

## Ćwiczenie 8

### POMIAR PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

#### 8.1. Podstawy teoretyczne

Przenoszenie energii cieplnej przez promieniowanie w próżni lub ośrodku gazowym między powierzchniami ciał stałych odbywa się za pomocą fal elektromagnetycznych, przy czym następuje tu dwukrotna zmiana postaci energii: cieplnej na elektromagnetyczną na powierzchni ciała wypromieniowującego ciepło i elektromagnetycznej na cieplną na powierzchni ciała pochłaniającego ciepło. Natężenie promieniowania ciała czarnego  $E_o$  dane jest wzorem

$$E_o = C_o \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (8.1)$$

gdzie:  $C_o$  – współczynnik promieniowania ciała czarnego równy  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ,

$T$  – temperatura bezwzględna powierzchni, [K].

Powierzchnie przegród i urządzeń grzewczych są ciałami szarymi; w odróżnieniu od ciał czarnych wypromieniowują mniej ciepła, a padający na nie strumień jest częściowo pochłaniany, a częściowo odbijany. Współczynniki pochłaniania i odbijania dla promieniowania monochromatycznego są sobie, zgodnie z prawem Kirchhoffa, równe i zawsze mniejsze od  $C_o$ , co opisuje zależność

$$C = \varepsilon C_o, \quad (8.2)$$

gdzie:  $C$  – współczynnik promieniowania powierzchni ciała szarego,

$\varepsilon$  – współczynnik absorpcji.

Współczynnik absorpcji zależy od długości fali promieniowania i kąta padania promieniowania na daną powierzchnię.

Własności absorpcyjne materiałów mogą być całkowicie różne w zależności od rozpatrywanego zakresu temperatur, przy czym promieniowanie dzieli się na:

- wysokotemperaturowe – promieniowanie słoneczne, około 6000 K,
- niskotemperaturowe – promieniowanie od przegród i urządzeń sanitarnych, około 300 K.

Promieniowanie nie pochłonięte przez powierzchnie materiału nieprzeźroczystego ulega odbiciu. Stosunek natężenia promieniowania odbitego do natężenia promieniowania padającego nazywa się współczynnikiem odbicia i oznacza przez  $p$ . Współczynniki odbicia i absorpcji dla materiałów nieprzeźroczystych są związane zależnością

$$p + \varepsilon = 1. \quad (8.3)$$

Rozpatrzona zostanie wymiana ciepła przez promieniowanie między dwoma powierzchniami  $F_1$  i  $F_2$ , przy czym przyjmować się będzie, że współczynnik absorpcji  $\varepsilon$  jest stały niezależnie od kąta padania. Jest to założenie ściśle dla kątów do  $60^\circ$ , wystarczy jednak do szacunkowej analizy wymiany ciepła. Ilość ciepła wymieniana przez promieniowanie z powierzchni  $F_1$  do powierzchni  $F_2$  (strumień ciepła) dana jest wyrażeniem:

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{1-2} C_o \varphi_{1-2} F_1 \left( \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right), \quad (8.4)$$

gdzie:  $\varepsilon_{1-2}$  – emisyjność zastępcza zależna od wymiarów i ustawienia powierzchni,

$\varphi_{1-2}$  – współczynnik konfiguracji,

$T_1, T_2$  – temperatury bezwzględne powierzchni  $F_1$  i  $F_2$ , [K].

Emisyjność zastępczą określa się według następujących wzorów:

- dla powierzchni o małych rozmiarach w porównaniu z wzajemną odległością
- $$\varepsilon_{1-2} = \varepsilon_1 \varepsilon_2, \quad (8.5)$$

- dla dwóch równoległych powierzchni mało oddalonych od siebie

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (8.6)$$

- dla powierzchni  $F_1$  objętej ze wszystkich stron powierzchnią  $F_2$

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (8.7)$$

Współczynnik konfiguracji  $\varphi_{1-2}$  (zwany również kątowym współczynnikiem promieniowania) określa część całego strumienia ciepła wypromieniowanego przez powierzchnię  $F_1$ , która pada na powierzchnię  $F_2$ . Przy wymianie ciepła przez promieniowanie między dwoma nieograniczonymi powierzchniami  $\varphi_{1-2} = \varphi_{2-1} = 1$ . Przy wymianie ciepła między elementem płaszczyzny  $dF_1$  równoległym do płaszczyzny nieograniczonej  $F_2$  współczynnik konfiguracji  $\varphi_{1-2} = 1$ .

Współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie jest to stosunek gęstości strumienia ciepłego przekazywanego z powierzchni  $F_1$  na powierzchnię  $F_2$  do różnicy temperatur tych powierzchni

$$\alpha_r = \frac{Q_{1-2}}{F_1(T_1 - T_2)} = \frac{q_{1-2}}{(T_1 - T_2)} = \frac{\varepsilon_{1-2} C_o \varphi_{1-2}}{(T_1 - T_2)} \left( \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right), \quad (8.8)$$

gdzie:  $\alpha_r$  – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie,  $[J/m^2 s K = W/m^2 K]$ ,

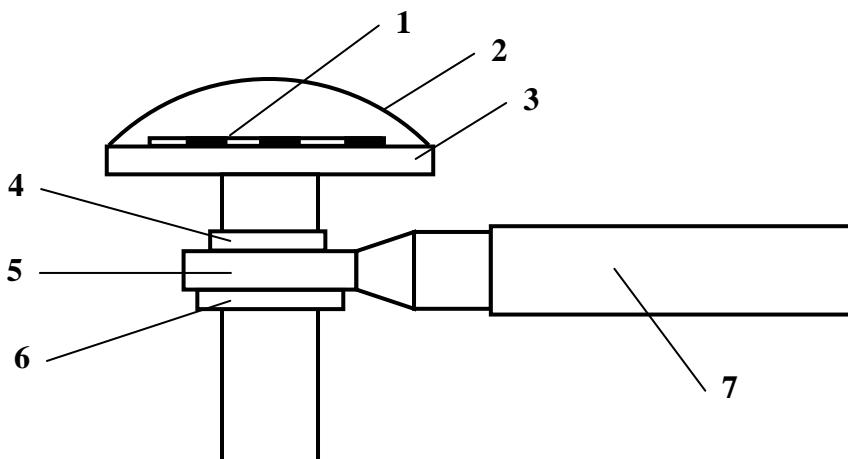
$q_{1-2} = \frac{Q_{1-2}}{F_1}$  – gęstość radiacyjnego strumienia ciepła,  $[J/m^2 s = W/m^2]$ .

Do pomiarów promieniowania sumarycznego słońca i nieba oraz promieniowania rozproszonego i odbitego (o długości fali od 0,3 do 2,4 mikrona) w warunkach polowych służy albedometr. Przyrząd ten współpracuje z galwanometrem lub integratorem elektrycznym lub innymi podobnymi miernikami elektrycznymi. Intensywność radiacji wyraża się w  $cal/(cm^2 min)$ .

Zasada działania albedometru (rys. 8.1) jest oparta na przekształceniu promieniowania w siłę elektromotoryczną. Przekształcenie dokonuje się przy pomocy baterii szeregowo połączonych elementów (1). Nieparzyste spoiny pomiarowe termoelementów są oznaczone na czarno, a parzyste na biało. Padające na termobaterię promieniowanie pochłanianie jest w większym stopniu czarnymi, a w mniejszym stopniu białymi spoinami w wyniku czego powstaje siła elektromotoryczna mierzona galwanometrem. Wychylenie wskazówki galwanometru jest proporcjonalne do różnicy temperatur spoin a tym samym do intensywności odbieranego przez spoiny pomiarowe promieniowania.

Ochronę stosu termoelektrycznego od wiatrów i opadów stanowi szkło półkolistе (2), połączone hermeticznie z korpusem przyrządu. Korpus z zamocowanym na nim stosem termoelektrycznym i kołpakiem szklanym stanowi głowicę albedometru. Metalowa pokrywa zamykająca kołpak od góry służy do wyznaczania miejsca zerowego galwanometru.

Głowica albedometru nakręcona jest na rurkę (4) podwieszoną na przegubowym zawieszeniu (5, 6), które ustawia ją w położeniu poziomym. Do przegubowego zawieszenia przykręcony jest uchwyty (7). W stanie rozmontowanym albedometr umocowany jest na podstawie metalowego futerału.



Rys. 8.1. Budowa albedometru: 1 – bateria termoelementów, 2 – szklany kołpak, 3 – korpus, 4 – rurka, 5, 6 – przegubowe zawieszenie, 7 – uchwyty.

## 8.2. Przebieg badania

Przy pomiarach sumarycznego lub rozproszonego promieniowania słońca i nieba głowicę albedometru należy ustawić poziomo. Przy pomiarze jedynie promieniowania rozproszonego odbiornik zaciemniany jest czarnym ekranem wbijanym w ziemię za pomocą ostrej końcówki, ustawionym w odległości od 90 cm do 1 m od albedometru. W celu pomiaru promieniowania odbitego od jakiegokolwiek powierzchni odbiornik albedometru należy ustawić równoległe do tej powierzchni za pomocą rękojeści (7) nasadzonej na drewniany kij.

Podczas badania albedometr ustawiany jest na wysokości 1 m nad powierzchnią. Pomiar należy zacząć od wyznaczenia miejsca zerowego strzałki galwanometru. W tym celu szklany kołpak zamyka się metalową pokrywą i odczytuje położenie strzałki galwanometru, odnotowując równocześnie czas początku obserwacji. Następnie zdejmuje się pokrywę i rozpoczyna się pomiar.

Niezależnie od rodzaju mierzonego promieniowania przeprowadza się od 3 do 5 odczytów wskazań galwanometru z interwałami od 10 do 15 sekund. Po zakończeniu badania kołpak zamyka się pokrywą i powtarza wyznaczanie zera strzałki galwanometru.

Przed wykonaniem odczytu w galwanometrze, po zamknięciu i otwarciu pokrywy szklanego kołpaka albedometru, jak również po jego zaciemnieniu lub obróceniu należy odczekać czas równy bezwładności przyrządu to jest około 40 sekund.

## 8.3. Opracowanie wyników

Ze wszystkich odczytów wskazań galwanometru obliczana jest ich wartość średnia, która następnie zostaje poprawiona skalarnymi odchyłkami przyjętymi zgodnie ze świadectwem kontrolnym galwanometru. Od poprawionej wartości należy odjąć wartość wskazywaną przez galwanometr przy osłoniętej głowicy albedometru

$$U = \left( \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n} \pm \delta U \right) - U_o, \quad (8.9)$$

gdzie:  $U$  – siła elektromotoryczna powstająca w baterii termoelementów, [mV],

$U_i$  – poszczególne odczyty wskazań galwanometru, [mV],

$\delta U$  – błąd wskazań galwanometru, [mV],

$U_o$  – miejsce zerowe galwanometru, [mV],

$n$  – liczba odczytów.

W celu wyznaczenia intensywności promieniowania rozproszonego siłę elektromotoryczną obliczoną zgodnie ze wzorem (8.9) należy przemnożyć przez odpowiedni współczynnik skalujący albedometr-galwanometr  $S_{a-g}$

$$q_r = S_{a-g} U, \quad (8.10)$$

gdzie:  $q_r$  – intensywność promieniowania, [cal/(cm<sup>2</sup> min)],

$S_{a-g}$  – współczynnik skalujący, [cal/(cm<sup>2</sup> min mV)].

Mnożnik skalujący albedometr-galwanometr wyznaczany jest w biurze kontroli przyrządów lub w stacji aktynometrycznej i powinien być sprawdzany nie rzadziej niż raz do roku.

Intensywność radiacji sumarycznej należy wyznaczać ze wzoru

$$q_r = S_{a-g} [(U_{nz} - U_z) \delta + U_z], \quad (8.11)$$

gdzie:  $U_{nz}$  – wskazania galwanometru zgodnie z (8.9) przy nie zaciemnionym albedometrze,

$U_z$  – wskazania galwanometru zgodnie z (8.9) przy zaciemnionym albedometrze,

$\delta$  – poprawkowy mnożnik przyjmowany z tabeli 8.1 odpowiednio do wysokości słońca  $h$  w chwili wykonywania pomiaru.

Tabela 8.1. Wartości poprawkowego mnożnika.

Wysokość $h$	70°	50°	40°	30°	20°	15°	10°
Mnożnik $\delta$	0,99	0,93	0,92	0,93	1,03	0,99	0,96

#### 8.4. Zakres opracowania

Opracowanie powinno zawierać:

- krótkie omówienie analizowanego zjawiska,
- opis eksperymentu wraz z podaniem warunków pomiaru (temperatury i wilgotności powietrza otoczenia, warunków pogodowych – słońce, niebo pochmurne, wiatr, pogoda bezwietrzna itp.),
- omówienie wzoru pozwalających obliczyć intensywność promieniowania,
- tabelę pomiarów ( $t$ ,  $U$ ) zawierającą czas i wskazania galwanometru przy odsłoniętym i zacienionym albedometrze oraz miejsce zerowe galwanometru w obu analizowanych przypadkach,
- obliczenia intensywności promieniowania  $q_r$  sumarycznego i rozproszonego oraz omówienie otrzymanych wyników.

Zmierzona za pośrednictwem albedometru intensywność promieniowania może stanowić punkt wyjścia do wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła przez promieniowanie  $\alpha_r$ , która to wielkość może pojawić się w zadaniu początkowo-brzegowym opisującym przepływ ciepła przez zadany ośrodek (porównaj ćwiczenie 1).