CHEMIA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CHEMISTRY
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-Ch/2012
ZESZYT 17
ROK 109
ISSUE 17
YEAR 109

ALEKSANDER PABIŚ*, ANGELIKA KOSZUT**

RURKI CIEPŁA – ZASADA DZIAŁANIA, BUDOWA, ZASTOSOWANIA

HEAT PIPES – PRINCIPLE OF OPERATION, CONSTRUCTION, APPLICATIONS

Streszczenie

W artykule przedstawiono zasadę działania rurek ciepła, ich odmiany konstrukcyjne, zakres stosowalności oraz przegląd zastosowań.

Słowa kluczowe: rurki ciepła, kondensacja, odparowanie, wymiana ciepła

Abstract

The principle of operation, the construction types, the range of use as well as a large review of possible applications of het pipes has been presented in this paper.

Keywords: heat pipes, condensation, vaporization, heat transfer

* Dr inż. Aleksander Pabiś, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

** Inż. Angelika Koszut, studentka II stopnia Studiów Stacjonarnych Magisterskich, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Rurki ciepła należą do urządzeń, które powstały jako wynik dążenia człowieka do intensyfikacji wymiany ciepła. Transport ciepła z ośrodka o wyższej temperaturze, w którym znajduje się jeden koniec, rurki ciepła, do ośrodka o niższej temperaturze, w którym umieszczony jest jej drugi koniec odbywa się za pośrednictwem odpowiednio dobranej cieczy, częściowo wypełniającej rurkę, odparowującej z jednej strony i skraplającej się z drugiej. Ciepło zmiany stanu skupienia wielokrotnie przekracza strumień ciepła transportowanego między tymi ośrodkami, na drodze przewodzenia przez pręty o tych samych wymiarach co rurka ciepła, wykonanych nawet z najlepszych przewodników ciepła, takich jak miedź czy aluminium. Według badań własnych różnica temperatur ścianki na końcach rurki miedzianej o długości 290 mm i średnicy 8 mm wyniosła w jednej z serii pomiarowych 48°C, natomiast w przypadku rurki ciepła różnica ta nie przekraczała 2°C. Podobny przykład podaje S. Rossomme w swojej pracy [1]. Strumień ciepła, równy 20 W przewodzony przez cylindry: aluminiowy i miedziany, o długości 500 mm i średnicy 12,7 mm, generował różnice temperatur między ich końcami, równe odpowiednio: 300°C i 200°C. Natomiast w miedzianej rurce ciepła z wodą, o analogicznych wymiarach, różnica temperatur nie przekraczała 6°C.

Po raz pierwszy proces cyklicznej zmiany stanu skupienia wody wrzącej w parę nasyconą suchą i odwrotnie, w zamkniętym obiegu opatentował w 1836 r. Jacob Perkins. W 1944 r. opublikowany został patent R.S. Gauglera na temat zastosowania rurki ciepła w chłodnictwie. Dopiero jednak w latach 60. XX wieku rozpoczęto zaawansowane badania tych urządzeń w Los Alamos Laboratory w USA, pod kątem ich wykorzystania w statkach kosmicznych.

Tam też w 1963 r. G.M.Grover zgłasza patent dotyczący rurek ciepła, a w roku 1964 publikuje wraz z współpracownikami pracę pod tytułem *Very High Thermal Conductance*. Rok później T.P. Cotter publikuje raport LA-3246 zatytułowany *Theory of Heat Pipes* wieńczący badania w laboratorium Los Alamos.

Od tego czasu zakres zastosowań rurek ciepła został znacznie rozszerzony. Poza przemysłem kosmicznym stosowane są w lotnictwie, klimatyzacji, chłodzeniu i ogrzewaniu, w elektronice do chłodzenia podzespołów elektronicznych, w medycynie, a także w kolejnictwie i transporcie rurociągowym i drogowym na obszarach, gdzie ujemne temperatury występują przez większą część roku.

2. Zasada działania

Rurka ciepła jest to szczelnie zamknięta rurka lub pojemnik o innym kształcie, w której wewnętrzna przestrzeń wypełniona jest częściowo cieczą, dobraną w zależności od temperatury pracy rurki. Jej wewnętrzna powierzchnia pokryta jest najczęściej strukturami kapilarnymi, od wzdłużnych rowków począwszy, a na warstwach porowatych skończywszy. Wzdłuż długości rurki wyróżnia się trzy charakterystyczne strefy:

– pierwsza – do której dostarczane jest ciepło powodujące odparowanie cieczy,
– druga (adiabatyczna) – w której odbywa się transport ciepła bez wymiany z otoczeniem,
– trzecia – w której ciepło oddawane jest na zewnątrz a para w rurce ulega skropleniu.

Skropliny przemieszczają się pod wpływem sił kapilarnych w strukturze porowatej (zwanej knotem), w kierunku przeciwnym do ruchu pary. Zgodnie z równaniem Laplace-Young ciśnienie kapilarne wynosi:

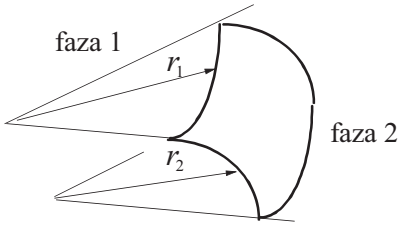
$$p_{kap} = p_p - p_c = \sigma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \sigma \cdot K \tag{1}$$

gdzie:

σ – napięcie powierzchniowe na granicy ciecz–para, N/m,
r_1, r_2 – główne promienie krzywizny powierzchni międzyfazowej, m,
K – krzywizna powierzchni międzyfazowej, m^{-1}.

Różnica ciśnienia kapilarnego między strefami parowania p_p i kondensacji p_c pozwala na przepompowywanie skroplin w kierunku przeciwnym do ruchu pary.

Promienie krzywizny powierzchni międzyfazowej wyznaczone przez kształt por zależą od wielkości i struktury kapilarnej i od minimalnego kąta kontaktu cieczy z powierzchnią.



Rys. 1. Schemat ideowy powierzchni międzyfazowej ciecz–para

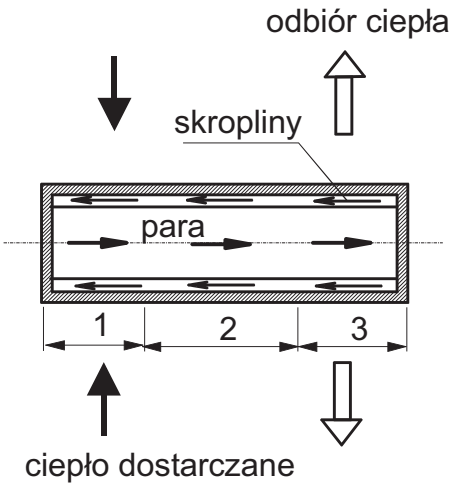
Fig. 1. Schema of liquid-vapor interphase surface

Charakterystyczną cechą rurki ciepła jest brak mechanicznego wspomagania transportu zarówno skroplin, jak i pary.

Temperatura fazy parowej jest ściśle związana z jej ciśnieniem nasycenia, a ponieważ powstająca różnica ciśnienia w parze jest znikomo mała, rzędu 1 Pa, to transport energii cieplnej z parą można uznać za prawie izotermiczny. Te izotermiczne warunki przepływu pary przyczyniają się do osiągania bardzo wysokiej sprawności przy transportowaniu energii cieplnej między końcami rurki ciepła w porównaniu z przewodzeniem ciepła przez zwykłą rurkę lub pręt. Na rys. 2 przedstawiono zasadę działania rurki ciepła, w której wewnętrzna powierzchnia pokryta jest strukturą kapilarną.

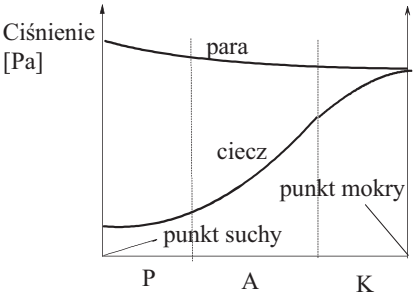
Prawidłowe funkcjonowanie rurki ciepła jest możliwe pod warunkiem, że różnica ciśnień, jaka może powstać w strukturze porowatej między strefą kondensacji i odparowania $\Delta p_{\text{kap.max}}$, będzie większa lub równa sumie różnic ciśnień pary Δp_p i cieczy wrzącej Δp_c między punktami „mokrym” i suchym”.

Punkt „mokry” występuje w miejscu, w którym różnica między ciśnieniem pary i ciśnieniem cieczy jest najmniejsza. Zakłada się często, że różnica ta równa się zero (menisk płaski). Z kolei w punkcie „suchym” różnica tych ciśnień jest największa. Zmiany ciśnień pary i cieczy przedstawiono na rys. 3.



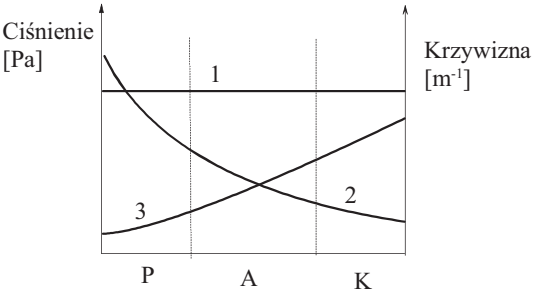
Rys. 2. Zasada działania rurko ciepła: 1 – strefa odparowania, 2 – strefa adiabatyczna, 3 – strefa kondensacji

Fig. 2. Principle of operation of heat pipe: 1 – vaporization zone, 2 – adiabatic zone, 3 – condensation zone



Rys. 3. Zmiana ciśnienia cieczy i pary wzdłuż rurki ciepła: P – strefa odparowania, A – strefa adiabatyczna, K – strefa kondensacji

Fig. 3. Variation of pressure of liquid and vapor along heat pipe: P – vaporization zone, A – adiabatic zone, K – condensation zone



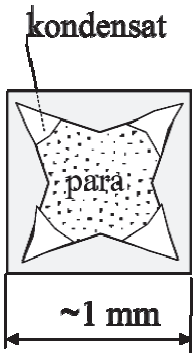
Rys. 4. Zależność między zmianami krzywizny powierzchni międzyfazowej i gradientem ciśnienia w fazie ciekłej: P – strefa odparowania, A – strefa adiabatyczna, K – strefa kondensacji, 1 – ciśnienie pary nasyconej, 2 – krzywizna powierzchni międzyfazowej ciecz–para, 3 – ciśnienie cieczy w strukturze kapilarnej

Fig. 4. Dependence between curvature of interphase surface and pressure gradient in liquid phase: P – vaporization zone, A – adiabatic zone, K – condensation zone, 1 – saturation pressure, 2 – the curvature of the liquid-vapor interface, 3 – the pressure of the liquid in the capillary structure

Z pewnym przybliżeniem można założyć, że faza parowa ma stałe ciśnienie wzdłuż całej rurki ciepła. Natomiast wzrost krzywizny powierzchni międzyfazowej między strefą kondensacji i strefą odparowania powoduje powstanie gradientu ciśnienia w fazie ciekłej (kondensat), co obrazuje rys. 4.

Termosyfonowe rurki ciepła

Znane są też rurki ciepła pozbawione struktury kapilarnej na ich wewnętrznej powierzchni. Nazywane są termosyfonowymi rurkami ciepła (rys. 5). Mogą pracować wyłącznie w pozycji pionowej lub pochylonej, by umożliwić spływ kondensatu pod wpływem siły ciężkości.

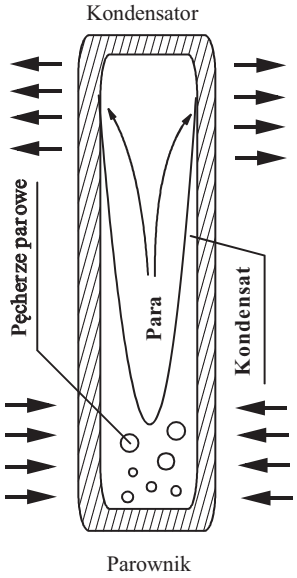


Rys. 6. Przekrój poprzeczny mikrorurki

Fig. 6. Cross-section of micropipe

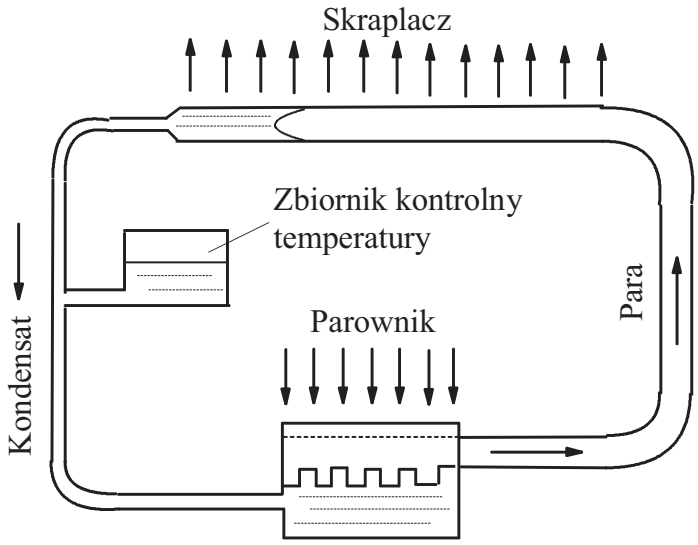
Mikrorurki ciepła

Specyficzną grupę stanowią mikrorurki ciepła produkowane w postaci płaskich płytek lub zestawu cienkich rurek. Ich średnice wahają się od kilkudziesięciu do kilkuset mikrometrów, a długości od kilku do kilkudziesięciu milimetrów. Zaczęto je stosować w połowie lat 80. XX wieku. Wykorzystywane są między innymi do chłodzenia w laptopach oraz do odprowadzania ciepła w samolotach odrzutowych [2, 3]. Przekrój poprzeczny mikrorurki o boku 1 mm przedstawiono na rys. 6.



Rys. 5. Schemat ideowy termosyfonowej rurki ciepła

Fig. 5. Scheme of thermosiphon heat pipe



Rys. 7. Zasada działania zamkniętego obiegu dwufazowego z transportem kapilarnym cieczy

Fig. 7. Principle of operation of two-phase close cycle with capillary liquid transport

Rurki ciepła z cyrkulacyjnym obiegiem dwufazowym i kapilarnym transportem skroplin

W układach cyrkulacyjnych występują trudności w utrzymaniu ich stabilnej pracy, ale intensywność transportu ciepła jest wielokrotnie większa w porównaniu z klasycznymi rurkami ciepła z kapilarnym przenoszeniem kondensatu. Według [4] dla porównywalnych odległości między strefami skraplania i odparowania, maksymalny strumień ciepła przekazywany w rurce ciepła jest rzędu 1500 W, a w obiegu cyrkulacyjnym bez trudności można osiągnąć wartości rzędu 50 000 W.

Cyrkulacyjne obiegi dwufazowe są wykorzystywane między innymi w przemysłach: kosmicznym i lotniczym. Zasadę działania zamkniętego obiegu dwufazowego z kapilarnym transportem cieczy przedstawiono na rys. 7.

Rotacyjne rurki ciepła

W wirujących rurkach ciepła część siły odśrodkowej wykorzystywana jest do przepływu skroplin do parownika. W tym celu przekrój poprzeczny dostępny dla przepływu cieczy rośnie w kierunku od skraplacza do parownika. Pierwsze prace badawcze dotyczące rurek wirujących były zrealizowane przez Danielsa i Al.-Jumaily [5]. Badania przeprowadzone dla częstości obrotów 600 do 1000 obr/min wykazały możliwość wykorzystania takiego rozwiązania technicznego. Prace ich następców wykazały złożoność procesów związanych z fazą parową a także konieczność brania pod uwagę jej ściśliwości.

Rurki ciepła o zmiennym przewodnictwie

Istotą tego rozwiązania jest możliwość regulacji wielkości powierzchni wymiany ciepła w części kondensacyjnej dzięki obecności „korka" nieskraplającego się gazu. Gaz dobierany jest w taki sposób, aby temperatura pracy rurki ciepła była wyższa od jego temperatury krytycznej. Ogrzanie strefy odparowania powoduje odparowanie czynnika roboczego, który płynąc w kierunku strefy skraplania, przemieszcza nieskraplający się gaz do końcowej części skraplacza, zmniejszając tym samym jego roboczą część. Rurkom tego typu poświęcone są między innymi prace [6, 7].

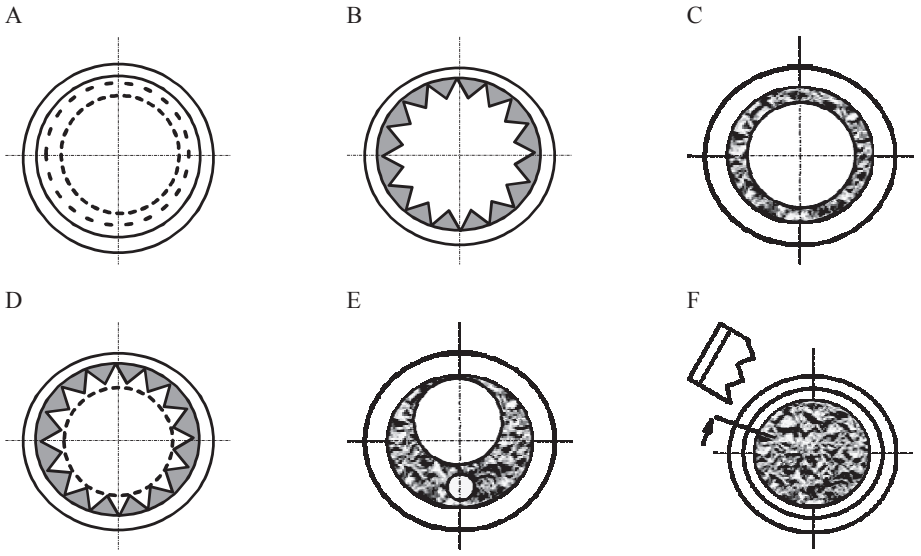
3. Rodzaje struktur kapilarnych

Istnieje szereg sposobów wykonania struktur kapilarnych w rurkach ciepła. Najczęściej spotykane są struktury wykonane z kilku warstw siatek, ze spiekanych proszków metalicznych oraz z wzdłużnymi rowkami. Pierwsze z nich są proste w wykonaniu, zapewniają wysokie ciśnienie kapilarne, ale wymiana ciepła nie jest zadowalająca.

Spieki metaliczne dzięki małym rozmiarom por zapewniają wysokie ciśnienie kapilarne i bardzo dobrą wymianę ciepła.

System z rowkami współosiowymi zapewnia dobre warunki termiczne, ale ciśnienie kapilarne nie zawsze wystarcza do przeciwdziałania sile grawitacji. Stosowane są różne profile rowków: prostokątne, trójkątne, trapezoidalne, półokrągłe itd.

Ponadto spotyka się połączenie rowków wzdłużnych z siatkami, spieków metalicznych z arteriami – głównie dla rurek wysokotemperaturowych wykorzystujących ciekłe metale, a także rurki z centralnym rdzeniem porowatym z rowkami promieniowymi. Obszerny przegląd struktur kapilarnych stosowanych w rurkach ciepła podano w pracy [8]. Przekroje rurek ze strukturami kapilarnymi przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Rodzaje struktur kapilarnych w rurkach ciepła: A – siatkowe, B – z rowkami wzdłużnymi, C – spiekane proszki metalowe, D – z rowkami wzdłużnymi i siatką, E – połączenie spieków metalicznych z arterią lub arteriami, F – centralny rdzeń porowaty z rowkami promieniowymi

Fig. 8. Kinds of capillary structures in heat pipes: A – net structure, B – structure with grooves along and net, E – combination of metal sinters with artery or arteries, F – central porous core with radial grooves

4. Ciecze robocze stosowane w rurkach ciepła

Wybór cieczy roboczej zależy głównie od wymaganego zakresu temperatur, w jakim ma pracować rurka ciepła. Teoretyczny zakres pracy cieczy roboczej powinien mieścić się między temperaturami: punktu potrójnego i krytyczna. W rzeczywistości zakres ten jest nieco mniejszy, w szczególności z uwagi na zmiany właściwości cieczy w pobliżu punktu potrójnego. Ciecz wypełniająca rurę ciepła, wg [8] powinna cechować się następującymi właściwościami:

– nie powinna wchodzić w reakcję z materiałem struktury porowatej i rurki,
– powinna być stabilna termicznie,
– powinna dobrze zwilżać strukturę kapilarną i ścianki,
– powinna mieć wysokie wartości ciepła przemiany fazowej,
– małą lepkość cieczy i pary,
– wysokie wartości napięcia powierzchniowego,
– wysokie wartości współczynnika przewodzenia ciepła,
– nie powinna zawierać żadnych wtrąceń ani zanieczyszczeń.

W tabeli 1 zestawiono wybrane ciecze robocze wykorzystywane w rurkach ciepła z podaniem zakresu temperatur, w jakich mogą pracować wg [9].

Z kolei w tabeli 2, wg [10], zestawiono dla kilku częściej stosowanych cieczy roboczych, ich wzajemne relacje z materiałami powłoki i struktury kapilarnej rurki ciepła.

Tabela 1

Wykaz wybranych cieczy roboczych w rurkach ciepła i zakresy temperatur pracy

Lp.	Ciecz robocza	Temperatura minimalna t_{min} [°C]	Temperatura maksymalna t_{max} [°C]
1	Hel	–271	–269
2	Azot	–203	–160
3	Amoniak	–60	100
4	Aceton	0	120
5	Metanol	10	130
6	Etanol	0	130
7	Woda	30	200
8	Toluen	50	200
9	Rtęć	250	650
10	Sód	600	1200
11	Lit	1000	1800
12	Srebro	1800	2300

Tabela 2

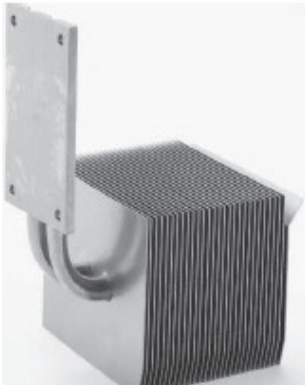
Wzajemne relacje między wybranymi cieczami roboczymi a rodzajem materiału obudowy rurek ciepła; C – kompatybilność, I – brak kompatybilności, C–H_2 kompatybilność z możliwością wydzielenia się H_2

	Materiał obudowy rurki ciepła					
Ciecz robocza	Al	Cu	Fe	Ni	Inox	Ti
Metan	C	C			C	
Amoniak	C		C	C	C	
Metanol	I	C	C	C	C	
Woda	I	C		C	C–H_2	C

5. Zastosowania rurek ciepła

Rurki ciepła są aktualnie na wyposażeniu praktycznie każdego statku kosmicznego czy satelity. Coraz częściej wykorzystywane są też do termicznej regulacji w samolotach wojskowych i cywilnych. Przykładowo rurki ciepła wykorzystano w samolocie myśliwskim piątej generacji F-35 Lightning II zmodyfikowanym w 2010 r. przez firmę Lockheed Martin. Od dawna wykorzystywane są w statkach kosmicznych NASA. Jedną z bardziej renomowanych firm produkujących szeroką gamę urządzeń cieplnych w tym rurki ciepła dla potrzeb wojska i odbiorców cywilnych jest Thermacore. Zaopatruje ona w swoje produkty między innymi: Boeing, DRS Technologies, Harris Corporation, Honeywell, Lockhed Martin, United Technologies Corporation i wiele innych.

Rysunek 9 przedstawia rurkę ciepła kontaktującą się ze źródłem ciepła za pośrednictwem płaskiej płytki i zaopatrzoną w zewnętrzne ożebrowanie w strefie kondensacji gdzie ciepło oddawane jest do atmosfery.

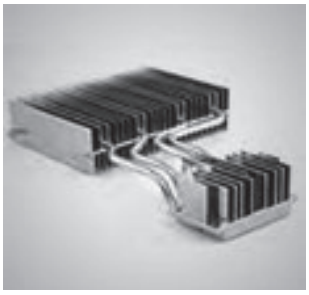


Rys. 9. Rurka ciepła odbierająca ciepło za pośrednictwem płaskiej płytki i rozpraszająca je do otoczenia w części pokrytej ożebrowaniem [11]

Fig. 9. Heat pipe with flat plate (heat collection) and with ribbing part (heat removal) [11]

Z kolei na rysunku 10 przedstawiono wymiennik z rurkami ciepła pozwalający na chłodzenie niewielkich powierzchni i na przemieszczenie ciepła odzyskanego na zewnątrz, np. poza osłonę nagrzewających się elementów.

W przypadku, gdy w obrębie elementów które mają być chłodzone, jest mało miejsca można wykorzystać rurki ciepła, w których strefa kondensacji pokryta ożebrowaniem zewnętrznym, jest znacznie odsunięta od ciasnego obszaru generującego energię cieplną. Taki przypadek przedstawiono na rys. 11. Urządzenie to znalazło zastosowanie między innymi do odbioru ciepła w systemach radarowych na statkach. Z uwagi na prostotę konstrukcji i niskie koszty jest idealnym rozwiązaniem również w szeregu innych zastosowań.



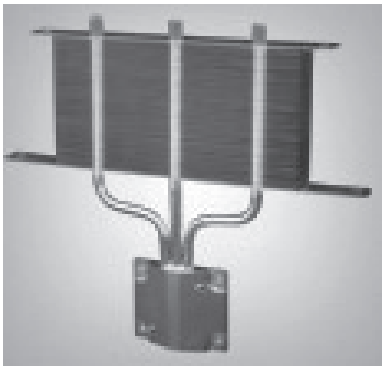
Rys. 10. Wymiennik z rurkami ciepła [11]

Fig. 10. Heat pipe heat exchanger [11]

Kolejny wymiennik z rurkami ciepła przedstawiony na rys. 12 jest stosowany w energoelektronice. Rurki ciepła są wprowadzone do płaskiej płyty, z której odbierają ciepło i transportują je do części zaopatrzonej w płaskie żebra. Ciepło oddawane jest do przepływającego powietrza. W przypadku wykonania rurek z ceramiki mogą one zapewnić izolację elektryczną do 9 kV.

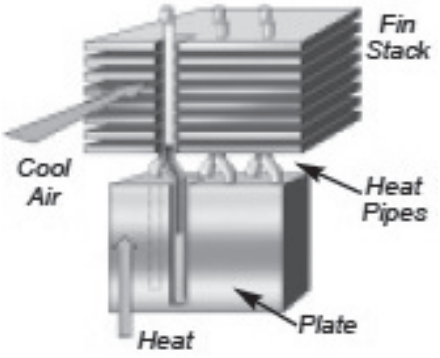
Wysokotemperaturowe rurki ciepła pracujące w zakresie 300°C do ponad 2000°C mają zastosowanie w:

- w statkach kosmicznych,
- w przemyśle chemicznym,
- w procesach wyżarzania,
- pozwalają na utrzymywanie stałej temperatury wykładziny pieca,
- w procesach wzrostu kryształów materiałów półprzewodnikowych,
- w procesie wydobycia ropy naftowej,
- w szerokim zakresie w nowoczesnej elektronice,
- do usuwania nadmiaru generowanego ciepła i do zapewnienia jednorodności strumieni cieplnych.



Rys. 11. Rurki ciepła wykorzystywane do odbioru ciepła w systemach radarowych [11]

Fig. 11. Heat pipe for heat collection in radar systems [11]



Rys. 12. Wymiennik z rurkami ciepła dla potrzeb energoelektroniki [11]

Fig. 12. Heat pipe heat exchanger for energoelectronics [11]

W życiu codziennym rurki ciepła wykorzystywane są w:
- laptopach,
- komputerach do chłodzenia procesorów,
- zasilaczach,
- wzmacniaczach,
- sprzęcie do gier komputerowych.

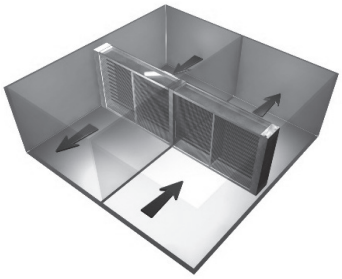
Na rys. 13 przedstawiono kolumnową chłodnicę procesora Hurricane NPH-105, zaopatrzoną w jedną centralną rurkę ciepła o średnicy 25,4 mm i wysokości 150 mm i dwie rurki ciepła o średnicy 6 mm każda. W celu lepszego odprowadzenia ciepła rurki posiadają ożebrowanie aluminiowe, wg [12].

Rys. 13. Kolumnowa chłodnica procesora z trzema rurkami ciepła [12]

Fig. 13. Column processor cooler with three heat pipes [12]

Wymienniki z rurkami ciepła znalazły również zastosowanie w systemach klimatyzacyjnych w budynkach mieszkalnych i użyteczności publicznej. Pobierają ciepło od nagrzanego w pomieszczeniach powietrza i oddają je do świeżego zimnego powietrza. Jako jedyne spośród różnych typów wymienników stosowanych w klimatyzacji, praktycznie nie posiadają wad. Ich zalety to:

– brak ruchomych części,
– wysoka sprawność,
– małe spadki ciśnienia przepływającego powietrza,
– brak zapotrzebowania na energię z zewnątrz,
– długi okres użytkowania,
– nie wymagają specjalnej obsługi i remontów.

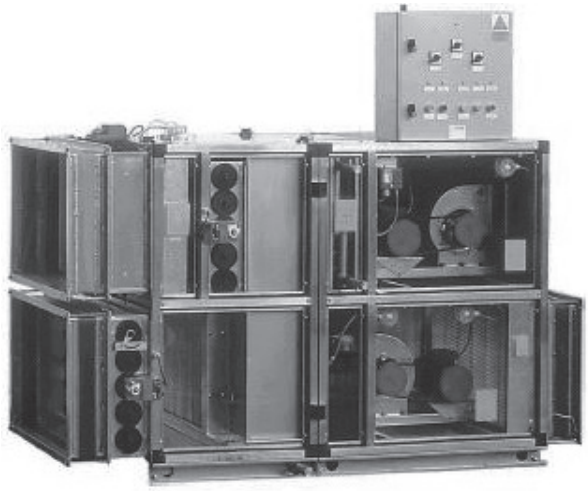


Rys. 14. Zasada działania wymiennika z rurkami ciepła w systemie klimatyzacyjnym domu [13]

Fig. 14. Principle of operation of heat pipes in air condition system [13]

Rurki ciepła w systemach klimatyzacyjnych mogą być usytuowane w zależności od potrzeby pionowo, poziomo lub pod dowolnym kątem. Na rys. 14 przedstawiono zasadę działania wymiennika z rurkami ciepła, a na rys. 15 zestaw do wentylacji z odzyskiem ciepła z powietrza odprowadzanego na zewnątrz w wymienniku z rurkami ciepła firmy Klimor [13].

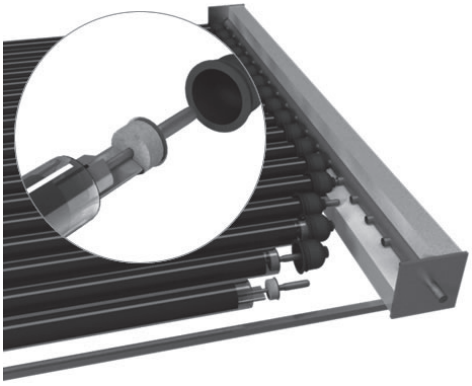
Rurki ciepła są również wykorzystywane w rurowych, próżniowych kolektorach słonecznych. Kolektor posiada od kilkunastu do kilkudziesięciu rur próżniowych. Rura próżniowa składa się z dwóch szklanych rur stopionych ze sobą. W zewnętrznej panuje próżnia chroniąca przed konwekcyjna ucieczką ciepła. Wewnętrzna rura szklana pokryta jest od strony próżni trójwarstwową powłoką absorpcyjną. Próżnia zapewnia doskonałą przenikalność promieniowania słonecznego do absorbera i minimalną emisję promieniowania cieplnego z nagrzanego absorbera do otoczenia.



Rys. 15. Zestaw do wentylacji z rurkami ciepła KZW-RC firmy KLIMOR [14]

Fig. 15. Set-up KLIMOR KZW-RC for ventilation with heat pipes [14]

Do wewnątrz rury solarnej wsunięte są aluminiowe radiatory i miedziane rurki cieplne które odbierają ciepło ze szklanego absorbera. W rurce cieplnej, w której panuje duże podciśnienie, znajduje się niewielka ilość niezamarzającego płynu, który paruje w temperaturze 25°C, co zapewnia pozyskanie energii słonecznej nawet w dni pochmurne. Wymiana ciepła zachodzi na drodze parowania i skraplania czynnika roboczego w rurce cieplnej. Wytworzona para ulega skropleniu w kondensatorze rurki cieplnej umieszczonym w wymienniku ciepła. Przez wymiennik ciepła przepływa pośredni czynnik grzewczy, który odbierając ciepło z kondensatora, powoduje skroplenie pary, a kondensat wraca do strefy odparowania i cały proces powtarza się od nowa [15].



Rys. 16. Fragment próżniowego kolektora słonecznego z rurkami ciepła [15]

Fig. 16. Part of vacuum solar collector with heat pipes [15]

Rurowe kolektory próżniowe są do 30% sprawniejsze od kolektorów płaskich w okresach wiosennym i jesiennym oraz do 60% sprawniejsze w okresie zimowym. Wykazują stały poziom absorpcji promieniowania w ciągu całego dnia, gdyż powierzchnia absorpcji nie zależy od kąta padania promieni słonecznych tak jak w kolektorach płaskich.

Do innych zastosowań rurek ciepła można zaliczyć:

– chłodzenie łożysk w pompach wodnych,
– chłodzenie oleju w silnikach,
– usuwanie oblodzenia na powierzchniach stawów rybnych,
– podgrzewanie wiaduktów i mostów,
– chłodzenie łopatek turbin gazowych.

Rurki ciepła wykorzystane zostały również do ochładzania gruntu i zabezpieczenia przed jego odmarznięciem a tym samym przed zapadnięciem się konstrukcji nośnej rurociągu transportującego ropę naftową z północy na południe Alaski. Na dystansie 1300 km zainstalowano 100 000 rur ciepła o średnicy 0,07 m i wysokości 8 do 18 m. Jako płyn roboczy został wykorzystany amoniak. Strefa skraplania rurek została zaopatrzona w ożebrowanie w celu zintensyfikowania odbioru ciepła przez powietrze atmosferyczne.

Podobne rozwiązanie zastosowali Chińczycy przy budowie trasy kolejowej do Tybetu, przebiegającej miejscami na wysokości ponad 4000 m. Wykorzystano rurki ciepła o wysokości 7 m, z czego 5,5 m znalazło się pod ziemią. Zastosowanie tego rozwiązania zapewniło stałą, ujemną temperaturę ziemi wokół torów kolejowych nawet w czasie odwilży [16].

Literatura

[1] Rossomme S., *Modélisation de l'évaporation des lms liquides minces, y compris au voisinage des lignes de contact: Application aux caloducs à rainures. PhD thesis*, Université libre de Bruxelles, Belgique 2008.

[2] Petersom G.P., *Overwiew of micro heat pipes research and development*, ASME Appl. Mech. Rev. 45 (5), 1992.

[3] Danielewicz J., *Rury cieplne w inżynierii środowiska*, Prace naukowe Instytutu Inżynierii i Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.

[4] Lefriec C., *Analise du fonctionnement des boucle diphasiques à pompage capillaire mené par experimentation d'une boucle à eau*, Thèse de doctorat de l'Université de Poitieres, ENESMA, Poitiers, 1997.

[5] Daniels T.C., Al Jumaily F.K., *Investigations of factors affecting the performance of a rotating heat pipe*, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol 18, 1975, 961-973.

[6] Hijikata K., Chen S.J., Tien C.L., *Non condensable gas effect on condensation in two phase closed thermosyphon*, Int. J. of Heat and Mass Transfer 27(8), 1984, 1319-1325.

[7] Allemagne K., Kawabata K., Niekawa J., Watanabe K., *Variable conductance heat pipe (VCHP) for cooling sodium-sulfur (NaS) batteries*, Xth Int. Heat Pipe Conference, Stuttgart 1997.

[8] Dunn P.D., Reay D.A., *Heat pipes*, Pergamon Press, 1976.

[9] Ivanova M., *Conception et réalisation de fonctions thermiques intégrées dans le substrat de composants électroniques de puissance. Apport de la gestion des flux thermiques par des mini et micro caloducs*, These de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble 2005.

[10] Chi S.W., *Heat Pipe Theory and Practice*, McGraw-Hill, 1976.

[11] Thermacore (http://www.thermacore.com – 10.04.2012).

[12] Cooling-masters (http://www.cooling-masters.com – 10.04.2012).

[13] Ventilox (http://ventilox.com – 11.04.2012).

[14] Klimor, katalog 2011 (http://klimor.pl, Katalog produktów, 2011 – 23.01.2012).

[15] Heliosin (http://www.heliosin.pl – 10.04.2012).

[16] Mechaniczny (http://www.mech.pg.gda.pl/ktc/wtargans/literatura/Jakobowski12.pdf – 2.04.2012).