

POLITECHNIKA WARSZAWSKA  
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

**LABORATORIUM TERMODYNAMIKI**

Ćwiczenie NR 5

**BADANIE NIEUSTALONEGO  
PRZEWODZENIA CIEPŁA**

Opracował:  
Dr inż. Maciej Tułodziecki

## Cel ćwiczenia

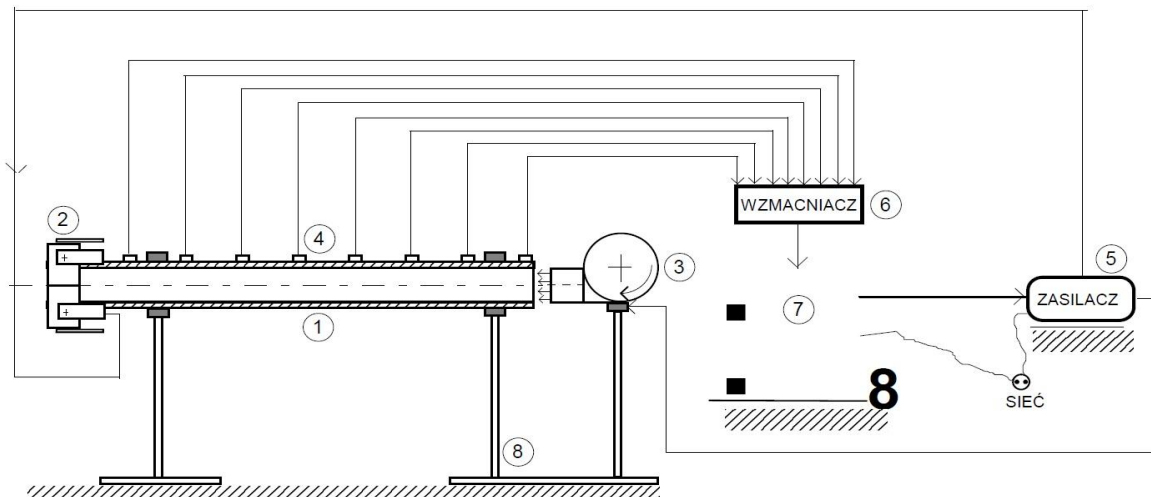
Celem ćwiczenia jest przeprowadzenie przykładowego bilansu cieplnego dla obiektu badań, jakim jest miedziana rurka w dowolnie wybranej chwili.

## Opis Doświadczenia

### 1. UKŁAD POMIAROWY

Schemat układu pomiarowego pokazano na rys.1.

Przewodnik w postaci rury miedzianej **1** zaopatrzone w *grzejnik elektryczny* **2** zabudowany na krańcu rury oraz *układ wentylacyjny* **3** umieszczony na przeciwnym krańcu. Wzdłuż rury umieszczono *osiem czujników temperatury* **4**. Ogrzewanie pręta jest sterowane przy pomocy *sterownika* **5**. Wyniki zbierane w postaci analogowej są zamieniane na postać cyfrową i kierowane do komputera przez *układ pomiarowy chwilowych temperatur* **6**. Sterowanie i gromadzenie wyników odbywa się pod kontrolą programu cyfrowego z poziomu komputera PC - **7**.



Rys.1 Schemat układu pomiarowego (wykonał dr inż. Jan Matej)

- 1 przewodnik w postaci rury miedzianej (długość ok. 400 mm,  $\varnothing$ 10 mm, grubość 1 mm)
- 2 grzejnik elektryczny
- 3 układ wentylacyjny
- 4 osiem czujników temperatury umieszczonych wzdłuż długości pręta co 50 mm
- 5 sterownik do zasilania grzejnika
- 6 układ pomiarowy chwilowych temperatur z poszczególnych nadajników
- 7 komputer klasy PC
- 8 wsporniki

## 2. WYKONANIE ĆWICZENIA

### Dla środowiska DOS

Wykonanie ćwiczenia polega na wprowadzeniu do komputera czasu trwania mocy nagrzewania oraz czasu trwania eksperymentu. Obserwujemy zjawisko przez maksimum 300 sekund, moc grzałki i czas trwania impulsu grzejnego określi prowadzący ćwiczenie. Grzałka umieszczona na końcu rurki wykorzystuje ciepło wydzielane przez umieszczone tam tranzystory mocy. Kształt impulsu służącego do wysterowania tranzystorów pochodzi z portu drukarkowego komputera (Centronix) i teoretycznie może przyjmować dowolny kształt wynikający z kolejnego włączania tranzystorów z określoną mocą i na określony czas. Oprogramowanie zastosowane do doświadczenia pozwala jedynie na uzyskanie impulsu prostokątnego o określonym czasie trwania, na jednym z 256 możliwych poziomów mocy. Przyjęcie wartości 256 oznacza maksymalną moc.

Po skonfigurowaniu pomiaru możemy przystąpić do jego wykonania. Po uruchomieniu funkcji pomiar włącza się grzałka, a sygnały z nadajników temperatury 1-8 trafiają do komputera wejściem szeregowym (RS 232).

Wyniki pomiarów ma postać następującej tabeli:

Czas	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
1								
2								

Tak zgromadzone wyniki wykonujący ćwiczenie zabierają w celu ich obrobienia. Dodatkowo możliwe jest obejrzenie przebiegów  $T(t)$  zarówno w czasie pomiaru jak i po jego zakończeniu.

Wyniki pomiarów w postaci wykresu należy wydrukować, aby to jednak uczynić należy od portu drukarkowego odłączyć sterownik grzałki (położenie przełącznika A) i dołączyć drukarkę (położenie przełącznika B)

**Wydruk wykresu z datą i podpisem prowadzącego stanowi integralną część protokołu i dowód odbycia ćwiczenia.**

### Dla środowiska Windows

Wykonanie ćwiczenia polega na uruchomieniu programu RURA2012 znajdującego się na pulpicie.

Pomiar uruchamia się klikając kolejno:

- start

Wybieramy plik, do którego zostaną zapisane wyniki. Jako nazwę należy podać numer zespołu.

- włączamy przełącznik drukarkowy w pozycję „A”

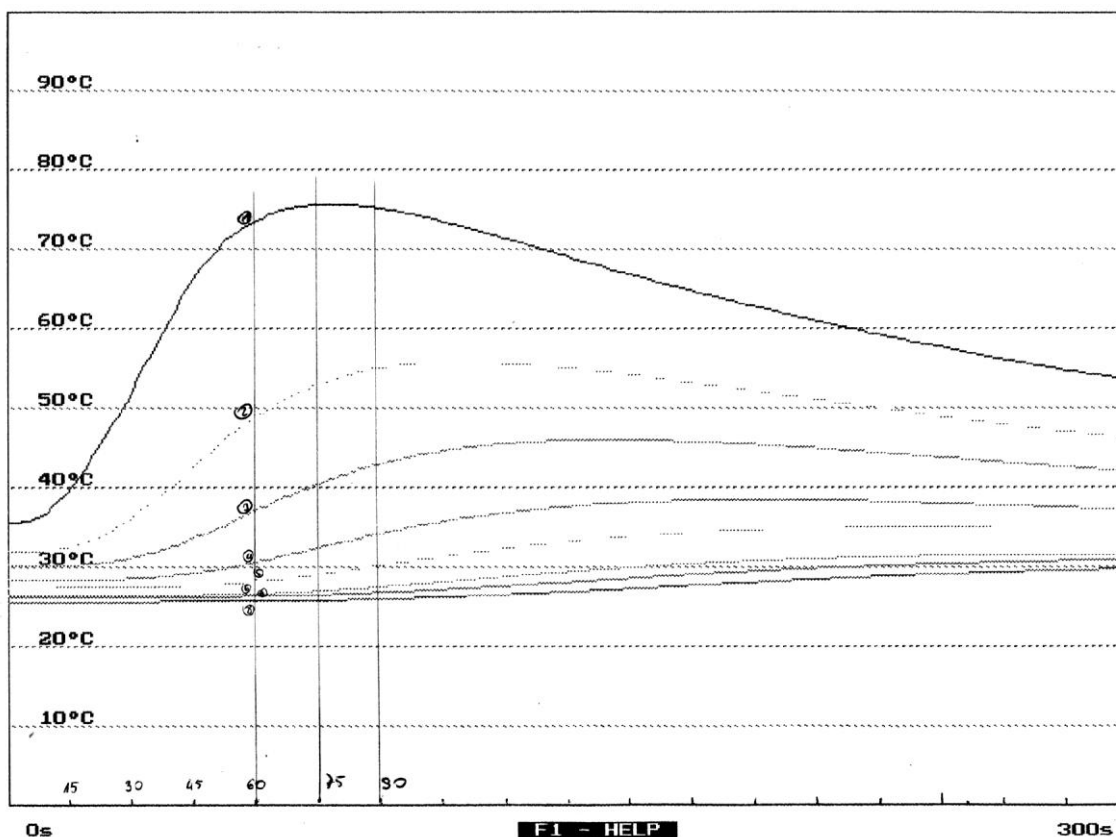
- klikamy OK

- czekamy 5 minut (300 sekund maksymalny czasu pomiaru), w tym czasie NIE DOTYKAĆ okienka, bo zrobi się białe, mimo że nadal działa. Po 5 minutach pomiar się kończy i TRZEBA ustawić przełącznik drukarkowy w pozycję „B”. Plik z wynikami należy zgrać na pamięć USB lub inny nośnik danych.

**Źródłowy plik danych pomiarowych stanowi dowód odbycia ćwiczenia i należy go przedstawić przy składaniu sprawozdania**

### 3. OPRACOWANIE WYNIKÓW

Przykładowy wykres przebiegu temperatury pokazuje rysunek nr 2

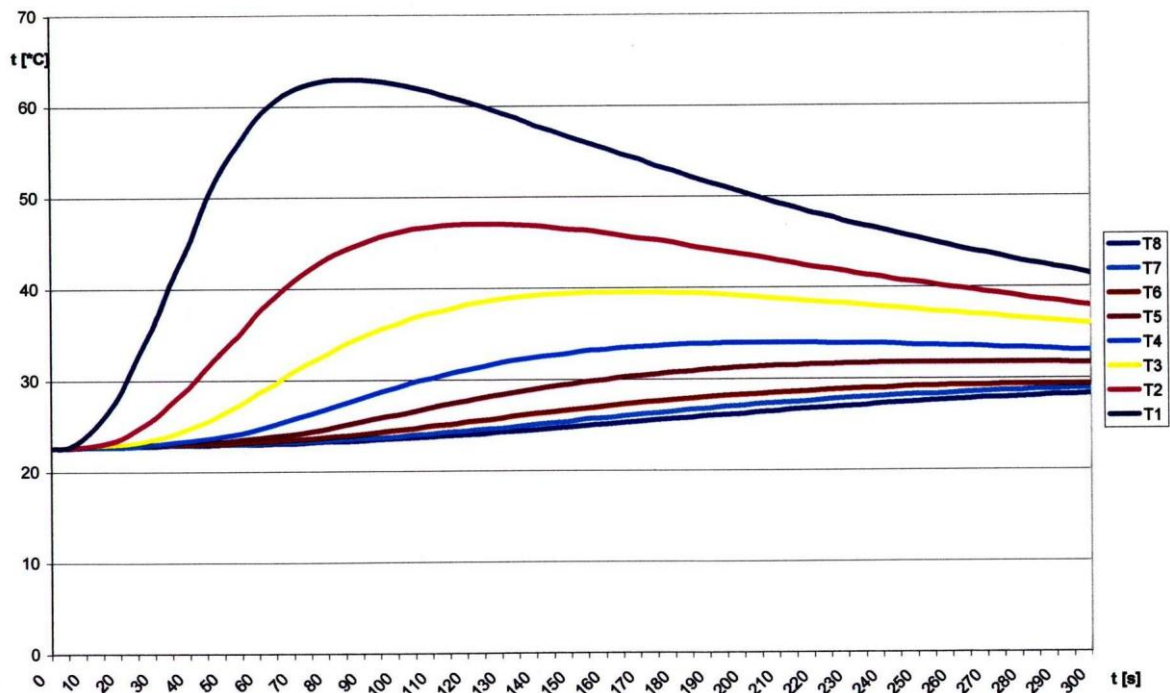


Rys. 2 Przykładowy wydruk wyników

Proszę zwrócić uwagę, że wartości temperatur na początku pomiaru w chwili  $t=0s$  nie mają jednakowej wartości, a powinny mieć. Może to oznaczać, że układ nie został dobrze wystudzony lub wynikać z niedokładnego cechowania czujników temperatury. Korzystając z zalet, jakie daje technika cyfrowa, możemy to łatwo skorygować przez odpowiednie przeliczenie wartości w tabeli wyników. Możemy sprowadzić wszystkie punkty początkowe przebiegów temperatury do wspólnej wartości np. najniższej występującej w chwili  $t=0s$ .

**Wykonanie tej czynności jest konieczne, dla prawidłowości dalszych wyników.**

Wykres po skorygowaniu wartości temperatur pokazuje rysunek 3

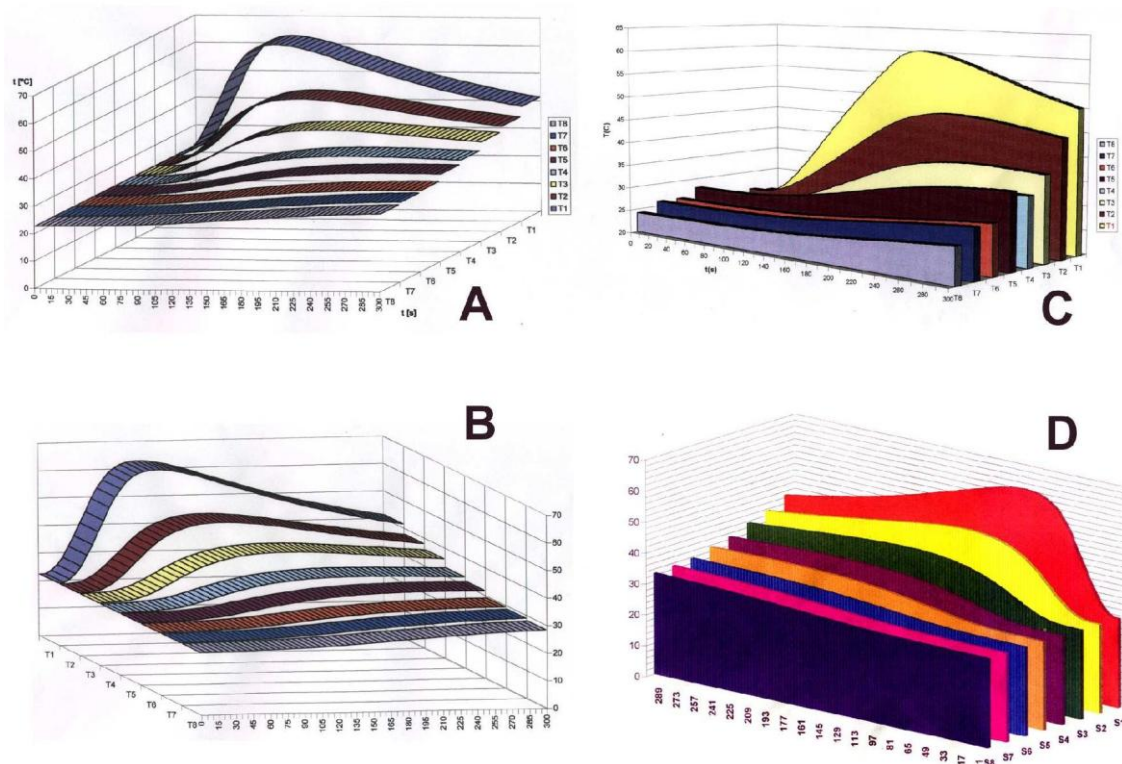


Rys.3 Wyniki eksperymentu po przecechowaniu.

Tak przekształconemu wykresowi w celu nadania mu bardziej poglądowej postaci należy nadać formę trójwymiarową  $T(x,t)$ .

Sposób doboru formy wykresu zależy wyłącznie od wykonujących sprawozdanie, i każdy rozsądny poparty uzasadnieniem przejaw inwencji w tej dziedzinie jest mile widziany. Rysunek 4 obrazuje przykładowe (proponowane przez P.T. Sprawozdawców) wykresy przestrzenne.

Wykres oznaczony literą C jest błędny, ponieważ przed jego sporządzeniem nie przeprowadzono korekcji i wykresy "startują" z różnych punktów. Wykresy A i B przedstawiają tę samą serię pomiarową. Oczywiście oznaczenie osi x może być po prostu w m (lub cm) i nie ma tu potrzeby uciekania się do innych oznaczeń\*.



Rys.4 Przykładowe wykresy przestrzenne  $T(x,t)$

Bilans ciepły badanej rurki:

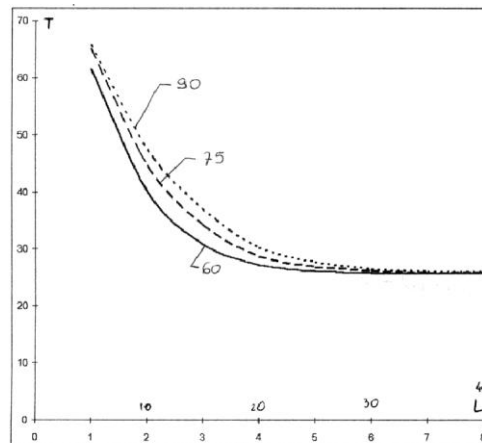
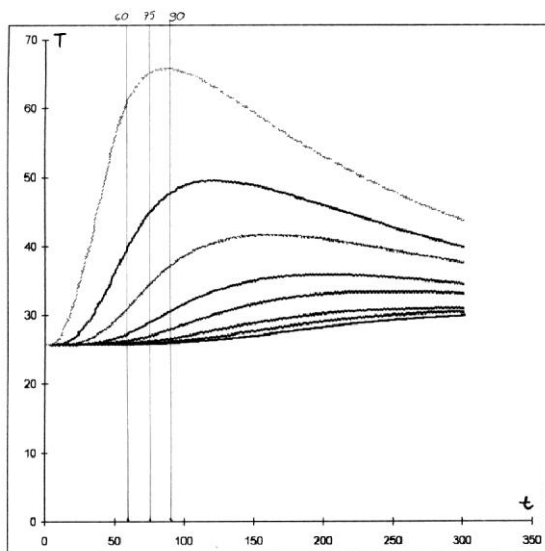
Z tego czego dokonaliśmy dotychczas jasno wynika, że chcąc przeanalizować bilans ciepły rurki w dowolnie wybranej chwili należy myślowo dokonać przekroju wykresu przestrzennego płaszczyzną  $t=t_1$  (na rysunku 1 wybrano kolejno  $t_1=60$ ,  $t_2=75$  i  $t_3=90$  s). Jak łatwo zauważyć, w takim przekroju otrzymamy wykres przypominający kształtem hiperbolę i odpowiadający przebiegowi zjawiska "zamrożonemu" w chwili  $t_1$  ( $t_2$  lub  $t_3$  itd.)

Rysunek 5 pokazuje zależność  $T(x)$  odpowiadające obserwacji zjawiska w trzech chwilach  $t=t_1$ ,  $t_2$  i  $t_3$

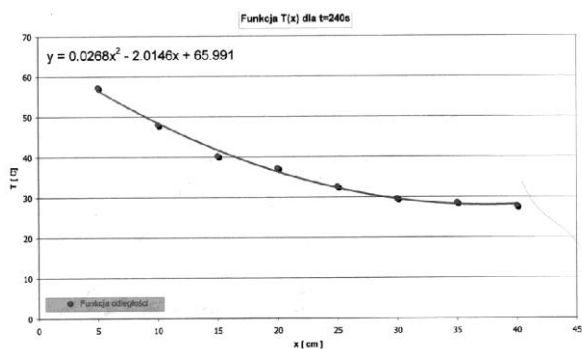
Oczywiście wybranej chwili obserwacji zjawiska odpowiada wiersz tabeli wyników zawierający liczbowe wartości  $T_1, \dots, T_8$ .

Dla przeprowadzenia dalszej analizy wygodnie byłoby mieć ten przebieg w postaci analitycznej, co nie stanowi problemu, jeśli znamy wartości liczbowe.

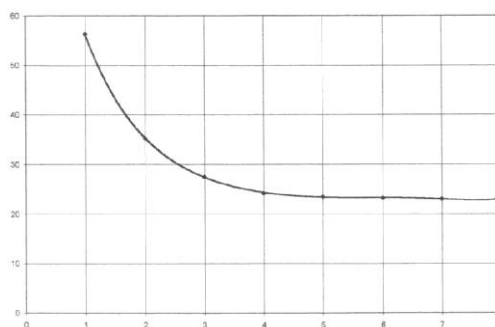
Aproksymacja może być wykonana dowolną metodą np. łamana, wielomianem itd. Wybór programu i metody jest dowolny, i powinien tylko znaleźć swoje odbicie we wnioskach z ćwiczenia. Rysunek 6 pokazuje takie przykładowe aproksymacje  $T(x)$  w postaci wielomianów.



Rys.5 Przebiegi czasowe  $T(t)$  z zaznaczonymi przekrojami  $t=60,75$  i  $90$  s i odpowiadające im zależności  $T(x)$  dla  $t= 60, 75$  i  $90$  s



$$y = 0,0039x^6 - 0,1158x^5 + 1,4243x^4 - 9,4492x^3 + 36,874x^2 - 83,466x + 111,02$$



Rys.6 Przykładowe wykresy zależności  $T(x)$  i aproksymujące je wielomiany.

Celem prezentacji rysunku 6 jest pokazanie, że do aproksymacji zależności wielomianem można użyć zarówno funkcji 2 stopnia jak i 6 stopnia, zależy to m in. od wyboru chwili obserwacji  $t = t_1$  (na początku zjawiska przebiegi są bardziej "strome"), w sprawozdaniu powinno być uzasadnienie dokonanego wyboru sposobu aproksymacji. Więcej ostrożności wymagane jest przy aproksymacji łamaną lub odcinkami wielomianów. Miejsca połączenia odcinków łamanej powinny się wtedy znajdować w środku pomiędzy punktami gdzie są położone nadajniki temperatury.

Możemy teraz przystąpić do analizy, co dzieje się w odcinku rurki pomiędzy punktami pomiarowymi  $x_i$  oraz sąsiednim  $x_{i+1}$

Źródłem ciepła na wlocie do odcinka jest sąsiadujący z nim odcinek położony między punktami pomiarowymi  $x_{i-1}$  oraz  $x_i$  Wymiana ciepła pomiędzy nimi odbywa się przez

Płaszczyznę przekroju położoną w punkcie  $x_i$ . Strumień ciepła przepływający przez tę powierzchnię wynika z prawa Fouriera i wynosi

$$\dot{Q}_1 = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT_1}{dx_1}$$

gdzie:

$\lambda$  - współczynnik przewodzenia

$A$  - pole powierzchni, przez którą przepływa strumień ciepła

Zwróćmy uwagę, że możemy obliczyć ile ten strumień wynosi, ponieważ znamy współczynnik przewodzenia dla miedzi  $\lambda$  i wartość pola przekroju  $A$ . Podobnie dzięki temu, że znamy analityczną postać funkcji  $T(x)$ , możemy obliczyć wartość pochodnej w punkcie  $x_i$ .

Analogiczne rozumowanie możemy przeprowadzić dla zjawiska przewodzenia w punkcie  $x_{i+1}$ , pamiętając, że szacujemy w ten sposób strumień  $Q_2$ , który określa ilość ciepła opuszczającą rozważany odcinek rurki drogą przewodzenia.

$$\dot{Q}_2 = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT_2}{dx_2}$$

Oczywiście ta ilość ciepła stanowi ilość napływającą do sąsiedniego odcinka pręta położonego między punktami  $x_i + 1$  a  $x_{i+2}$  i tak dalej.

Pewną trudność może (przy niektórych sposobach aproksymacji) stanowić pierwszy i ostatni odcinek rurki. W takim przypadku należy je pominąć uzyskując w ten sposób wartości dla 5 odcinków położonych w środku rurki. W większości przypadków da się bez kłopotu uzyskać 7 wartości.

Ponieważ rozpatrywana rurka zmienia swoją temperaturę w czasie, (bo proces jest nieustalony), zatem pochłania lub oddaje pewną ilość ciepła. Spróbujemy ją oszacować.

Ta ilość ciepła zależy od masy, ciepła właściwego i różnicy temperatur. W naszym przypadku weźmiemy pod uwagę różnicę temperatur w czasie, ponieważ de facto szacujemy strumień ciepła a nie ilość ciepła.

Masa odcinka rurki wynika z jej wymiarów i gęstości miedzi, ciepło właściwe znamy, pozostaje, zatem różnica temperatur. Ponieważ dysponujemy tabelą zawierającą wartości temperatur mierzone w poszczególnych punktach, wiemy, zatem, jaką temperaturę miał dany punkt sekundę wcześniej przed wyborem chwili analizy zjawiska  $t = t_1 - 1$  i jaką osiągnie sekundę później, czyli w chwili  $t = t_1 + 1$ . Te dane wystarczą do oszacowania, o ile ogrzał się odcinek pręta w czasie 1s w "otoczeniu" wybranej chwili czasu  $t = t_1$ .

$$\dot{Q}_3 = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$$

Ważne jest tu, aby przyrost temperatury odnieść do 1 sekundy, bo pozwoli to nadal operować strumieniem ciepła a nie ilością ciepła. Innymi słowy w miejsce  $\frac{dT}{dt}$  podstawiamy wielkość przyrostu temperatury  $\Delta T$ , jaki zaszedł w rozpatrywanym odcinku rurki w czasie 1 sekundy. Ponieważ może się zdarzyć, że w rozpatrywanym odcinku rurki początek i koniec nagrzał się w czasie 1s o inną wartość  $\Delta T$ , należy w takim przypadku dokonać uśrednienia.



Gdyby nie było strat to spełnione byłoby równanie

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$$

Straty występują, ponieważ rurka oddaje (lub pobiera) ciepło otoczeniu drogą konwekcji. Równanie przyjmie, zatem postać.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_s$$

Wykorzystamy teraz znajomość  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  do oszacowania tych strat

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 - \dot{Q}_3$$

A ponieważ dysponujemy tymi wartościami dla siedmiu (co najmniej pięciu środkowych) odcinków rurki, to mamy wystarczająco dużo danych do sporządzenia wykresu  $Q_s(x)$ , czyli strumienia ciepła, jakie nasza rurka oddaje drogą konwekcji w funkcji odległości od źródła ciepła.

### **TEN WYKRES STANOWI CEL NASZYCH ROZWAŻAŃ**

Oczywiście takie rozważanie można przeprowadzić dla każdej z 300 zarejestrowanych chwilowych wartości temperatur. To jednak przekracza wymagany zakres sprawozdania.

SPRAWOZDANIE powinno, zatem zawierać:

Oryginalny wykres temperatury w zależności od czasu dla różnych odległości lub plik danych

Co najmniej 1 wykres przestrzenny  $T(x,t)$

Wykres  $Q_s(x)$  dla jednej wybranej chwili przebiegu zjawiska  $t=t_1$

WNIOSKI

### LITERATURA

[1] B.Staniszewski. Termodynamika. PWN

[2] J.Dowkontt. Teoria silników cieplnych. WKŁ