

### Rozwiązanie zadania 1

Jeśli samochód porusza się z prędkością  $v$  to jego droga hamowania wynosi

$$l_h = \frac{v^2}{2\mu g}. \quad (1)$$

Jeśli czas reakcji kierowcy jest równy  $t_r = 0,8$ s to bezpieczna odległość wynosi

$$l = \frac{v^2}{2\mu g} + vt_r. \quad (2)$$

Zatem liczba samochodów mijających dany punkt w jednostce czasu jest równa

$$N = \frac{v}{l + l_0} = \frac{v}{\frac{v^2}{2\mu g} + vt_r + l_0}. \quad (3)$$

Funkcja  $N(v)$  osiąga maksimum dla

$$v = \sqrt{2\mu g l_0} \approx 8,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 30 \frac{\text{km}}{\text{h}}. \quad (4)$$

Jest ono równe

$$N_{\max} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2l_0}{\mu g}} + t_r} \approx 0,5 \frac{1}{\text{s}} = 1800 \frac{1}{\text{h}}. \quad (5)$$

Punktacja

Wyznaczenie drogi hamowania (wzór (1)) - 2pkt.

Wyznaczenie bezpiecznej odległości między samochodami (wzór (2)) - 2 pkt.

Wyznaczenie liczby samochodów mijających ustalony punkt w jednostce czasu (wzór (3)) - 3 pkt.

Wyznaczenie prędkości odpowiadającej maksymalnej przepustowości (wzór (4)) - 3 pkt.

## Rozwiązanie zadania 2

Klosz w jednostce czasu wysyła

$$n_k = s \frac{P}{hc/\lambda} \quad (1)$$

fotonów. Wszystkie one przelatują przez sferę o promieniu  $l$  (i powierzchni  $4\pi l^2$ ) której środek pokrywa się ze środkiem klosza. Do wnętrza aparatu wpadną jednak tylko te, które padają na powierzchnię równą  $\pi d^2/4$ . Zatem liczba fotonów wpadająca do aparatu w jednostce czasu to

$$n_w = n_k \frac{\pi d^2/4}{4\pi l^2} = s \frac{P}{hc/\lambda} \frac{\pi d^2/4}{4\pi l^2} \approx 2,9 \cdot 10^{11}. \quad (2)$$

Obraz klosza zostanie utworzony w odległości  $y = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{l}} \approx f$  i będzie on miał średnicę

$$D_O = D \frac{y}{l} \approx D \frac{f}{l}. \quad (3)$$

Powierzchnia obrazu jest równa  $\pi (D_O)^2/4$ , zatem będzie na niej się znajdowało

$$N_O = N \frac{\pi (D_O)^2/4}{ab} \quad (4)$$

elementów światłoczułych. Wszystkie fotony które wpadły do aparatu skupią się na obrazie. Uwzględniając, że sumaryczna powierzchnia elementów światłoczułych jest równa połowie powierzchni matrycy, do jednego elementu światłoczułego wpadnie

$$n_1 = \frac{1}{2} \frac{n_w}{N_O} T = \frac{1}{8} s \frac{P\lambda}{hc} \frac{d^2 ab}{N\pi D^2 f^2} T = \frac{1}{8} s \frac{P\lambda ab T}{(2,8)^2 hc N \pi D^2} \approx 1,1 \cdot 10^4 \quad (5)$$

fotonów.

### Punktacja

Wyznaczenie liczby fotonów wylatujących z klosza w jednostce czasu (wzór (1)) - 2 pkt.

Wyznaczenie liczby fotonów wpadających do aparatu w jednostce czasu (wzór (2)) - 2 pkt.

Wyznaczenie wielkości obrazu klosza (wzór (3) lub równoważny) - 1 pkt.

Wyznaczenie liczby elementów światłoczułych, na których utworzył się obraz klosza (wzór (4)) - 2 pkt.

Wyznaczenie liczby fotonów, które wpadły do jednego elementu światłoczułego (wzór (5)) - 3pkt.

### Rozwiązanie zadania 3

Zauważmy, że ilość ciepła dopływającego do wody w jednostce czasu (czyli prędkość dopływu ciepła) jest równa

$$J = m_W c_W \frac{dT}{dt} = m_W c_W \lambda e^{-\lambda t} (T_{ot} - T_0) = m_W c_W (T_{ot} - T) \lambda. \quad (1)$$

W szczególności, gdy temperatura wody jest równa  $T_0$ , ta prędkość wynosi  $J_0 = m_W c_W (T_{ot} - T_0) \lambda$ .

Temperatura mieszaniny wody z lodem jest stała i równa  $T_0$ , zatem do chwili roztopienia się lodu, ciepło będzie dopływało do lodu ze stałą prędkością  $J_0$ . Będzie to trwało czas  $t_r$ :

$$t_r = \frac{m_L q}{J_0}. \quad (2)$$

Od tego momentu sytuacja będzie analogiczna do sytuacji pierwotnej, ale całkowita masa wody będzie równa  $m_W + m_L$ . Zatem zależność temperatury wody od czasu będzie w tym przypadku spełniała równanie:

$$(m_W + m_L) c_w \frac{dT}{dt} = m_W c_W (T_{ot} - T) \lambda, \quad (3)$$

Biorąc pod uwagę analogię ze wzorem (1) i uwzględniając  $T(t_r) = T_0$ , otrzymujemy

$$T = e^{-\lambda_2(t-t_r)} (T_0 - T_{ot}) + T_{ot}, \quad (4)$$

gdzie  $\lambda_2 = \frac{m_W}{m_L + m_W} \lambda$ .

Zatem ostatecznie

$$T = \begin{cases} T_0 & \text{dla } 0 \leq t < t_r, \\ e^{-\lambda_2(t-t_r)} (T_0 - T_{ot}) + T_{ot} & \text{dla } t \geq t_r, \end{cases} \quad (5)$$

gdzie

$$\lambda_2 = \frac{m_W}{m_L + m_W} \lambda \approx 1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{s}, \quad (6)$$

$$t_r = \frac{m_L q}{m_W c_W (T_{ot} - T_0) \lambda} \approx 2 \cdot 10^4 \text{s}. \quad (7)$$

Punktacja

Wzór na prędkość dopływu ciepła (wzór (1)) - 2pkt.

Wyznaczenie czasu roztopiania lodu (wzór (2)) - 2pkt.

Równanie określające zależność temperatury od czasu w drugim przypadku (wzór (3)) - 3 pkt.

Zależność temperatury od czasu w drugim przypadku (wzór (5)) - 2pkt.

Wyznaczenie liczbowych wartości stałych (wzory (6) i (7)) - 1 pkt.

## Zadanie D1

### „Opór wewnętrzny silnika”

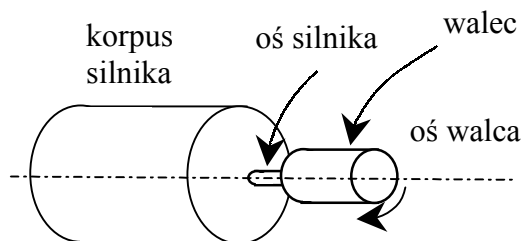
Masz do dyspozycji:

- silnik elektryczny prądu stałego,
- plastikowy, drewniany lub metalowy walec o średnicy  $1 \div 2$  cm, z otworem umożliwiającym osadzenie walca na osi silnika (patrz uwagi),
- nitkę,
- niewielki ciężarek,
- kilka różnych oporników o oporze z zakresu  $1 \div 10 \Omega$ ,
- przewody i zaciski umożliwiające połączenie elektryczne oporników z silniczkiem,
- taśmę mierniczą,
- komputer wyposażony w kartę dźwiękową z mikrofonem umożliwiającą rejestrowanie dźwięku,
- oprogramowanie umożliwiające wyznaczanie odstępów czasowych pomiędzy rejestrowanymi sygnałami dźwiękowymi.

Traktując wirnik silnika prądu stałego jako ramkę przewodzącą w polu magnesu stałego, wyznacz opór elektryczny (rezystancję) wirnika silnika wraz z oporem styków komutatora.

#### Uwagi

- 1) Do doświadczenia wybierz typowy silnik prądu stałego stosowany w zabawkach, silnik modelarski lub silnik napędzający magnetofon kasetowy. Silnik nie może być wyposażony w układy elektroniczne stabilizujące prędkość obrotową.
- 2) Walec (patrz rysunek) należy zamocować, w taki sposób, aby nie ślizgał się po osi silnika i nie wibrował podczas obrotów.
- 3) Jako oprogramowanie umożliwiające wyznaczenie odstępów czasowych możesz np. wykorzystać rejestrator dźwięku dostarczony z systemem operacyjnym komputera.



## Rozwiązanie

### Część teoretyczna

Zadanie można rozwiązać badając ruch ciężarka zawieszonoego na nitce nawiniętej na walec zamocowanym na osi silnika (rys.1). W obracającym się wirniku silnika prądu stałego, indukuje się siła elektromotoryczna  $E$  proporcjonalna do prędkości obrotowej wirnika  $\omega$ :

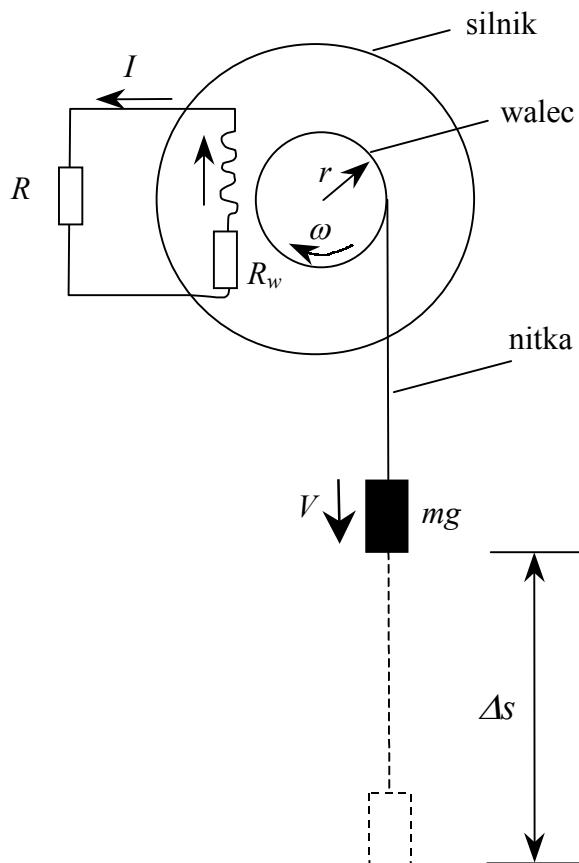
$$E = \alpha \omega , \quad (1)$$

gdzie  $\alpha$ - pewna stała.

Jeśli więc do zacisków silnika dołączyć zewnętrzny opór o wartości  $R$ , to w sytuacji gdy wirnik będzie się obracał, przez opór popłynie prąd o natężeniu  $I=E/R$  i wydzieli się na nim ciepło. Moc strat wyniesie:

$$P = \frac{E^2}{R + R_w} , \quad (2)$$

gdzie  $R_w$  – opór wewnętrzny silnika (suma oporu uzwojenia i styków komutatora).



Rys. 1

Zatem po dołączeniu do silnika opornika (czy też zwarcia jego styków) pojawi się dodatkowa siła hamująca, której wartość będzie wzrastać w miarę rozpędzania się ciężarka. W miarę jak wrastać będzie prędkość liniowa  $V$  ciężarka, wzrastać będzie siła elektromotorycznej  $E$  wzbudzana w uzwojeniu silnika, a na ciężarek działać będzie coraz większa siła hamująca. Siłą ta będzie rosła aż do momentu, kiedy zrówna z ciężarem obciążnika  $mg$ . Wtedy prędkość ciężarka ustali się osiągając graniczną wartość  $V_g$  określoną przez równość:

$$P_c = mgV_g, \quad (3)$$

gdzie  $P_c$  – całkowita moc strat obejmująca straty elektryczne i mechaniczne.

Jeśli warunki wykonywania doświadczenia dobierzemy tak, że opory mechaniczne silnika będą bardzo małe, w porównaniu z oporami wynikającymi ze strat elektrycznych, to wzór (3) przyjmie postać:

$$P \cong mgV_g \quad (4)$$

Korzystając ze wzorów (1) i (2) oraz biorąc pod uwagę, że prędkość obrotowa wirnika jest związana z prędkością liniową ciężarka zależnością  $\omega = V/r$ , gdzie  $r$  – promień walca, związek (4) można przekształcić do postaci:

$$V_g = \frac{r^2 mg}{\alpha^2} (R + R_w), \quad (5)$$

co można prościej zapisać jako:

$$V_g = \beta(R + R_w) \quad (6)$$

gdzie stała  $\beta = \frac{r^2 mg}{\alpha^2}$ .

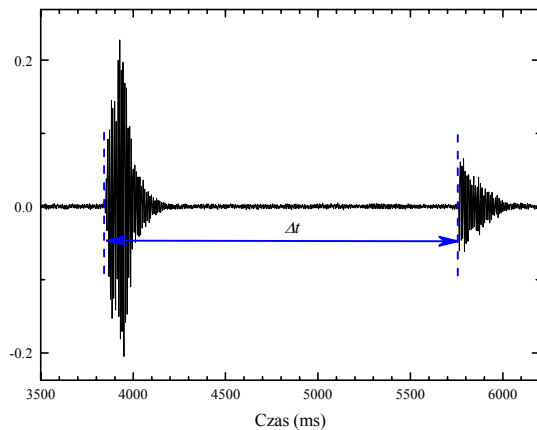
Z zależności (6) wynika, że prędkość graniczna przy, której siła ciężkości jest równoważona przez siły oporu jest liniową funkcją oporu zewnętrznego  $R$  podłączonego do silnika. W doświadczeniu należy więc wyznaczyć prędkość graniczną  $V_g$  dla kilku różnych wartości oporu  $R$ . Następnie sporządzić wykres zależności  $V_g(R)$ , dopasować prostą i znaleźć opór  $R_0$  odpowiadający przecięciu dopasowanej prostej z osią  $R$ . Pozwala to wyznaczyć wartość oporu wewnętrznego silnika  $R_w = -R_0$ . Warto zauważyć, że dla wyznaczenia  $R_w$  nie jest konieczna znajomość bezwzględnej wartości prędkości ciężarka, ani jego masa, ani też współczynnika  $\alpha$  opisującego zależność indukowanej siły elektromotorycznej od prędkości obrotowej wirnika.

### Część doświadczalna

Na walec zamocowany na osi silnika nawijamy równomiernie nitkę. Na jej końcu umieszczamy ciężarek (rys. 1). Masę ciężarka dobieramy tak, aby przy zwartych zaciskach silnika, czas spadania ciężarka był kilka razy większy, niż czas spadku swobodnego z tej samej wysokości. Przed wykonaniem doświadczenia dobrze jest zaznaczyć np. na ścianie kilka punktów odniesienia, odpowiadających różnej wysokości nad podłogą, z których zamierzamy „spuszczać” ciężarek. Doświadczenie należy wykonać w takim miejscu, żeby spadający na podłogę ciężarek wywoływał dobrze słyszalny odgłos. Po przygotowaniu komputera z kartą dźwiękową i mikrofonem uruchamiamy program rejestrujący dźwięk. Unosimy silniczek na wcześniej wybraną wysokość. Następnie, trzymając silnik nieruchomo, odblokowujemy jego wirnik, jednocześnie wypowiadając np. słowo „RAZ”. Spadający ciężarek napędza silniczek i po pewnym czasie stuka o podłogę. Wykorzystując odpowiedni program komputerowy wyznaczamy czas trwania ruchu ciężarka. Porównując różnicę czasu  $\Delta t$  spadku ciężarka z wysokości różniących się o  $\Delta s$ , można wyznaczyć wartość średnią

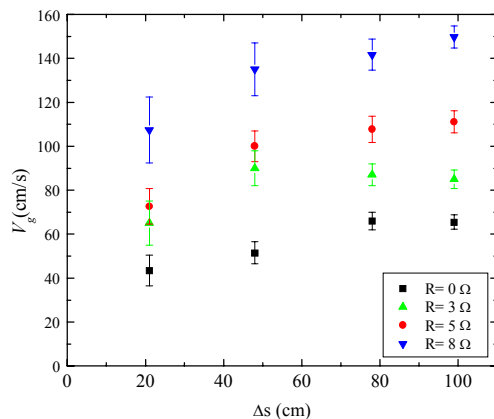
prędkości na poszczególnych etapach ruchu ciężarka  $V = \Delta s / \Delta t$ . Pomiarów powtarzamy dla różnych wartości oporu obciążającego  $R$ .

Na rys. 2 przedstawiono typowy przebieg zarejestrowany przy użyciu programu „Oscyloskop” dostępnego na płycie CD dołączonej do podręcznika J. Blinowski, W. Zielicz, „Fizyka z astronomią. Kształcenie w zakresie rozszerzonym”, tom. I, WSiP, Warszawa 2002. Pierwszy wzrost amplitudy fali dźwiękowej odpowiada słowu „RAZ”, drugi uderzeniu ciężarka o podłogę. Różnica czasu pomiędzy tymi zdarzeniami, odpowiada czasowi  $\Delta t$  jaki upłynął pomiędzy startem ciężarka, a jego upadkiem na podłogę.



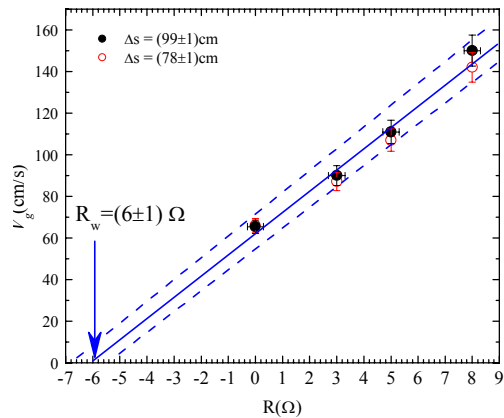
Rys. 2

Na rys. 3 przedstawiono zależność średniej prędkości ciężarka w zależności od odległości  $\Delta s$  pomiędzy punktami początkowymi ruchu, dla różnych wartości oporu podłączonego do silnika. Jak się należało spodziewać, w początkowej fazie ruchu, czyli w czasie pierwszych 40-50 cm ruchu ciężarek rozpędza się. Jednak po przebyciu odcinka około 80 cm, jego prędkość ustala się na pewnym poziomie, zależnym od wartości oporu dołączonego do silnika ( $0-8\Omega$ ).



Rys. 3

Jako to wynika z rys. 3, prędkość graniczna jaką osiąga ciężarek, rzeczywiście rośnie ze wzrostem wartości oporu  $R$ . Wyraźniej widać to na rys. 4, gdzie przedstawiono zależność wartości prędkości granicznej  $V_g$  od oporu  $R$ . Symbole pełne odpowiadają pomiarom przeprowadzonym dla różnicy odległości  $\Delta s = (99 \pm 1)$  cm, natomiast symbole otwarte odpowiadają  $\Delta s = (78 \pm 1)$  cm.



Rys. 4

Dopasowując prostą do punktów doświadczalnych, dla użytego w doświadczeniu silnika, otrzymano wartość oporu wewnętrznego uzwojenia wirnika  $R_w = (6 \pm 1) \Omega$ . Wynik ten jest zgodny z wartością uzyskaną z bezpośredniego pomiaru oporu przy użyciu omomierza.

#### Proponowana punktacja

- 1) Wyprowadzenie wzorów wiążących prędkość graniczną ciężarka z oporem elektrycznym podłączonym do zacisków silnika. do 6 pkt.
- 2) Dobór masy ciężarka, aby spełniał on przyjęte założenia do 2 pkt.
- 3) Wyznaczenie prędkości granicznej dla różnych wartości  $\Delta s$ , przy różnych  $R$ . do 6 pkt.
- 4) Doświadczalne sprawdzenie, że od pewnego momentu ciężarek porusza się ruchem jednostajnym. do 2 pkt.
- 5) Wykonanie wykresu zależności  $V_g(R)$ , dopasowanie prostej do 2 pkt.
- 6) Wyznaczenie oporu wewnętrznego wirnika  $R_w$  oraz jego niepewności pomiarowej do 2 pkt.



## Zadanie D2

„Stłuczona żarówka”

Masz do dyspozycji:

- żarówkę o napięciu znamionowym  $U_n = 6,3\text{V}$  i prądzie znamionowym z zakresu  $I_n = 0,2 \div 0,3\text{A}$ ,
- woltomierz napięcia stałego,
- amperomierz prądu stałego,
- zasilacz napięcia stałego regulowany w zakresie  $U = 0 \div 4\text{V}$  lub bateria  $4,5\text{V}$  z opornikiem o regulowanej oporności,
- przewody elektryczne, zaciski itp. elementy umożliwiające zestawienie obwodu elektrycznego,
- papier milimetrowy.

- 1) Wyznacz zależność mocy  $P_0$  pobieranej przez żarówkę od temperatury włókna żarówki. Odpowiednie pomiary wykonaj dla natężenia prądu nieprzekraczającego 60% prądu znamionowego.
- 2) Zachowując ostrożność stłucz bańkę żarówki nie naruszając włókna. Najlepiej zrobić to używając imadła. Ze względów bezpieczeństwa żarówkę należy wcześniej owinać np. kawałkiem papieru lub folii plastikowej. Następnie, wyznacz zależność mocy  $P$  pobieranej przez włókno od jego temperatury. Odpowiednie pomiary wykonaj dla natężenia prądu nieprzekraczającego 60% prądu znamionowego.
- 3) Korzystając z uzyskanych danych eksperymentalnych, wyznacz zależność stosunku mocy  $P/P_0$  od temperatury włókna żarówki. Wyjaśnij dlaczego  $P$  różni się od  $P_0$ .

Przyjmij, że opór włókna żarówki  $R$  jest liniową funkcją temperatury:

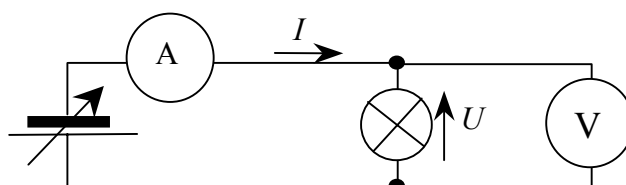
$$R(T) = R_0 (1 + \alpha_R (T - T_0)),$$

gdzie  $T$  – bezwzględna temperatura włókna, natomiast  $R_0$  – opór włókna w temperaturze pokojowej  $T_0$ . Przyjmij  $\alpha_R = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ ,  $T_0 = 295 \text{K}$ .

Wszystkie polecenia w zadaniu dotyczą wyznaczania zależności pewnych wielkości elektrycznych (mocy, stosunku mocy) od temperatury włókna żarówki. Informację o temperaturze  $T$  włókna można uzyskać mierząc jego opór  $R$ . Przekształcając wzór podany w treści zadania otrzymujemy związek:

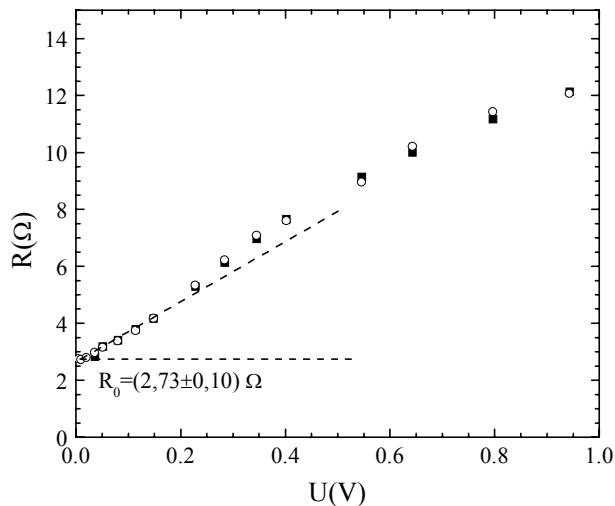
$$T(K) = (R/R_0 - 1)/\alpha_R + T_0 . \quad (1)$$

Wynika z niego, że temperatura włókna jest liniową funkcją jego oporu. Żeby skorzystać ze związku (1) trzeba jednak znać opór włókna w temperaturze pokojowej  $T_0$ . Opór żarówki można zmierzyć wykorzystując układ przedstawiony schematycznie na rys. 1. Sposób umieszczenia amperomierza i woltomierza w obwodzie pomiarowym wynika z tego, że oporność wewnętrzna woltomierza jest znacznie większa od oporności żarówki. W takiej sytuacji można uznać, że natężenie prądu płynącego przez woltomierz jest znikome w porównaniu z prądem płynącym przez żarówkę. Można więc uznać, że dołączenie woltomierza do układu nie zmieni prądu płynącego przez żarówkę. Taki układ nazywa się często „układem poprawnie mierzonego napięcia”.



Rys. 1

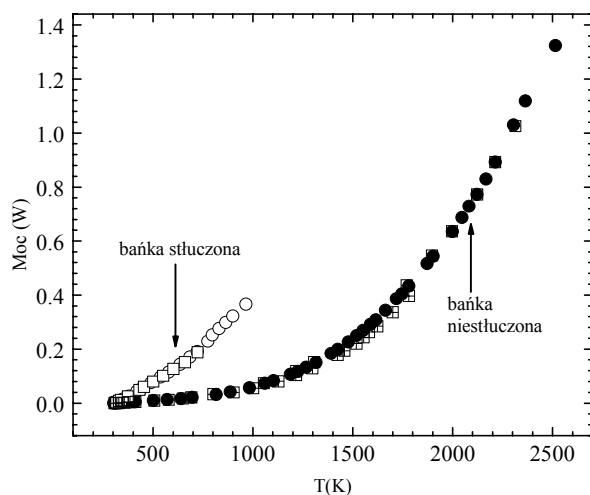
Regulując napięcie podawane przez zasilacz mierzymy natężenie prądu  $I$  w obwodzie i odpowiadające mu napięcie  $U$  na żarówce. Ponieważ przepływ prądu powoduje ogrzewanie włókna żarówki, to pomiary należy wykonywać powoli, tak żeby uzyskane wartości prądu i napięcia odpowiadały warunkom równowagi (tzn. żeby temperatura włókna była ustalona). Wyniki takich pomiarów pozwalają na wyznaczenie zależności oporu żarówki  $R=U/I$  od przyłożonego do niej napięcia (rys. 2). Dla bardzo małych napięć płynący przez żarówkę prąd nie powinien znacząco ogrzewać włókna i jego opór powinien się ustalić na pewnej wartości. W praktyce jednak, ze względu na dokładność przyrządów osiągnięcie takiej sytuacji może być trudne. Dlatego rozsądne wydaje się wyznaczenie oporu  $R_0$  poprzez ekstrapolację zależności  $R(U)$  dla  $U$  dążących do zera. W przypadku eksperymentów przeprowadzonych dla dwóch żarówek o identycznych parametrach znamionowych uzyskano w ten sposób wartość  $R_0=(2,73\pm 0,10) \Omega$ .



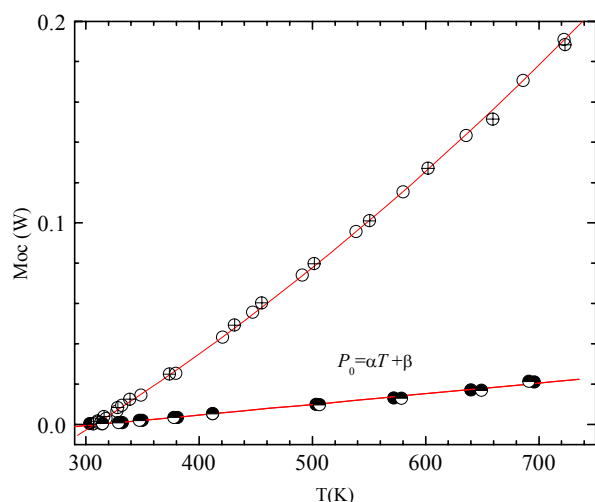
Rys. 2

Zatem, mierząc wartość natężenia prądu płynącego przez żarówkę oraz wartość napięcia, na jej włóknie można wyznaczyć zarówno temperaturę jej włókna jak też pobieraną przez żarówkę moc. Pozwala to porównać moc pobieraną przez żarówkę przed i po stłuczeniu bańki. Wyniki takich pomiarów przeprowadzonych w szerokim zakresie temperatur przedstawiono na rys. 3 dla dwóch żarówek o napięciu znamionowym 6,3V i prądzie znamionowym 0,2A. Jak widać różnice pomiędzy uzyskanymi charakterystykami są niewielkie.

Na rys. 4 porównano moce pobierane w dwóch sytuacjach przez dwie żarówki o identycznych parametrach znamionowych dla temperatur włókien poniżej 750K.

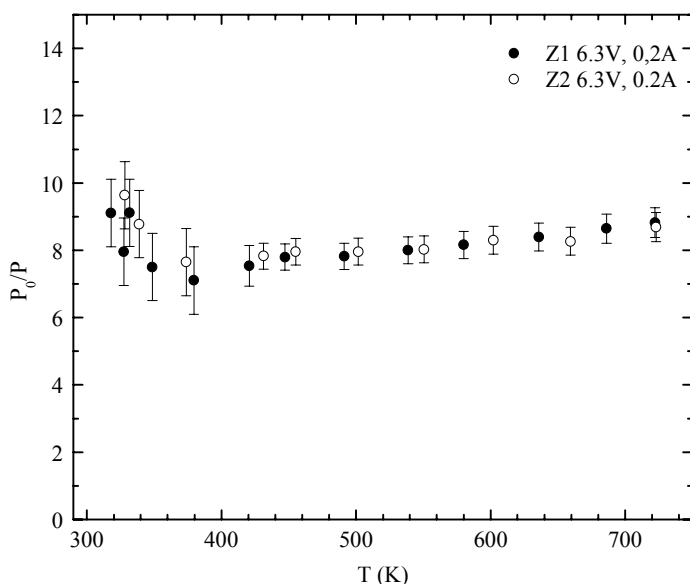


Rys. 3



Rys. 4

W celu wyznaczenia zależności stosunku mocy  $P/P_0$  od temperatury, należy podzielić przez siebie wartości mocy pobieranej przez żarówkę dla danej temperatury włókna. Z rys. 4 wynika, że temperatury, dla których określono moc pobieraną przez żarówkę z zamkniętą i otwartą bańką, w większości, nie pokrywają się. Można jednak zauważyć, że dla temperatur nieprzekraczających 750K (odpowiada to prądom nieprzekraczającym 150mA, czyli 60% prądu znamionowego), zależność mocy pobieranej przez żarówki z zamkniętą bańką od temperatury jest liniowa. Zatem do tych danych eksperymentalnych można dopasować prostą  $P_0(T) = \alpha T + \beta$ . W wyniku dopasowania do danych eksperymentalnych przedstawionych na rys. 4, uzyskano  $\alpha = 5,28 \cdot 10^{-5} \text{W/K}$  oraz  $\beta = -0,016 \text{W}$ . Po podzieleniu mocy  $P(T)$  uzyskanych dla żarówki z otwartą bańką, przez moc  $P_0(T)$  wynikającą z dopasowania, dla dwóch żarówek o takich samych parametrach znamionowych, uzyskano rezultat przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5

Jeśli pominąć obszar najniższych temperatur, to dla badanych żarówek, stosunek mocy  $P(T)/P_0(T)$  nie zależy znacząco od temperatury. Moc wydzielana przez żarówkę ze słuczonym włóknom jest ok. 8 razy większa od mocy wydzielanej przez włókno zamknięte w

bańce. Taki wynik oznacza, że w przypadku żarówki ze stłuczona bańką efektywność wymiany ciepła przez przewodnictwo i konwekcję jest znacznie efektywniejsza niż w przypadku bańki zamkniętej. Eksperymenty przeprowadzone na różnych żarówkach pokazały, że może on wahać się w szerokich granicach od 2 do 8. Dla żarówek próżniowych stosunek  $P/P_0$  jest znacznie większy niż dla żarówek wypełnionych gazem obojętnym. W przypadku tych ostatnich straty energii dostarczanej do włókna są określone głównie przez przewodnictwo cieplne wypełniającego je gazu – azot ma większe przewodnictwo niż argon. Argon z kolei lepiej przewodzi ciepło niż krypton, używany w tzw. żarówkach o podwyższonej jasności.

#### Proponowana punktacja

- 1) Wyznaczenie oporu  $R_0$  (wzór (1), dobór układu pomiarowego, wykonanie pomiarów umożliwiających wyznaczenie  $R_0$ , sporządzenie wykresu, ekstrapolacja) do 5 pkt.
- 2) Wyznaczenie zależności mocy pobieranej przez żarówkę od temperatury (wykonanie pomiarów, poprawne obliczenia, naniesienie na wykres wartości mocy) do 5 pkt.
- 3) Wyznaczenie zależności mocy pobieranej przez żarówkę ze stłuczona bańką od temperatury (pomiary, obliczenia, naniesienie na wykres wartości mocy) do 5 pkt.
- 4) Wyznaczenie stosunku mocy  $P/P_0$  (skorzystanie z dopasowania prostej lub interpolacji, wykonanie wykresu) do 5 pkt.
- 5) Wyjaśnienie wzrostu mocy pobieranej przez nieosłonięte włókno do 2 pkt.

### Zadanie D3 „Stała słoneczna”

Masz do dyspozycji:

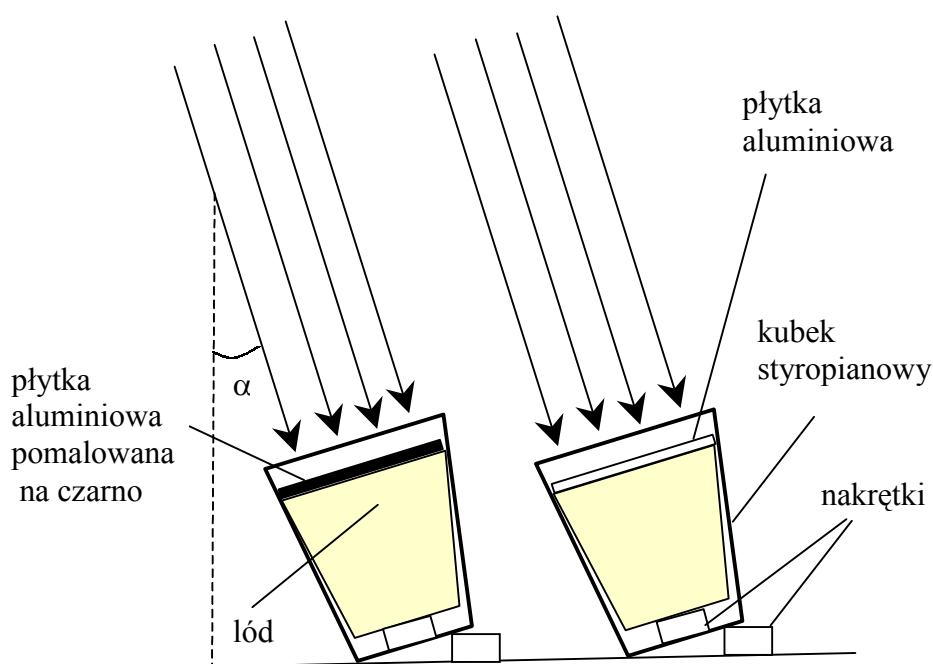
- kubki styropianowe do gorących napojów,
- blachę aluminiową o błyszczącej powierzchni,
- narzędzia do cięcia i obróbki blachy,
- czarną farbę wodoodporną (najlepiej w sprayu)
- wodę,
- lodówkę z zamrażalnikiem,
- zlewkę o niewielkiej pojemności ze skalą objętości lub dużą strzykawkę ,
- zegarek z sekundnikiem,
- linijkę,
- kątomierz,
- niewielkie przedmioty (np. plastikowe nakrętki do butelek), które mogą służyć jako podpórki lub podstawki.

Wyznacz moc promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię  $1\text{m}^2$  ziemi w słoneczny dzień w godz. pomiędzy  $11^{00}$  a  $13^{00}$ . W rozwiązaniu zadania podaj dokładną datę, czas rozpoczęcia i zakończenia pomiarów oraz nazwę miejscowości, w której przeprowadzono doświadczenie.

Przyjmij, że ciepło topnienia lodu wynosi  $L=330000\text{ J/kg}$ . Przyjmij również, że aluminiowa blacha pomalowana czarną farbą absorbuje 95%, natomiast blacha niepomalowana - 15% padającego na nią promieniowania słonecznego.

## Rozwiązanie

Zadanie można rozwiązać badając topnienie lodu pod wpływem promieniowania słonecznego. Żeby odseparować wpływ promieniowania słonecznego od efektów związanych z innymi rodzajami przepływu ciepła, należy wykorzystać to, że blaszka poczerniona pochłania energię promieniowania słonecznego znacznie lepiej niż blaszka niepomalowana. Można to zrobić porównując szybkość topnienia lodu, umieszczonego w styropianowych kubkach: jednego nakrytego poczernioną płytką i drugiego nakrytego niepoczernioną płytką aluminiową (rys. 1).



Rys. 1

Żeby wykonać takie doświadczenie należy wyciąć z blachy aluminiowej dwie płytki w kształcie koła o identycznej średnicy, nieco mniejszej niż średnica górnej (wewnętrznej) części kubka. Jedną z płytek należy pomalować czarną farbą. Kubki styropianowe wypełnione wodą należy umieścić w zamrażalniku lodówki. Ponieważ, podczas zamrażania woda zwykle deformuje (rozrywa) ścianki kubków, dlatego po wyjęciu lodu z zamrażalnika należy wyrównać ewentualne nierówności powierzchni i przełożyć lód do nowych kubków. Ważne jest też, żeby lód wyjąć z lodówki odpowiednio wcześnie, tak, aby zdążył ogrzać się do temperatury  $0^{\circ}\text{C}$  przed rozpoczęciem właściwych pomiarów. Przy wkładaniu lodu do nowych kubków, należy zadbać o to, żeby nie przylegał on ściśle do ścianek styropianowych kubków i żeby na spodzie kubka było na tyle dużo miejsca, aby woda z roztopionego lodu nie zalewała płytek aluminiowych. Można to zapewnić wkładając na spód kubków plastikowe nakrętki (rys.1). Lód nakryty płytkami ustawiamy w kubkach tak, aby światło słoneczne padało prostopadłe do powierzchni płytek (rys. 1). Przy użyciu kątomierza mierzymy kąt nachylenia płytek do pionu. Następnie czekamy, aż blaszki przylgną całą swoją powierzchnią do lodu. Kiedy się to stanie wylewamy z kubków wodę jaka się w nich zebrała i ponownie wystawiamy je na działanie promieni słonecznych. Po 10-15 minutach mierzymy objętość

wody powstałej ze stopionego lodu. W doświadczeniu wykonanym przy bezchmurnym niebie między godz. 11<sup>50</sup> a 12<sup>02</sup>, 8 maja 2006 r. w Warszawie, w kubku przykrytym blaszką poczernioną zebrano się (20,0±0,5) cm<sup>3</sup> wody, natomiast w kubku z płytką niepoczernioną zebrano się (14,0±0,5) cm<sup>3</sup> wody. Przyjmując, że gęstość wody wynosi 1000 kg/m<sup>3</sup>, różnica tempa topnienia lodu wynosi  $\Delta m_1/\Delta t_1 = 8,3 \cdot 10^{-6}$  kg/s. Pomiary powtórzono jeszcze dwukrotnie, uzyskując średnią różnicę tempa topnienia lodu  $\Delta m/\Delta t = (9 \pm 2) \cdot 10^{-6}$  kg/s.

Bilans energii dla obu kubków można zapisać w postaci:

$$\begin{cases} m_1 L = P_1 \Delta t + Q_1 \\ m_2 L = P_2 \Delta t + Q_2 \end{cases} \quad (1)$$

gdzie  $m_1, m_2$  – masy wody powstałej z lodu nakrytego odpowiednio poczernioną i błyszczącą płytką,  $P_1, P_2$  – moc promieniowania słonecznego pochłaniana w jednostce czasu odpowiednio przez płytkę poczernioną i błyszczącą,  $Q_1, Q_2$  – ciepło docierające do lodu z otoczenia.

Jeśli przez  $P_0$  oznaczyć całkowitą moc promieniowania padającego na powierzchnię płytek, to zgodnie z treścią zadania należy przyjąć, że powierzchnia poczerniona absorbuje 95%  $P_0$  promieniowania, natomiast blacha niepoczerniona absorbuje 15%  $P_0$ .

Przy założeniu, że wymiana ciepła między otoczeniem a kubkami jest taka sama, tzn.  $Q_1 = Q_2$ , to spełniony będzie związek:

$$P_0 = \frac{L}{S} \frac{\Delta m}{\Delta t}, \quad (2)$$

gdzie  $S = \pi d^2/4$  – powierzchnia płytek o średnicy  $d$ . Średnicę płytek mierzymy linijką. W doświadczeniu wykonanym przez recenzenta użyto płytek o średnicy  $d = (6,0 \pm 0,2)$  cm. Po podstawieniu wartości liczbowych do wzoru (2) uzyskano  $P_0 = (440 \pm 130)$  W/m<sup>2</sup>. Wynik ten jest znacznie niższy niż wartość stałej słonecznej wynoszącej 1367 W/m<sup>2</sup>. Jest to przede wszystkim związane z pochłanianiem światła w atmosferze. Nie bez znaczenia może też być przyjęcie założeń o efektywności pochłaniania promieniowania słonecznego przez płytkę poczernioną i niepoczernioną oraz zanieczyszczeniem atmosfery w Warszawie powodującym pochłanianie dodatkowej części promieniowania słonecznego przed dotarciem do powierzchni ziemi. Jeśli uwzględnimy fakt, że promienie słoneczne padają na powierzchnię ziemi pod kątem  $\alpha = (30 \pm 5)^\circ$  to moc promieniowania słonecznego padająca na 1 m<sup>2</sup> powierzchni ziemi wyniesie  $P_s = P_1 \cos(\alpha) = (380 \pm 140)$  W/m<sup>2</sup>. Wynik ten jest obarczony dużą niepewnością pomiarową wynikającą głównie z dużej niedokładności pomiaru objętości wody.

#### Proponowana punktacja

- 1) Pomysł doświadczenia umożliwiającego porównanie szybkości topnienia lodu przykrytego blaszką poczernioną i niepoczernioną (przykrycie lodu poczernioną i niepoczernioną płytką, objętość wody jako miara dostarczonej energii) do 2 pkt.
- 2) Ułożenie bilansu energetycznego uwzględniającego efektywność pochłaniania energii słonecznej przez płytki oraz wymianę ciepła z otoczeniem do 2 pkt.
- 3) Przygotowanie układu doświadczalnego (wycięcie płytek, pomalowanie płytki, przygotowanie miejsca na wodę na dnie kubków, itp. ) do 3 pkt.
- 4) Wykonanie pomiaru szybkości topnienia lodu pod wpływem promieniowania słonecznego (udokumentowane wyniki, wykonanie eksperymentu w wyznaczonym czasie, powtórzenie pomiarów) do 7 pkt
- 5) Wyznaczenie średnicy płytek do 1 pkt.



- 6) Wyznaczenie mocy promieniowania padającego prostopadle do powierzchni płytek (wzór (2), wynik liczbowy z niepewnością pomiarową) do 3 pkt.
- 7) Wyznaczenie mocy promieniowania padającego na powierzchnię ziemi (pomiar kąta padania promieni słonecznych, wynik liczbowy i oszacowanie niepewności pomiarowej) do 2 pkt.