BADANIE NIEUSTALONEGO RUCHU CIEPŁA W CIAŁACH STAŁYCH

1. Wprowadzenie

Rozważamy przypadek nieustalonego ogrzewania lub oziębiania ciała, które na początku procesu ma jednakową temperaturę T_o w całej swojej masie, a które zostaje umieszczone w otoczeniu o stałej temperaturze T_∞ różnej od temperatury T_o .Czas potrzebny do tego, aby temperatura w określonym punkcie ciała osiągnęła inną wartość $T \neq T_\infty$ zależy od kształtu, wymiarów i własności fizycznych ciała. Jeżeli dwa elementy, o identycznych kształtach i wymiarach poddać ogrzewaniu lub oziębianiu w podobnych warunkach, to czas potrzebny do osiągnięcia takich samych zmian temperaturowych zależy jedynie od własności fizycznych ciał (gęstości, ciepła właściwego i cieplnego). Przepływ ciepła wewnątrz ciała jest zmienny w czasie a pole temperatur zmienia się w sposób ciągły.

Znajomość takich procesów jest potrzebna przy jednorazowym lub periodycznym podgrzewaniu czy chłodzeniu jakiegoś ciała. Celem obliczenia może być np. określenie czasu potrzebnego do nagrzania bloku metalowego wstawionego do pieca lub czasu nagrzewania ścian pieca czy innej aparatury o dużej pojemności w okresie rozruchu, wyznaczanie warunków potrzebnych , aby w odpowiednim czasie doprowadzić materiał do żądanej temperatury, np. w prasie z ogrzewanymi płytami , itp. Przede wszystkim zaś zasady nieustalonego ruchu ciepła są podstawą dokładniejszej analizy pracy tzw. regeneratorów ciepła.

Punktem wyjścia do rozważań nad przewodzeniem nieustalonym jest równanie różniczkowe Fouriera:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \qquad (1)$$

w którym T - temperatura,

τ - czas,

x - kierunek przepływu ciepła,

$a = \lambda / (\rho \, c_p)$ - współczynnik przewodzenia temperatury,

λ - współczynnik przewodzenia ciepła,

ρ - gęstość,

c_p - ciepło właściwe.

Równanie Fouriera (1) opisuje zmianę temperatury w czasie, w zależności od zmiany gradientu temperatury w przestrzeni (w tym wypadku wzdłuż osi x) przy jednokierunkowym przepływie ciepła. Jednoznaczne rozwiązanie równania różniczkowego (1) polega na znalezieniu takiej funkcji $T = f (x, \tau)$, która będzie jednocześnie spełniać i równanie różniczkowe i żądane warunki początkowo-brzegowe. Trudności matematyczne nie pozwalają wyjść poza przypadki uproszczone, do których należą:

a) płyta o bardzo dużej powierzchni, której krawędzie boczne są nieprzepuszczalne dla ruchu cie pła, albo stosunek ich powierzchni do powierzchni całej płyty jest bardzo mały;
b) walec, dla którego stosunek długości do średnicy jest tak duży, że wymiana ciepła odbywa się praktycznie tylko przez powierzchnię boczną;
c) kula.

Dla długiego walca o małej średnicy R równanie różniczkowe Fouriera ma postać:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right], \qquad (2)$$

w którym r - odległość rozpatrywanego punktu walca od jego osi. Warunki początkowe i brzegowe dla równania (2) są następujące:

$$T = T_0 \quad \text{dla } \tau \le 0 \ \text{ i } \ 0 \le r \le R,$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{dla } r = 0 \ \text{ i } \ \text{dowolnego } \tau,$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T - T_\infty) \quad \text{dla } \tau > 0 \ \text{ i } \ r = R.$$

Analiza rozwiązań równania Fouriera dla wymienionych wyżej przypadków wykazała, że wszystkie zmienne można zgrupować w postaci czterech modułów bezwymiarowych:

$$Y = \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_0}, \qquad n = \frac{r}{R}, \qquad m. = \frac{1}{Bi} = \frac{\lambda}{\alpha r}, \qquad Fo = \frac{a\tau}{r^2},$$

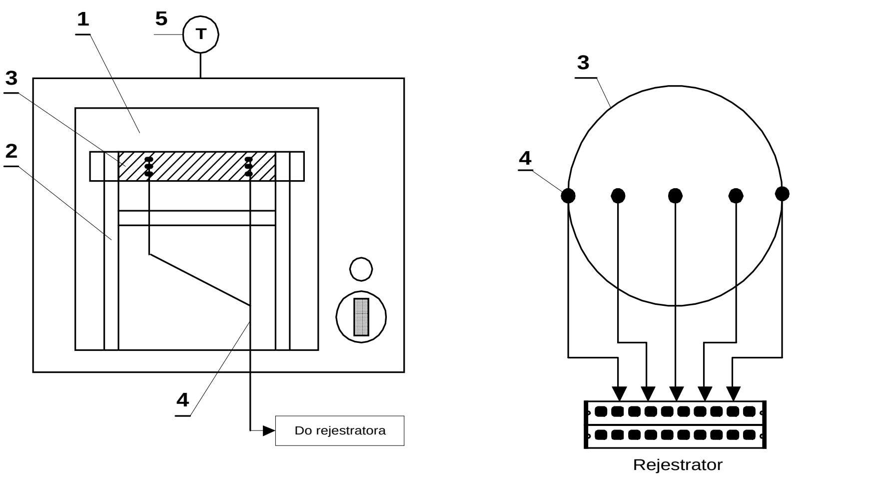
a rozwiązanie konkretnego przypadku można przeprowadzić w oparciu o zależność $Y = f(n, m., Fo)$. Dla celów praktycznych opracowano ją w formie danych tabelarycznych i wykresów, dostępnych w literaturze [1,2].

2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest doświadczalne wyznaczenie rozkładu temperatur w walcu jako funkcji czasu $T = f(r, \tau)$, w warunkach nieustalonego ogrzewania lub oziębiania. Na podstawie pomiarów należy wyznaczyć średnie wartości współczynników wnikania ciepła α do powierzchni walca i porównać je z wartościami obliczonymi z odpowiedniej korelacji dla konwekcji naturalnej.

3. Aparatura

Schemat aparatury pomiarowej przedstawia rys.1. Głównym jej elementem jest suszarka elektryczna o mocy 2,1 kW. W komorze suszarki 1 znajduje się wspornik 2, na którym umocowany jest wałek pomiarowy 3. W połowie długości wałka , w jego przekroju poprzecznym zainstalowane są czujniki termopar żelazo-konstantan 4, połączone z rejestratorem temperatury o działaniu ciągłym. Dwa czujniki mierzą temperaturę na powierzchni wałka, dwa w połowie jego promienia i jeden w osi. Wspornik z wałkiem jest elementem wymiennym. Pomiary wykonuje się dla jednego z trzech wałków: ze stali kwasoodpornej 1H18N9T, z aluminium i z drewna bukowego.
Wszystkie wałki mają długość L = 480 mm i średnicę d = 60 mm.



Rys. 1. Schemat aparatury badawczej i rozmieszczenie czujników temperatury,
1- komora suszarki, 2 - wspornik, 3 - wałek pomiarowy, 4 - termopary, 5 - termometr kontaktowy.

4. Metodyka pomiarów

Wykonanie pomiaru polega na :

a) włączeniu ogrzewania suszarki,
b) ustawieniu na termometrze kontaktowym żądanej temperatury,
c) włożeniu wspornika z wałkiem pomiarowym do suszarki po ustaleniu się w niej zadanej temperatury,
d) włączeniu rejestratora temperatury.

5. Opracowanie wyników

Sprawozdanie powinno zawierać następujące elementy:

1. Wykres zależności temperatury od czasu dla wszystkich czujników.
2. W układzie półlogarytmicznym wykres doświadczalnie wyznaczonej zależności $Y = f(Fo)$.
3. Wyznaczenie średnich wartości współczynników wnikania ciepła przy wykorzystaniu literaturowych wykresów $Y = f(n, m., Fo)$ dla walca oraz doświadczalnych wartości liczb bezwymiarowych Y, n i Fo.
4. Obliczenie współczynników wnikania ciepła na podstawie odpowiedniej korelacji dla konwekcji naturalnej.