

ALEKSANDER PABIŚ*, ANGELIKA KOSZUT, KAMILA SZUFNAROWSKA**

STANOWISKO DO OCENY INTENSYWNOŚCI
PRZEKAZYWANIA CIEPŁA
PRZEZ NISKOTEMPERATUROWE RURKI CIEPŁA

LABORATORY STAND-UP FOR HEAT TRANSFER
INTENSITY ASSESSMENT IN CASE
OF LOW TEMPERATURE HEAT PIPES

Streszczenie

W artykule przedstawiono podstawowe informacje o rurkach ciepła, opis stanowiska i metodykę realizowania pomiarów intensywności przekazywanego przez nie ciepła oraz wyniki zrealizowanych badań.

Słowa kluczowe: rurki ciepła, transport ciepła

Abstract

The basic information on heat pipes, a description of laboratory stand-up together with description of research of heat transfer intensity as well as obtained results have been presented in this paper.

Keywords: heat pipes, heat transfer

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

** Inż. Angelika Koszut, inż. Kamila Szufnarowska, studia II stopnia studiów stacjonarnych magisterskich, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

Oznaczenia

L	–	długość [m]
l_1	–	długość strefy kondensacyjnej rurki ciepła zanurzonej w chłodnej wodzie [m]
m	–	masa wody w zbiorniku [kg]
t	–	temperatura [°C]
t_{ms}	–	średnia temperatura ścianki rurki ciepła w strefie kondensacji [°C]
Δt_{msw}	–	średnia różnica temperatur między ścianką rurki a ogrzewającą się wodą [°C]
t_{mwo}	–	średnia temperatura wody ogrzewanej odniesiona do całego czasu pomiaru [°C]
Δt_{wo}	–	przyrost temperatury ogrzewanej wody w czasie pomiaru [°C]
τ	–	czas [s]
$\Delta\tau$	–	całkowity czas pomiaru [s]

1. Wstęp

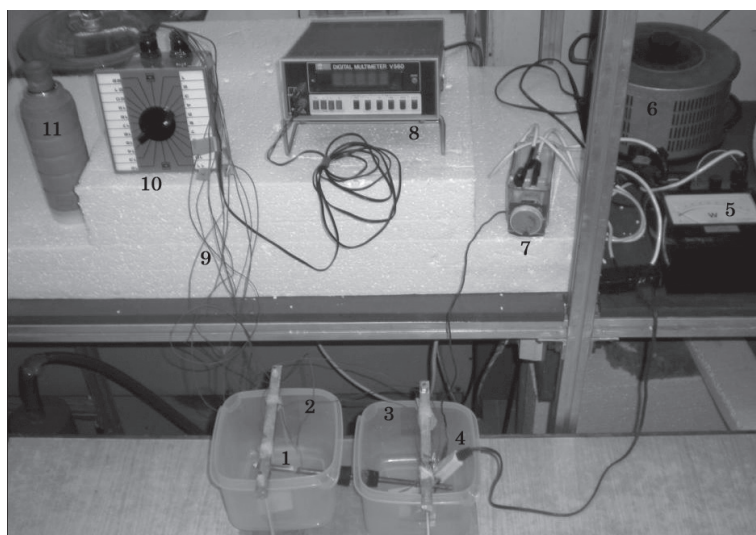
Jacob Perkins jako pierwszy opatentował w 1836 r. obieg zamknięty, w którym cyklicznie następowała zmiana stanu skupienia wody wrzącej w parę nasyconą suchą. Był to pierwowzór rurki ciepła. Byłby jednak mocno zdziwiony, widząc dzisiejsze, szerokie zastosowanie swego pomysłu. Rurki ciepła stosowane są obecnie w: przemyśle kosmicznym [1, 2], lotnictwie [3, 4], klimatyzacji [5, 6], technice solarnej [7], elektronice, w tym do chłodzenia procesorów w komputerach PC i laptopach [8].

Rurki ciepła znalazły również zastosowanie do utrzymywania stałej, ujemnej temperatury ziemi, nawet w czasie odwilży, wokół torów linii kolejowej wytyczonej do Tybetu, biegnącej miejscami na wysokości 4000 m [9]. Lista zastosowań rurek ciepła jest znacznie dłuższa. Dodatkowe, obszernie informacje na ten temat można znaleźć między innymi w pracach [10–12]. Mnogość zastosowań powoduje że miesięcznie wytwarza się na Świecie miliony rurek ciepła o różnej wielkości, kształcie i zakresie pracy.

Przy tak wielkiej produkcji mogą zdarzać się rurki o parametrach pracy odbiegających od prezentowanych w prospektach i katalogach. Stąd też pomysł wykonania stanowiska do testowania własności cieplnych tych urządzeń.

2. Opis stanowiska

W pracy wykorzystano dwie wersje stanowiska do badania niskotemperaturowych rurek ciepła. W pierwszej wersji przedstawionej na rys. 1 wykorzystano dwa naczynia z polietylenu o pojemności 2 dm³ każde, mogące magazynować ciecze o temperaturze do 110°C. W prowadzonych pomiarach wykorzystywano wodę destylowaną w przedziale temperatur od 18 do 75°C. W naczyniu – 2 magazynowano wodę destylowaną o temperaturze otoczenia, która w trakcie pomiarów nagrzewała się ciepłem odbieranym w strefie kondensacji rurki ciepła. Z kolei w naczyniu – 3 znajdowała się woda destylowana ogrzewana grzałką elektryczną – 4 o maksymalnej mocy 500 W, do zadanej, stałej temperatury, wyższej od temperatury otoczenia, oddając ciepło do badanej rurki ciepła w jej strefie odparowania.



Rys. 1. Zdjęcie stanowiska badawczego bez izolacji

Fig. 1. Laboratory stand-up without insulation

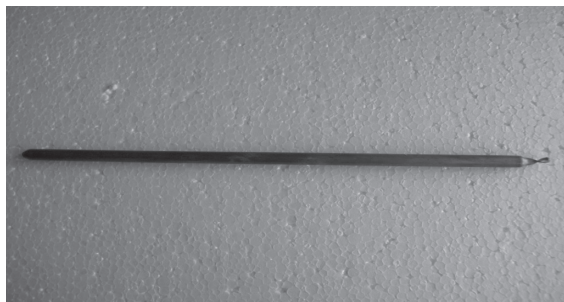
Moc grzałki elektrycznej regulowano pokrętkiem autotransformatora – 6 i odczytywano na skali watomierza – 5. Stałą temperaturę wody w naczyniu – 3 uzyskiwano wykorzystując regulator temperatury – 7 połączony z czujnikiem temperatury zanurzone w wodzie wypełniającej to naczynie.

Badana rurka ciepła – 1 wprowadzona była do obu naczyń przez otwory wywiercone w ich bocznych ścianach. Dwa korki gumowe nasunięte na rurkę zapewniały szczelność połączenia. Naczynia ustawione były na różnych poziomach, tak by zapewnić kąt pochylenia rurki 15° w stosunku do poziomu.

W celu oceny temperatur: powierzchni rurki ciepła, wody w obu naczyniach oraz otoczenia wykorzystano termoelementy miedź–konstantan – 9. Termoelementy podłączono do przełącznika – 10. Termoelement odniesienia (tzw. zimny koniec) był zanurzony w termosie – 11 wypełnionym mieszaniną wody destylowanej z lodem. Do pomiaru wygenerowanych napięć wykorzystywano multimetr numeryczny – 8. Przeprowadzone cechowanie wykorzystywanych termoelementów i znajomość relacji między zmierzonym napięciem i temperaturą pozwoliło określać każdorazowo mierzone temperatury.

W pomiarach wykorzystano miedzianą rurkę ciepła firmy Enertron [13] o zewnętrznej średnicy 8 mm, długości 300 mm, pokrytą od wewnątrz warstwą proszku spiekającego rolę tzw. knota oraz wypełnioną nieznaną ilością wody zdeminalizowanej. Zgodnie z informacją producenta rurka ta może być wykorzystywana w zakresie temperatur od 15 do 150°C . Na rurce przylutowano cztery termoelementy, po dwa w każdej strefie (kondensacji i parowania). Rurkę ciepła przed przylutowaniem termoelementów przedstawia rys. 2.

W celach porównawczych przeprowadzono również pomiary z wykorzystaniem zwykłej rurki miedzianej zaślepionej na końcach o identycznych wymiarach jak rurka ciepła. Temperaturę jej powierzchni w obu naczyniach również mierzono za pośrednictwem termoelementów.



Rys. 2. Rurka ciepła wykorzystana w pomiarach

Fig. 2. Heat pipes used in tests

Zmieniano też położenie strefy odparowania rurki ciepła, a umieszczając naczynie z grzałką wyżej lub niżej w stosunku naczynia z zanurzoną w nim strefą kondensacji tej rurki. Druga wersja stanowiska różniła się tylko sposobem dostarczenia ciepła do części rurki, w której następowało odparowanie. Zamiast zbiornika – 3 wypełnionego wodą zastosowano grzałkę elektryczną z regulacją mocy grzania, nasuniętą na część rurki ciepła. Ta część rurki wraz z grzałką została dokładnie zaizolowana. Pozwoliło to na pracę z wyższymi temperaturami i obniżyło niepotrzebne straty do otoczenia. Druga strona rurki, podobnie jak poprzednio była zanurzona naczyniu – 2 z wodą, ogrzewającą się ciepłem skraplania czynnika w rurce.

2. Metodyka i zakres pomiarów

Pomiary na pierwszej wersji stanowiska realizowano wg następującego schematu:

- napełniano termos mieszaniną wody destylowanej z pokruszonym lodem i zanurzano w niej termoelement odniesienia,
- zbiornik, który miał być ogrzewany ciepłem dostarczanym przez rurkę ciepła lub rurkę miedzianą napełniano wodą destylowaną w temperaturze otoczenia, o objętości $1,5 \text{ dm}^3$,
- w osobnym naczyniu ogrzewano wodę destylowaną do zadanej temperatury i wlewano $1,5 \text{ dm}^3$ do zbiornika z grzałką,
- ustawiano żadaną wartość temperatury na regulatorze temperatury,
- włączano zasilanie grzałki elektrycznej,
- odnotowywano czas w momencie okresowego włączenia i wyłączenia grzałki elektrycznej oraz temperatury: powierzchni rurki ciepła lub zwykłej rurki miedzianej, wody w jednym i drugim naczyniu oraz otaczającego powietrza,
- czas serii pomiarowej wahał się od około 1 do 3 godzin.

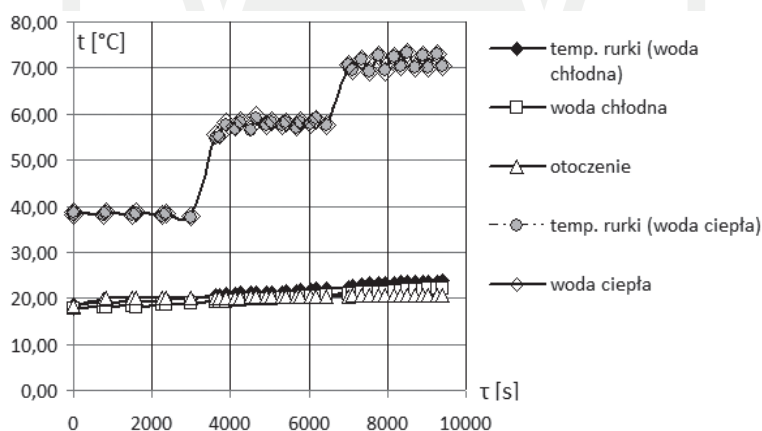
Metodyka postępowania na zmodyfikowanym stanowisku była podobna, z tą różnicą, że naczynie z wodą nagrzewaną grzałką elektryczną zastąpiono grzałką bezpośrednio nasuniętą na część rurki ciepła i dokładnie zaizolowano. Pozwoliło to na uzyskiwanie znacznie wyższych temperatur na ściankach i wewnątrz rurki ciepła.

Przeprowadzone badania objęły:

- pomiary transportu ciepła z wykorzystaniem zwykłej rurki miedzianej od zbiornika z wodą gorącą o stałej temperaturze, umieszczonego poniżej, do zbiornika z wodą w temperaturze otoczenia, usytuowanego wyżej. Temperatury wody gorącej wynosiły odpowiednio: około 40, 60 i 70°C,
- analogiczne pomiary z wykorzystaniem rurki ciepła o tych samych wymiarach co rurka miedziana,
- pomiary z usytuowaniem zbiornika z grzałką powyżej zbiornika z wodą nagrzewaną przez rurkę ciepła,
- dwie serie pomiarowe na zmodyfikowanym stanowisku bez zbiornika z gorącą wodą, gdzie pomiary przeprowadzono w temperaturze ścianki rurki ciepła około 75 i 150°C.

3. Rezultaty wstępnych pomiarów

Pomiary potwierdziły spodziewaną wyższą intensywność transportu ciepła między dwoma zbiornikami wypełnionymi tą samą ilością wody, realizowanego za pośrednictwem rurki ciepła w porównaniu do zwykłej rurki miedzianej o analogicznych wymiarach. Obrazują to rysunki 3 i 4.

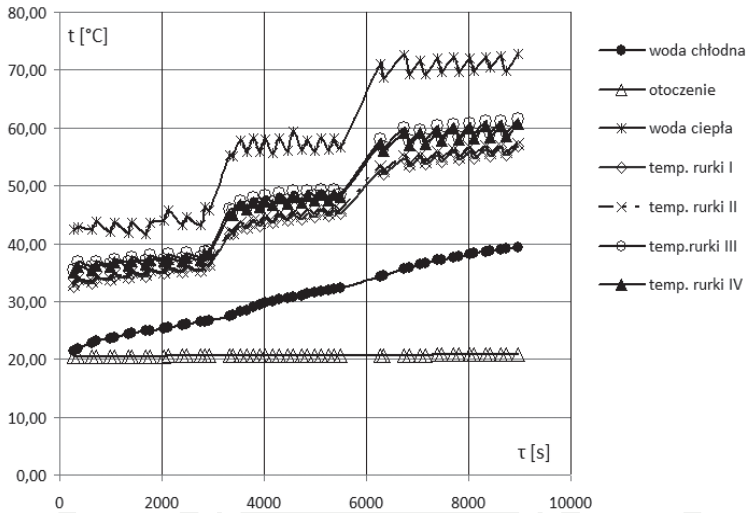


Rys. 3. Zmiany temperatur w czasie w przypadku rurki miedzianej łączącej zbiornik z wodą ciepłą ze zbiornikiem z wodą chłodną

Fig. 3. Temperature vs. time (copper pipe between warm and cold water containers)

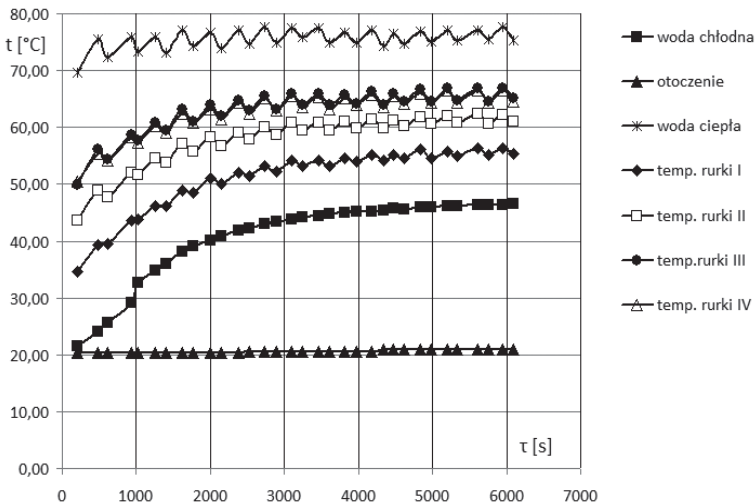
Na rysunku 3 przedstawiono zmiany temperatur w przypadku rurki miedzianej łączącej zbiornik z wodą ciepłą ze zbiornikiem z wodą chłodną. Dolne trzy krzywe reprezentują zmianę temperatur: wody chłodnej, ścianki rurki w niej zanurzonej oraz temperaturę otoczenia przy temperaturach wody ciepłej i ścianki rurki w niej zanurzonej rzędu 40°C, 60°C i 70°C.

Rysunek 4 przedstawia analogiczne zmiany temperatur dla przypadku, gdy oba zbiorniki połączone są rurką ciepłą. Przyrost temperatury nagrzewanej wody jest w tym przypadku znacznie większy, a rozbieżność temperatur między oboma strefami rurki znacznie mniejsza niż na poprzednim rysunku.



Rys. 4. Zmiany temperatur w czasie w przypadku rurki ciepłą łączącej zbiornik z wodą ciepłą ze zbiornikiem z wodą chłodną

Fig. 4. Temperature vs. time (heat pipe between warm and cold water containers)



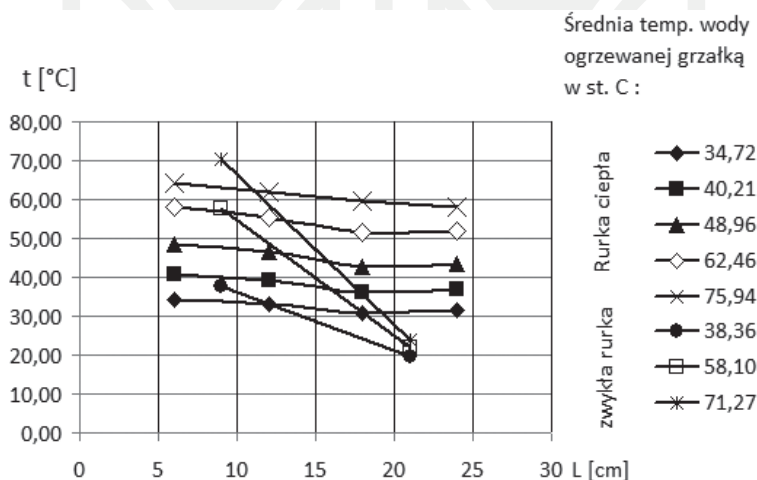
Rys. 5. Rozkład temperatur badanego układu w funkcji czasu

Fig. 5. System temperature vs. time

Temperatury oznaczone w legendzie wykresu cyframi I i II są wskazywane przez termoelementy przylutowane do powierzchni rurki ciepła w jej części kondensacyjnej, czyli w pojemniku z wodą chłodną ogrzewaną ciepłem skraplania. Z kolei temperatury oznaczone cyframi III i IV odnoszą się do części powierzchni rurki ciepła zanurzonej w wodzie cieplej ogrzewanej grzałką elektryczną.

Na kolejnym wykresie (rys. 5) przedstawiono wynik kolejnej serii pomiarowej, w której temperatura ciepłej wody utrzymywana była na średnim poziomie 75°C . Temperatury III i IV powierzchni ścianki rurki ciepła w strefie odparowania praktycznie pokrywają się natomiast wyraźniejsze różnice wystąpiły między wskazaniem termoelementów I i II w części kondensacyjnej rurki ciepła w zbiorniku z chłodną wodą.

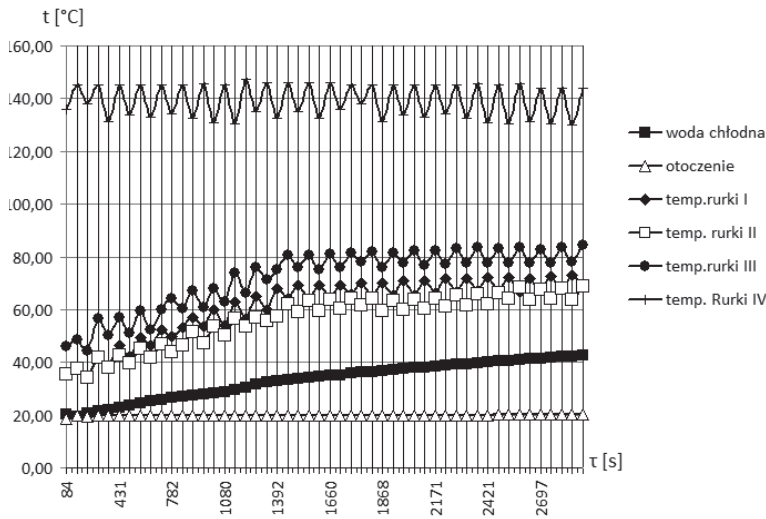
Różnice w rozkładzie temperatur wzdłuż rurki miedzianej i rurki ciepła obrazuje rys. 6. W zwykłej rurce miedzianej łączącej dwa środowiska o różnej temperaturze występuje znaczny gradient temperatury, wynikający z faktu, że ciepło transportowane jest głównie przez przewodzenie w miedzi, a konwekcyjny ruch ciepła wewnątrz jest pomijalnie mały. Z kolei temperatura powierzchni rurki ciepła zmienia się nieznacznie wzdłuż jej długości. Jest to efektem dwukrotnej zmiany stanu skupienia wody lub innej cieczy wypełniającej część rurki ciepła i utrzymywaniem prawie stałej temperatury w jej wnętrzu.



Rys. 6. Rozkład temperatur zewnętrznej powierzchni rurki ciepła i rurki miedzianej dla różnych temperatur wody w zbiorniku z grzałką elektryczną

Fig. 6. Distribution of temperatures of outer surfaces of heat pipe and cooper pipe for various water temperatures

Wykres na rys. 7 prezentuje wynik uzyskany na zmodyfikowanym stanowisku bez pojemnika z gorącą wodą przy nastawieniu na regulatorze temperatury 140°C . Rozkład temperatury w czasie na styku grzałki i ścianki rurki ciepła przedstawia górna krzywa na wykresie. Wzrost temperatury w zbiorniku z wodą chłodną o 20°C uzyskano w czasie o połowę krótszym w stosunku do poprzednich serii pomiarowych. Było to wynikiem wzrostu temperatury ogrzewania i minimalizacją strat ciepła od grzałki do otoczenia w porównaniu do zbiornika z gorącą wodą.



Rys. 7. Rozkład temperatur w czasie: grzałki, ścianki rurki ciepła i wody w naczyniu z wodą chłodną ogrzewaną ciepłem skraplania czynnika roboczego rurki. Ogrzewanie rurki ciepła realizowane grzałką nasuniętą na jej strefę odparowania

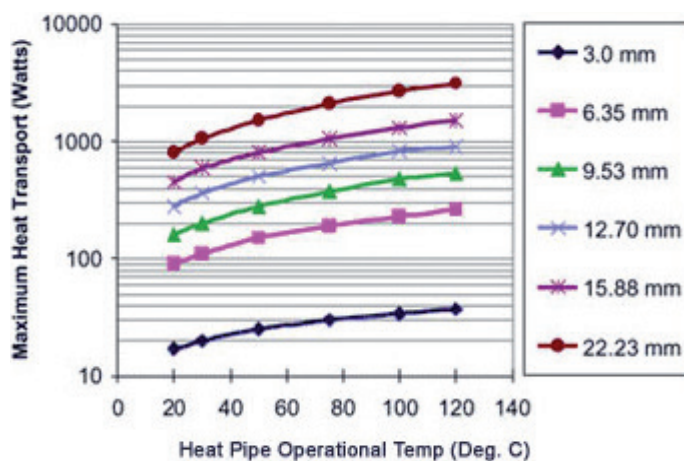
Fig. 7. Temperature vs. time for heater, heat pipe wall and water in vessel with cold water heated by heat pipe

Oprzyrządowanie stanowiska umożliwia określenie mocy grzałki zasilającej, regulację temperatury wody w zbiorniku z wodą gorącą, obliczenie współczynników wnikania ciepła między wodą i ściankami w obu naczyniach z odpowiednich równań kryterialnych dzięki znajomości temperatur wody i ścianki rurki ciepła lub zwykłej rurki miedzianej. Obliczone współczynniki wnikania ciepła uśrednione dla całego czasu trwania pomiaru lub chwilowe, w wąskich przedziałach czasowych pozwalają na obliczenie ilości ciepła przejmowanego lub oddawanego przez rurkę ciepła. Można również określić ilość ciepła pobieranego przez wodę w zbiorniku z wodą chłodną, wykorzystując równania bilansowe. Pozwala na to znajomość: masy wody zawartej w naczyniu, ciepła właściwego w średniej temperaturze wody oraz przyrostu temperatury wody w czasie pomiaru. Różnica między ciepłem wyliczonym na podstawie znanych wartości współczynnika wnikania ciepła, powierzchni wymiany i różnicy temperatur między ścianką rurki i nagrzewaną wodą a ciepłem wyliczonym z równania bilansowego reprezentuje straty ciepła od wody do otoczenia.

Poniżej przedstawiono założenia i przykładowe wyniki obliczeń ilości przekazywanego ciepła od badanej rurki ciepła w strefie kondensacji oraz strat do otoczenia.

Założenia:

- objętość wody w zbiorniku – $V = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$,
- masa wody w średniej temperaturze – $m = 1,488 \text{ kg}$,
- długość kondensacyjnej strefy rurki ciepła zanurzonej w zbiorniku – $l_1 = 0,1375 \text{ m}$,
- średnica zewnętrzna miedzianej rurki ciepła – $d_z = 0,008 \text{ m}$,
- średnia temperatura wody ogrzewanej odniesiona do całego czasu ogrzewania, mierzona dwoma termoelementami – $t_{mwo} = 41,17^\circ\text{C}$,



Rys. 8. Zmiany maksymalnego strumienia ciepła w funkcji temperatury roboczej i średnicy rurek ciepła wg [13]

Fig. 8. Changes of maximum heat flux vs. process temperature and diameter of heat pipes

- przyrost temperatury wody ogrzewanej w czasie pomiaru $\Delta t_{wo} = 24,94^{\circ}\text{C}$,
- średnia temperatura ścianki rurki w strefie kondensacji, odniesiona do całego czasu ogrzewania, mierzona dwoma termoelementami $t_{ms} = 56,21^{\circ}\text{C}$,
- średnia różnica temperatur między ścianką rurki a ogrzewającą się wodą, odniesiona do całego czasu ogrzewania $\Delta t_{msw} = 15,04^{\circ}\text{C}$,
- czas prowadzenia pomiaru $\Delta \tau = 6381 \text{ s}$,
- średnia temperatura warstwy przyściennej wynosi $48,69^{\circ}\text{C}$ (dla tej temperatury wyznaczono właściwości wody),
- gęstość wody $\rho = 988,7 \text{ kg/m}^3$,
- współczynnik lepkości dynamicznej – $\eta = 5,515 \cdot 10^{-4} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$,
- współczynnik przewodzenia ciepła – $\lambda = 0,644$,
- współczynnik rozszerzalności objętościowej – $\beta = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$,
- $\text{Pr} = 3,529$.

Wyniki obliczeń:

- liczba Grashofa $\text{Gr} = \frac{d_z^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (t_{ms} - t_{mwo})}{\eta^2} = 1,117 \cdot 10^5$,
- iloczyn $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$ $\text{Gr} \cdot \text{Pr} = 394033,5$ dla takiej wartości tego iloczynu wykorzystano równanie kryterialne w postaci:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d_z}{\lambda} = 0,54 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} = 13,53$$

stąd współczynnik wnikania ciepła $\alpha = 1089,9 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$,

- strumień ciepła $\dot{Q} = \alpha \cdot \pi \cdot d_z \cdot l_1 \cdot \Delta t_{msw} = 56,616 \text{ W}$,

- ilość ciepła dostarczonego przez rurkę w czasie trwania serii pomiarowej $Q = \dot{Q} \cdot \Delta\tau = 355919,6 \text{ J}$,
- ilość ciepła wykorzystana do ogrzania wody o $\Delta t_{m\dot{s}w}$ wyznaczona z równania bilansowego $Q_b = m \cdot c \cdot \Delta t_{wo} = 155841,27 \text{ J}$,
- strumień ciepła $\dot{Q}_b = Q_b / \Delta\tau = 24,42 \text{ W}$,
- straty ciepła do otoczenia $Q_{str} = Q - Q_b = 200078,3 \text{ J}$.

Uzyskany strumień ciepła odbiega dość znacznie od danych katalogowych rurek ciepła zawartych na stronie internetowej [13]. Z rysunku 8 wynika że strumień ciepła oddawanego przez rurkę ciepła o średnicy 0,008 m przy temperaturze rurki około 56°C, powinien wynosić około 200 W, gdy tymczasem z przytoczonych obliczeń wynika, że uzyskano zaledwie 56,6 W, a więc wartość 3,5-krotnie niższą.

4. Wnioski

Przedstawione w opracowaniu stanowisko do oceny intensywności przekazywania ciepła przez niskotemperaturowe rurki ciepła, pomimo swej prostoty w pełni nadaje się do tego celu. Zarówno pierwsza, jak i druga jego wersja pozwalają na weryfikację danych katalogowych rurek ciepła o niewielkich wymiarach w zakresie temperatur roboczych do 150°C, a po zamontowaniu grzałki o większej mocy, również do wyższych temperatur.

Pomiary porównawcze transportu ciepła między dwoma zbiornikami z wodą o różnej temperaturze, z wykorzystaniem rurki ciepła i zwykłej rurki miedzianej, potwierdziły spodziewaną wyższość rurki ciepła, w której czynnik roboczy dwukrotnie zmienia stan skupienia, pobierając, a następnie oddając ciepła przemiany fazowej, znacznie przewyższające strumień ciepła przekazywanego w drodze przewodzenia wzdłuż ścianek zwykłej rurki miedzianej.

Stanowisko stwarza możliwość określania strumieni ciepła dostarczanych do rurki ciepła i odbieranych od niej a także ocenę strat do otoczenia.

Mogą to być średnie strumienie ciepła określone dla całkowitego czasu pomiaru, ale też cząstkowe ilości ciepła lub strumienie odpowiadające okresowym czasom włączania i wyłączania się grzałki elektrycznej.

Przykład obliczeniowy zaprezentowany w rozdziale piątym wykazał sporą rozbieżność między danymi katalogowymi badanej rurki ciepła a rzeczywistą wartością strumienia ciepła oddawanego przez rurkę, co powinno skłaniać potencjalnego użytkownika rurek ciepła do traktowania z pewną rezerwą informacji zamieszczanych w prospektach i katalogach przez producentów tych urządzeń.

Literatura

- [1] Roukis J. i inni, *Heat pipe applications for space vehicles*, Grumman Aerospace, AIAA paper, 1971, 71-412.
- [2] Katzoff S., *Heat pipe and vapour chambers for thermal control of spacecraft*, AIAA Paber 67-310, April 1967.

- [3] Petersom G.P., *Overview of micro heat pipes research and development*, ASME Appl. Mech. Rev. 45 (5), 1992.
- [4] Danielewicz J., *Rury cieplne w inżynierii środowiska*, Prace naukowe Instytutu Inżynierii i Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [5] Ventilox (<http://ventilox.com> – 11.04.2012).
- [6] Klimor, katalog produktów (<http://klimor.pl>, Katalog produktów, 2011 – 23.01.2012).
- [7] Heliosin (<http://www.heliosin.pl> – 10.04.2012).
- [8] Cooling-Masters (<http://www.cooling-masters.com> – 10.04.2012).
- [9] Cheng G. i inni, *A roadbed cooling approach for the construction of Qinghai-Tibet railway*, Cold Reg. Sci. Technol., Vol. 42, 2005, 169-176.
- [10] Raey D.A., Kew P.A., *Heat Pipe*, Wyd. 5, Elsevier 2006.
- [11] Peterson J.P., *Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Application*, John Wiley and Sons, New York 1994.
- [12] Faghri A., *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor & Francis, 1994.
- [13] Enertron (<http://enertron-inc.com/idex.php> – 9.09.2012).

