

# XXXIII OLIMPIADA FIZYCZNA ETAP III

## Zadanie doświadczalne

### ZADANIE D1

Wyznacz stałą Stefana- Boltzmana  $\sigma$  we wzorze na energię efektywnie emitowaną w jednostce czasu przez ciało doskonale czarne o powierzchni  $S$  i temperaturze bezwzględnej  $T$ , znajdujące się w otoczeniu o temperaturze  $T_0$  :

Wskaż i przedyskutuj czynniki wpływające na dokładność wyznaczenia stałej  $\sigma$ .

Masz do dyspozycji:

- grzejnik elektryczny (wkład do lutownicy),
- zasilacz,
- przewody do połączeń,
- woltomierz i amperomierz,
- miliwoltomierz (woltomierz cyfrowy),
- statyw z uchwytem,
- świecę i zapalnik,
- suwmiarkę,
- walec aluminiowy (o wypolerowanej powierzchni) z otworem na grzejnik, zaopatrzony w termoparę miedź- konstantan,
- mieszaninę wody z lodem w termosie (naczyniu styropianowym),
- charakterystykę termopary miedź- konstantan.

**UWAGA:** Zachować ostrożność, by się nie poparzyć. Prąd grzejnika nie może przekraczać 2 A.

### ROZWIĄZANIE ZADANIA D1

#### Część teoretyczna

Nieźle przybliżenie ciała doskonale czarnego można uzyskać pokrywając powierzchnię ciała sadzą z płomienia świecy. Wykorzystujemy do tego walec aluminiowy, zaopatrzony w termoparę, mogącą służyć do pomiaru jego temperatury. Walec ten może być podgrzewany za pomocą umieszczonego w jego wnętrzu grzejnika elektrycznego.

Nasuwa się więc koncepcja wykonania zadania, polegająca na ogrzewaniu poczernionego sadzą walca stałą mocą (której wartość  $M_c$  będzie można wyznaczyć na podstawie pomiarów napięcia prądu) i pomiarze temperatury  $T$  walca, jaka się ustali w warunkach równowagi. W takich warunkach cała moc wydzielana w grzejniku jest przekazywana otoczeniu, z tego część przez promieniowanie termiczne czarnej powierzchni walca.

Najpoważniejszy problem stanowi uwzględnienie nieradiacyjnego przepływu energii z walca (ściślej- grzejnika) do otoczenia – przez przewodnictwo cieplne

oraz konwekcję powietrza; jak wskazują uzyskane wyniki doświadczalne, w omawianym przypadku nieradiacyjny przepływ energii jest zbliżony wielkością do przepływu radiacyjnego. Moc rozpraszaną w sposób nieradiacyjny  $M_n$  można z dobrym przybliżeniem wyznaczyć powtarzając doświadczenie z walcem niepoczernionym, którego wypolerowana powierzchnia praktycznie nie emituje promieniowania termicznego.

Jeśli doświadczenie zostanie przeprowadzone w tej samej temperaturze  $T$ , moc  $M_r(T)$  wypromieniowywaną przez poczernioną powierzchnię walca znajdziemy jako różnicę:

Podstawiając powyższe wyrażenie do wzoru podanego w treści zadania w miejsce  $E$ , otrzymujemy po przekształceniach wzór, na podstawie którego będzie można wyznaczyć stała Stefana – Boltzmanna :

$$\sigma = \frac{M_c(T) - M_n(T)}{S(T^4 - T_0^4)}. \quad (1)$$

Pewna trudność tej metody wiąże się z koniecznością wykonania pomiarów dla walca poczernionego i niepoczernionego dokładnie w tej samej temperaturze. Trudność tę można pokonać wykonując pomiary np. dla walca niepoczernionego w dwóch nieco różnych temperaturach – niższej oraz wyższej niż dla walca poczernionego – i obliczając poszukiwaną wartość mocy grzejnika metodą interpolacji.

Opisana metoda – nazwijmy ją metodą stałej temperatury – jest najbardziej poprawna, albowiem moc rozpraszana w sposób nieradiacyjny jest w niej wyznaczana bezpośrednio.

Istnieją jeszcze metody mniej poprawne, w których moc rozpraszaną nieradiacyjnie wyznacza się nie bezpośrednio, lecz w oparciu o założenie, że jest ona proporcjonalna do różnicy temperatur  $(T - T_0)$ , tzn. wyraża się wzorem

gdzie współczynnik  $k$  nie zależy od temperatury  $T$  ani od faktu poczernienia powierzchni walca (przy niezmiennych pozostałych warunkach).

Metody takie były stosowane przez zawodników w dwóch odmianach. W pierwszej (metoda stałej mocy) stosuje się tę samą moc grzania  $M$  dla walca poczernionego oraz dla walca niepoczernionego. Oznaczając uzyskiwane w stanie równowagi temperatury dla obu przypadków odpowiednio przez  $T_c$  (powierzchnia czerniona) oraz  $T_b$  (powierzchnia błyszcząca) możemy napisać

Z powyższych równań eliminując współczynnik  $k$  wyznacza się moc promieniowania termicznego powierzchni poczernionej o temperaturze  $T_c$  jako

$$M_r(T_c) = M \left(1 - \frac{T_c - T_0}{T_b - T_0}\right) = M \frac{T_b - T_c}{T_b - T_0},$$

a dalej otrzymuje się wzór na wyznaczenie stałej  $\sigma$  :

$$\sigma = \frac{M(T_b - T_c)}{S(T_c^4 - T_0^4)(T_b - T_0)}. \quad (2)$$

W drugiej odmianie (metoda dwóch temperatur) pomiary dokonywane są wyłącznie dla walca poczernionego, stosuje się jednak dwie wartości mocy grzania

$M_1$  i  $M_2$ , którym odpowiadają wartości temperatury w stanie równowagi odpowiednio  $T_1$  i  $T_2$ .

Układ równań w tym przypadku ma postać:

$$M_1 = k(T_1 - T_0) + \sigma S(T_1^4 - T_0^4),$$

$$M_2 = K(T_2 - T_0) + \sigma S(T_2^4 - T_0^4).$$

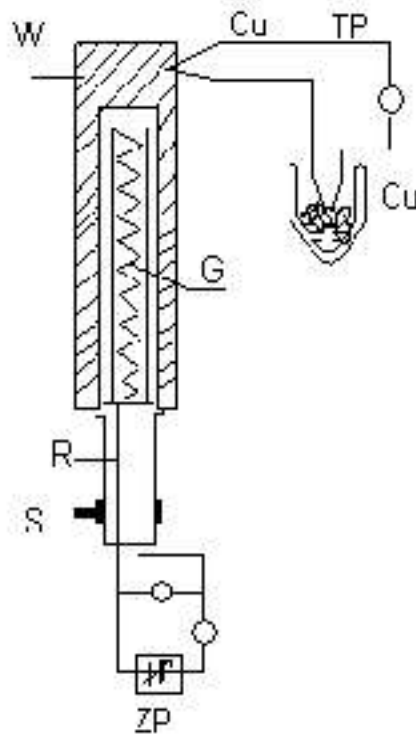
W każdym z tych równań pierwszy człon opisuje wymianę ciepła z otoczeniem na drodze nieradiacyjnej, drugi zaś poprzez promieniowanie.

Rozwiązując ten układ równań względem  $\sigma$  otrzymuje się wzór:

$$\sigma = \frac{M_1(T_2 - T_0) - M_2(T_1 - T_0)}{S[(T_1^4 - T_0^4)(T_2 - T_0) - (T_2^4 - T_0^4)(T_1 - T_0)]} \quad (3)$$

### Część doświadczalna

Należy zestawić układ przedstawiony schematycznie na ryc.5. Walec  $W$  nałożony jest na grzejnik  $G$  i za pomocą porcelanowej rurki  $R$ , zawierającej przewody doprowadzające do grzejnika, zamocowany na statywie  $S$  w pewnej odległości (znacznie większej od rozmiarów walca) od otaczających przedmiotów. Grzejnik zasilany jest z zasilacza



regulowanego Z R. Umieszczone w obwodzie – amperomierz i woltomierz umożliwiają określenie wydzielanej w grzejniku mocy. Termopara *TP* podłączona jest do miliwoltomierza (woltomierza cyfrowego o bardzo dużym oporze wewnętrznym) mierzącego siłę elektryczną związaną z różnicą temperatury obu jej spojów znajdujących się w walcu, drugie umieszczone jest w mieszaninie wody z lodem (o temp. 273 K).

Pomiary polegają na wyznaczeniu mocy wydzielanej w grzejniku i odpowiadającej jej ustalonej temp. walca. Wartość temp. walca odczytuje się z podanej charakterystyki termopary miedź–konstantan na podstawie pomiaru siły termoelektrycznej dokonywanego za pomocą miliwoltomierza. Bardzo istotne jest, aby pomiar temp. odbywał się po osiągnięciu stanu równowagi, gdy temp. walca oraz grzejnika nie ulega już zmianom w czasie i cała moc wydzielana w grzejniku jest rozpraszana na zewnątrz. Dla walca i grzejnika stosowanych na zawodach wymagało to blisko półgodzinnego odczekania po włączeniu napięcia lub zmianie jego wartości (okres ten można było skrócić zasilając grzejnik początkowo wyższą mocą, a następnie zmniejszając jej wartość). Dla wyznaczenia mocy wydzielanej w grzejniku konieczny był pomiar zarówno napięcia jak i natężenia prądu w końcowej temp.- ze względu na zależność oporu grzejnika od temp.

Pomiary dokonywane są dla walca poczernionego oraz niepoczernionego (w jednej z podanych wyżej metod- wyłącznie dla poczernionego). Podczas czernienia walca nad płomieniem świecy należy zwracać uwagę, aby sadza pokryła czernioną powierzchnię równą warstwą bez prześwitów, lecz i nie nadmiernie grubą. Wskazane jest nie pokrywanie sadzą pierścieniowej części denka wokół otworu na grzejnik (bliskość nagrzanej ceramicznej rurki mocującej grzejnik zmienia lokalnie warunki promieniowania). Pole poczernionej powierzchni walca *S* wyznacza się

na podstawie pomiarów walca za pomocą suwmiarki. Temp. otoczenia  $T_0$  znajduje się za pomocą termopary, jako temp. walca przed przystąpieniem do jego ogrzewania (lub po jego dokładnym ostygnięciu).

Przykładowe wyniki:

średnia walca - 11,9 mm

długość wal - 71,5 mm

pole poczernionej powierzchni walca (powierzchnia boczna + jedno denko)  $S=28,7 \text{ cm}^2$ ,

temperatura otoczenia  $T_0=296 \text{ K}$ , wartości napięcia i natężenia prądu grzejnika oraz temperatury walca dla trzech pomiarów przedstawia tabela 1.

Na podstawie powyższych danych wyznaczono wartość  $\sigma$  trzema przedstawionymi wyżej metodami. W tym celu odpowiednie pary wyników z tabeli I przedstawiono do wzorów (1), (2), (3), wstawiając jako moc każdorazowo iloczyn napięcia i natężenia prądu grzejnika. Uzyskane wartości  $\sigma$  (po zaokrągleniu końcowych wyników) są zawarte w tabeli II.

Jak widać z tej tabeli, wynik najbardziej zbliżony do wartości tablicowej  $\sigma$  ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) uzyskano metodą stałej temp.- co jest zgodne z oczekiwaniami. Poważniejsze odstępstwa wartości wyznaczonych pozostałymi dwiema metodami od wartości wyznaczonych pozostałymi dwiema metodami od wartości tablicowej wynikają z przyjęcia założenia upraszczającego, dotyczącego mocy rozpraszanej nieradiacyjnie, które w rzeczywistości nie jest dokładnie spełnione.

We wszystkich metodach przyjmuje się założenie, że powierzchnia pokryta sadzą emituje promieniowanie jako ciało doskonale czarne oraz – z drugiej strony – że wypolerowana powierzchnia aluminium w ogóle nie emituje promieniowania termicznego. W rzeczywistości emisyjność sadzy jest nieco mniejsza od jedności, zaś emisyjność aluminium – większa od zera (odchyłki wynoszą w obu przypadkach po kilka procent; dane te nie figurują jednak w tablicach szkolnych). Powoduje to pewne zaniżenie uzyskanej wartości  $\sigma$ , widoczne w poprawnej metodzie stałej temperatury.

**Tabela I**

<b>Symbol pomiaru</b>	<b>Powierzchnia walca</b>	<b>Zasilanie grzejnikach</b>		<b>Temperatura walca</b>
		<b>napięcie</b>	<b>prąd</b>	
A	błyszcząca	12,6 V	1,33 A	603 K
B	poczerniona	12,5 V	1,34 A	492 K
C	poczerniona	18,2 V	1,92 A	603 K

**Tabela II**

<b>Metoda</b>	<b>Użyty wzór</b>	<b>Wykorzystywana na para wyników</b>	<b>Wyznaczona wartość <math>s</math> (<math>\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-4}</math>)</b>	<b>Stosunek <math>s</math> do wartości tablicowej</b>
Stałej temp.	(1)	A+C	5,25 $\cdot 10^{-8}$	0,93
Stałej mocy	(2)	A+B	4,28 $\cdot 10^{-8}$	0,75
dwóch temp.	(3)	B+C	6,99 $\cdot 10^{-8}$	1,23

Z innych czynników wpływających na uzyskiwany wynik należy wymienić niekontrolowany przepływ mocy grzejnika przez porcelanową rurkę mocującą – poza walcem aluminiowym (przy tej samej temp. Walca większy jest ten przepływ dla powierzchni czernionej, mniejszy dla błyszczącej, gdyż różna jest w tych

przypadkach temperatur grzejnika). Czynnikiem ten wpływa na zwiększenie wyznaczonej wartości  $\sigma$ .

Teraz jeszcze – dla rzeczywistości – dodać, że w stosowanych grzejnikach elektrycznych niezaniebnywalny by opór doprowadzeń (przechodzących wewnątrz porcelanowej rurki mocującej). Pomiar tego oporu nie był przewidziany: zakładając nawet jego znajomość, trudno ilościowo uwzględnić wpływ tego oporu. Można jedynie stwierdzić, że podwyższa on uzyskiwany wynik. Również trudno do oszacowania jest ewentualny wpływ sadzy na wymianę ciepła między walcem a otoczeniem. Wydaje się, że może ona nieco utrudnić tę wymianę (zarówno przez przewodnictwo, jak i konwekcję). W konsekwencji prowadziło by to do obniżenia wartości wyniku na  $\sigma$ .

W porównaniu z wyżej omówionymi czynnikami błędy wprowadzone przez niedokładności przyrządów pomiarowych mają znaczenie drugorzędne – wynosiły one na ogół kilka procent.

W świetle powyższej dyskusji można stwierdzić, że liczne czynniki wpływające na wyznaczaną doświadczalnie wartość  $\sigma$  częściowo się kompensują i temu chyba należy przypisać, że odchyłka wartości  $\sigma$  wyznaczonej metodą stałej temperatury od wartości tablicowej jest tak niewielka (wyznaczanie stałej Stefana – Boltzmana jest na tyle trudne, że nawet wartości tablicowe mają stosunkowo małą dokładność).

Źródło:  
Zadanie pochodzi z „Druk OF”

Komitet Okręgowy Olimpiady Fizycznej w Szczecinie  
[www.of.szc.pl](http://www.of.szc.pl)