosunkiem powierzchni wymiany ciepła A , do objętości gabarytowej V wynosi $A/V > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Spełnienie tego kryterium wymaga zastosowania kanałów o średnicy hydraulicznej $d_h = 1 \div 6 \text{ mm}$. Inną stosowaną klasyfikacją wymienników ciepła jest zaproponowana przez *Mehendale et al.* [4], w której występują: mikrowymienniki ciepła ($d_h = 1 \div 100 \mu\text{m}$), mesowymienniki ($d_h = 100 \mu\text{m} \div 1 \text{ mm}$), wymienniki kompaktowe ($d_h = 1 \div 6 \text{ mm}$) oraz konwencjonalne wymienniki ciepła ($d_h > 6 \text{ mm}$). Klasyfikacja ta oparta na tzw. kryteriach *Kandlikara* [5] jest obecnie powszechnie stosowana.



Rys. 1. Widok minikanalów rurowych stosowanych w badaniach eksperymentalnych [3].

Równolegle zasilane układy minikanalów produkuje się na skale przemysłową w postaci tzw. *multiportów*, przy czym bierze się pod uwagę różne rozwiązania geometryczne. Przekroje poprzeczne mikro- i minikanalów mogą mieć różne kształty. Przykładowe układy pęczków kanałów wykorzystywane w praktyce pokazano na rys. 2.

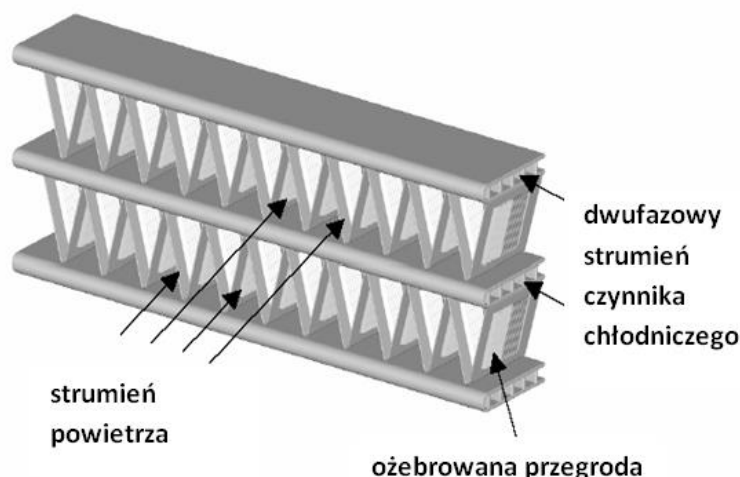


Rys. 2. Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne pęczków mikro- i minikanalów zasilanych równolegle (multiporty) w chłodniczych skraplaczach kompaktowych [6].

W budowie skraplaczy kompaktowych można spotkać różne kombinacje przepływu czynników roboczych realizujących proces wymiany ciepła. Zwykle łączy się mikro- i minikanalę w równolegle zasilane czynnikiem pęczki wielorurowe (ang.: *multiporty*). Na

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

rys. 3 przedstawiono przykładowo koncepcję konstrukcji skraplacza kompaktowego stosowanego w urządzeniach chłodniczo-klimatyzacyjnych.



Rys. 3. Przykładowy schemat koncepcyjny rozwiązania kanałów przepływowych w skraplaczu kompaktowym [7].

Istotnym węzłem konstrukcyjnym takiego skraplacza jest sposób doprowadzenia czynnika chłodniczego, który podlega skraplaniu w przepływie. Czynnik ten dopływa do zespołu kilku (lub kilkunastu) mikro- lub minikanalów zasilanych równolegle. W przypadku, jak na rys. 3 skraplacz jest chłodzony powietrzem. Podobne rozwiązania są możliwe przy chłodzeniu wodą.

Aktualny stan wiedzy nie pozwala badaczom opracować ujednoczonego modelu skraplania czynników w mikro- i minikanalach, co w znacznym stopniu utrudnia projektowanie i eksploatację wymienników kompaktowych, zwłaszcza skraplaczy. Badania nad zrealizowaniem tego postulatu prowadzone są w bardzo wielu krajach. W dalszej części niniejszego opracowania przedstawiono problemy badawcze występujące w skraplaczach kompaktowych. W wielu publikacjach autorzy przestrzegają także, aby nie przenosić korelacji określonych i zweryfikowanych dla przepływu z przemianą fazową w kanałach konwencjonalnych do mikro- i minikanalów. Tego typu wymienniki ciepła występują nie tylko w urządzeniach chłodniczych układów elektronicznych, ale również są na wyposażeniu aparatury statków kosmicznych, instalacjach chłodniczo – klimatyzacyjnych na środkach transportu lądowego i powietrznego, w klimatyzacji mieszkań oraz w tzw. przenośnych klimatyzatorach osobistych. Niektóre z nich są na wyposażeniu aparatury medycznej, w przemyśle precyzyjnym i w szeroko pojętych aplikacjach małogabarytowych urządzeń chłodniczych.

Przykład chłodzenia układów elektronicznych z zastosowaniem rurek cieplnych.

Najczęściej spotykanym sposobem chłodzenia układów elektronicznych jest chłodzenie za pomocą radiatora, który odbiera ciepło z elementu chłodzonego, oraz wentylatora, za pomocą którego zmniejszana jest oporność termiczna. Jednak kiedy

mamy do czynienia np. z wydajnymi procesorami, układ chłodzenia, w skład którego wchodzi radiator z wentylatorem okazuje się nie wystarczający.

Aby zapewnić szybsze odprowadzanie ciepła z powierzchni układu elektronicznego do radiatora, stosuje się układ kilku, najczęściej miedzianych rurek cieplnych.



Rys. 4. Zasada działania rurki cieplnej [11].

Rurka cieplna (*ang. heat pipe*) to metalowa, zazwyczaj miedziana rurka, która wypełniona jest odpowiednim czynnikiem chłodniczym. Podgrzewanie jednego końca rurki powoduje parowanie czynnika. Para przemieszcza się do chłodniejszego końca rurki, gdzie następuje proces skraplania czynnika i oddanie ciepła do otoczenia (do żeber radiatora). Skroplony czynnik chłodniczy przepływa następnie do cieplejszego końca rurki, w którym proces parowania się powtarza.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



Rys. 5. Przykładowy układ chłodniczy mający zastosowanie w układach elektronicznych, wykorzystujący procesy wrzenia i skraplania czynnika chłodniczego odbywającego się w rurkach cieplnych.

Kluczowe problemy skraplania czynnika chłodniczego w minikanalach

Projektując skraplacz kompaktowy złożony z minikanalów trzeba rozwiązać te same inżynierskie zadania jak w przypadku skraplacza konwencjonalnego. Sprowadza się to do obliczenia wymaganej, dyspozycyjnej powierzchni wymiany ciepła oraz mocy napędowej generatorów ruchu czynników realizujących proces wymiany ciepła. Z tego punktu widzenia trzeba mieć dostęp do informacji dotyczących metod określania:

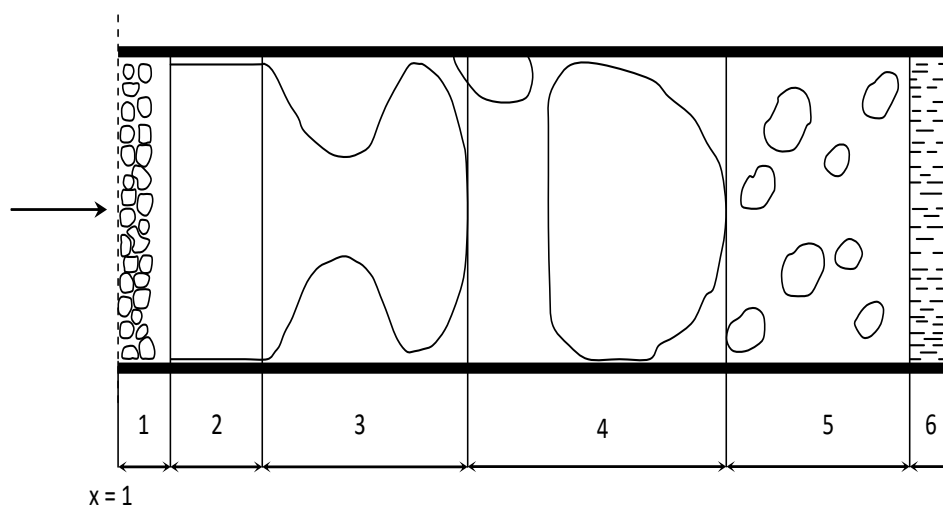
- wartości współczynników przejmowania (wnikania) ciepła od strony czynników, tzn. skraplającego się i chłodzącego,
- oporów przepływu obu tych czynników

Wyznaczenie tych wielkości dla jednofazowego czynnika chłodzącego jest relatywnie proste, natomiast ich określenie dla przemiany fazowej skraplania, zwłaszcza podczas przepływu w minikanale należy do problemów trudnych.

Wśród podstawowych problemów badawczych skraplaczy kompaktowych wyróżnić można następujące [8]:

1. ocena mechanizmu wymiany energii i pędu podczas skraplania czynników chłodniczych w minikanalach;
2. opracowanie map struktur przepływu dwufazowego w wersji uogólnionej, zwłaszcza dla proekologicznych zamienników freonów;
3. określenie wpływu rodzaju czynnika chłodniczego na parametry procesu skraplania;
4. określenie wpływu cech geometrycznych minikanalów (w tym: średnicy, kształtu, długości itp.) na efektywność skraplania;
5. wytypowanie uogólnionych i sprawdzonych eksperymentalnie procedur obliczenia współczynnika przejmowania ciepła i oporu przepływu;
6. opracowanie teoretycznych podstaw wymiany energii i pędu dla skraplania w minikanalach, z jednoczesnym wyjaśnieniem różnic mechanizmów procesów w kanałach konwencjonalnych oraz w mini-i mikrokanalach.

Na rysunku 6 zaobserwować można jak kształtują się struktury przepływu dwufazowego w czasie skraplania czynnika chłodniczego w minikanale rurowym.

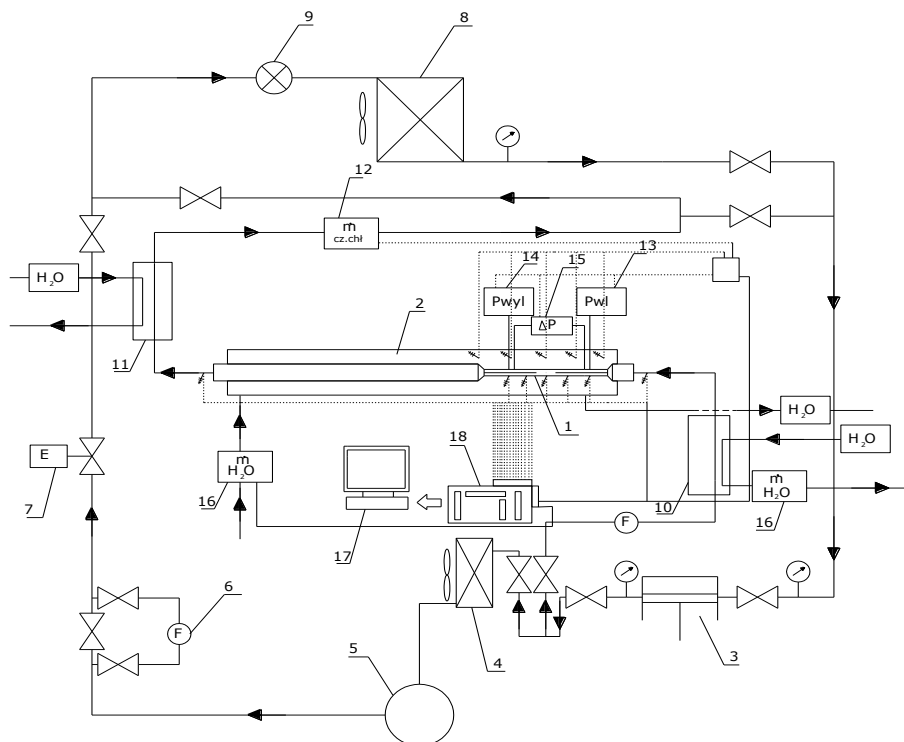


Rys. 6. Schemat kształtowania się struktur przepływu dwufazowego podczas skraplania czynnika chłodniczego w minikanale; 1 – mgłowa, 2 – pierścieniowa, 3 – wtryskowa, 4 – korkowa (typu plug lub slug), 5 – pęcherzykowa, 6 – przepływ cieczy [9].

Stanowisko badawcze

Na poniższym rysunku zaprezentowano schemat stanowiska badawczego na którym prowadzone były badania w zakresie wymiany ciepła oraz oporów przepływu.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



Rys. 7. Schemat stanowiska badawczego.

Opis schematu stanowiska badawczego:

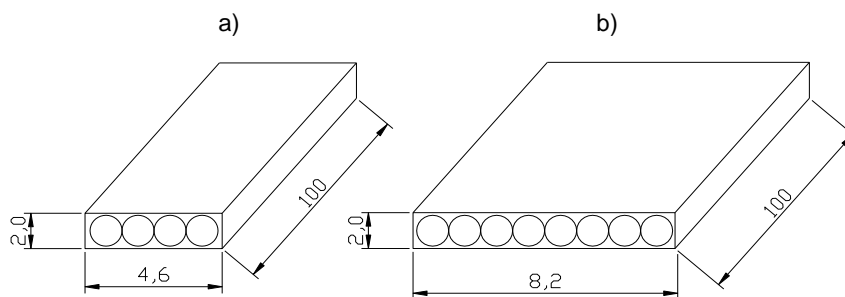
1 – odcinek pomiarowy z badanym wymiennikiem ciepła, 2 – kanał wodny, 3 – chłodniczy agregat sprężarkowy, 4 – skraplacz chłodzony powietrzem, 5 – zbiornik cieczy czynnika chłodniczego, 6 – filtr-osuszacz czynnika, 7 – zawór elektromagnetyczny, 8 – lamelowana chłodnica powietrza, 9 – zawór rozprężny zasilający chłodziwą, 10 – wymiennik ciepła do odbioru ciepła przegrzania czynnika, 11 – dochładzacz cieczy czynnika, 12 – przepływomierz elektroniczny czynnika chłodniczego, 13 – czujnik ciśnienia czynnika na dopływie do odcinka pomiarowego, 14 - czujnik ciśnienia czynnika na wypływie z odcinka pomiarowego, 15 – czujnik różnicy ciśnienia czynnika, 16 – przepływomierz elektroniczny wody, 17 – komputer, 18 – układ akwizycji danych



Rys. 8. Widok stanowiska badawczego.

Przykładowe wyniki badań eksperymentalnych

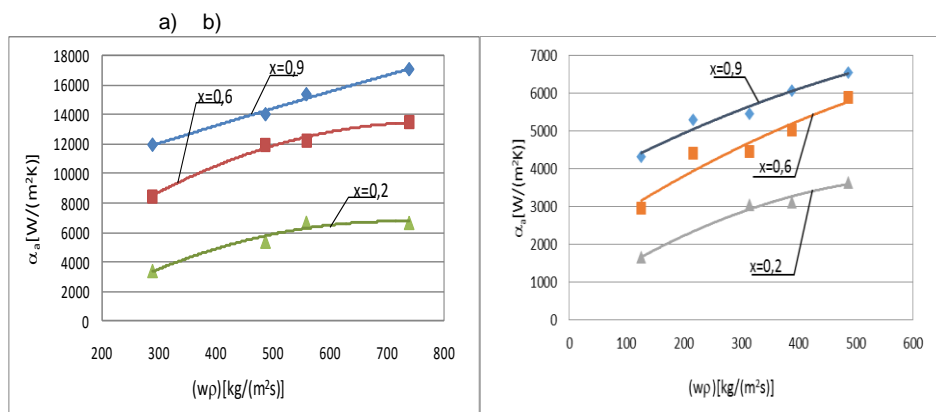
Przedmiotem badań eksperymentalnych były dwa pęczki minikanalów rurowych (*multiports*) o konstrukcji pokazanej na rysunku 9. Pęczek minikanalów rurowych o nazwie MULTI-4 składał się z 4 minikanalów rurowych ze stali nierdzewnej o średnicy wewnętrznej $d_w = 0,64$ mm i długości $L = 100$ mm. W przypadku pęczka rurowego MULTI-8 zastosowano 8 minikanalów rurowych o tej samej średnicy wewnętrznej i długości.[10]



Rys. 9. Schemat wymiarowy badanych pęczków minikanalów: a) MULTI-4, b) MULTI-8.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Na rysunku 10 przedstawiono przykładowe wyniki badań w zakresie wymiany ciepła podczas skraplania w sekcjach wielokanałowych skraplaczy kompaktowych. Zwrócono uwagę na rozwiązania konstrukcyjne, w których występują multiporty, składające się z różnej ilości minikanatów, oraz na zastosowany w badaniach czynnik chłodniczy.



Rys. 10. Wyniki badań eksperymentalnych zależności średniego współczynnika przejmowania ciepła α_a od gęstości strumienia masy czynnika $(w\rho)$, dla $x_{sr} = \text{const}$, dla a) multiportu 4x0,64 mm dla czynnika R407C, b) multiportu 8x0,64 mm dla czynnika R407C.

Podane wyniki badań eksperymentalnych przedstawiają wartości współczynnika przejmowania ciepła podczas skraplania czynnika chłodniczego R407C w minikanalach rurowych. Wartość tego współczynnika zależy nie tylko od wartości średnicy wewnętrznej d minikanalu rurowego, ale również od gęstości strumienia masy $(w\rho)$, lokalnego stopnia suchości x oraz od ilości kanałów.

Istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań i opracowania zależności empirycznych opisujących opory przepływu oraz współczynnik przejmowania ciepła podczas skraplania czynników chłodniczych w minikanalach rurowych. Ma to duże znaczenie w procesie optymalizacji i projektowania zminiaturyzowanych układów chłodniczo-klimatyzacyjnych.

Podsumowanie

Konstrukcje kompaktowych wymienników ciepła zbudowanych na bazie minikanatów zawierają elementy multiportów, które tworzą podstawową powierzchnię wymiany ciepła. Aktualny stan wiedzy w zakresie wymiany ciepła i oporów przepływu podczas przemian fazowych czynników chłodniczych w multiportach jest zdecydowanie niezadawalający. Należy więc nadal prowadzić prace badawcze w tym zakresie, zarówno teoretyczne jak i eksperymentalne. Pomoże to w skuteczniejszym stosowaniu ich w chłodzeniu urządzeń elektronicznych.

Znajomość średnich wartości współczynnika przejmowania ciepła i oporów przepływu podczas przemian fazowych czynników chłodniczych w multiportach ma istotne znaczenie dla projektantów tego typu miniwymienników. Lepsze rozpoznanie mechanizmów przenoszenia energii podczas przemian fazowych w multiportach powinno obejmować ich ocenę lokalną, w zależności od zmiany stopnia suchości x_{lok} , jak i globalną w całym zakresie procesu wrzenia oraz skraplania. Należy również prowadzić badania dla konstrukcji mikroportów z kanałami o różnych przekrojach poprzecznych.

Literatura

1. Baummer T., Cetegen E., Ohadi M., Dessiatoun S.: *Force fed evaporation and condensation utilizing advanced microstructured surfaces and microchannels*, Microelectronics Journal, 2008, vol. 39, No. 7, s. 975 – 980.
2. Obhan C.B., Garimella S.: *A comparative analysis of studies on heat transfer and fluid flow in microchannels*. Microscale Thermophys, 2001, vol. 5, No. 4, s. 293 – 311.
3. Bohdal T., Charun H., Kuczyński W.: *Investigation of the condensation process in the mini-systems of compressor refrigerating systems*. Proc. of Conference COMPRESSORS'2009, s. 1 – 8.
4. Mehendale S.S., Jacobi A.M., Shah R.K.: *Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design*. Applied Mechanics Reviews 2000, vol. 53, nr. 7, s. 175 – 193.
5. Kandlikar S.G.: *Microchannels and minichannels – history, terminology, classification and current research needs*. First International Conference on Microchannels and Minichannels 2003, New York.
6. Garimella S., Agarwal A., Killion J.D.: *Condensation pressure drop in circular microchannels*. Heat Transfer Engineering, 2005, vol. 26, s. 1-8.
7. Kandlikar S.G., Garimella S., Li D., Colin S., King M.R.: *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*. Elsevier 2006.
8. Bohdal T., Charun H.: *Problemy badawcze skraplania czynników chłodniczych w minikanalach*. Chłodnictwo 2010, R. 45, nr 3, s. 8-15
9. Ghiaasiaan S.M.: *Two m- phase flow, boiling and condensation in conventional and miniature systems*. Cambridge University Press 2008.
10. Bohdal T., Charun H., Sikora M., Kuczyński P.: *Skraplanie czynników chłodniczych w miniwymiennikach ciepła*. XLIII Dni Chłodnictwa 2011, nr 2, s. 7-17
11. <http://www.komputerswiat.pl/testy/sprzet/zestawy-do-chlodzenia-procesora/2008/07/test-zestawow-do-chlodzenia-procesora.aspx>

Autor: mgr inż. Paweł Kruczyński; Katedra Techniki Ciepłej i Chłodnictwa, Politechnika Koszalińska, ul. Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin,
e-mail: pawel.kruczynski@op.pl