

XLV OLIMPIADA FIZYCZNA (1995/1996). Stopień II, zadanie doświadczalne – D.

Źródło: Komitet Główny Olimpiady Fizycznej
 Andrzej Wysmołek – sekretarz naukowy do zad. dośw., IFD UW;
 Włodzimierz Ungier, Andrzej Wysmołek: *Fizyka w Szkole* nr 4, 1996.

Nazwa zadania: Wyznaczanie ciepła właściwego oleju

Działy: Termodynamika

Słowa kluczowe: ciepło właściwe, pojemność cieplna, moc, temperatura, ciepło, proces, parametr termodynamiczny, termometr, olej, źródło napięcia, grzałka, statyw, pomiar, niepewność, dokładność.

Zadanie doświadczalne – D, zawody II stopnia, XLV OF.

Mając do dyspozycji:

- dwa naczynia o małej pojemności cieplnej,
- dwie różne grzałki połączone szeregowo,
- źródło napięcia,
- dwa termometry,
- statyw z uchwytami do zamocowania termometrów i grzałek,
- styropianową podkładkę pod naczynia,
- dwa mieszadełka,

wyznacz ciepło właściwe oleju c_0 oraz stosunek mocy grzałek P_1/P_2 . W pierwszym naczyniu znajduje się $V_1 = 100 \text{ cm}^3$ wody i $V_2 = 20 \text{ cm}^3$ oleju, a w drugim $V_3 = 120 \text{ cm}^3$ oleju. Nie przelewaj wody i oleju. Ciepło właściwe wody $c_w = 4190 \text{ J/kg}$, a gęstość wody i oleju wynoszą odpowiednio $\rho_w = 1,00 \text{ g/cm}^3$, $\rho_o = 0,93 \text{ g/cm}^3$. Zaniedbaj pojemność cieplną naczyń, termometrów, mieszadełek i grzałek.

Uwagi:

1. Przed podłączeniem grzałek do źródła napięcia należy ich elementy grzejne umieścić w cieczy.
2. Przed włączeniem prądu poproś asystenta o sprawdzenie układu.
3. W celu chłodzenia naczyń z cieczami można korzystać z dodatkowego pojemnika z wodą.
4. Do opracowania wyników można wykorzystać papier milimetry.

Rozwiązanie**Część teoretyczna**

Jak wynika z treści zadania, w zestawie przyrządów dostępnych dla zawodników nie ma zegarka. Dodatkowo nie jest możliwe przelewanie cieczy. Nie można więc wykonać typowych pomiarów kalorymetrycznych. Posiadanie dwóch termometrów i dwóch grzałek pozwala jednak na jednoczesny pomiar zmian temperatury wywołanych przepływem prądu przez połączone szeregowo grzałki, umieszczone w różnych naczyniach. Nie znamy co prawda mocy grzałek, ale zakładamy, że niezależnie od tego w jakich cieczach są one zanurzone, stosunek ich mocy jest stały. Pomysł rozwiązania zadania opiera się na porównaniu zmian temperatury cieczy w naczyniach dla dwóch sytuacji:

- a) ogrzewania cieczy w pierwszym naczyniu za pomocą grzałki o mocy P_1 przy równoczesnym ogrzewaniu cieczy w drugim naczyniu przez grzałkę o mocy P_2 ,
- b) ogrzewania cieczy w pierwszym naczyniu za pomocą grzałki o mocy P_2 przy równoczesnym ogrzewaniu cieczy w drugim naczyniu przez grzałkę o mocy P_1 .

Zakładając dodatkowo, że nie ma strat ciepła do otoczenia, a pojemność cieplna naczyń oraz termometrów jest niewielka, można napisać:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{C_1}{C_2} \frac{\Delta T_{1,1}}{\Delta T_{2,2}} \quad \text{dla sytuacji a),} \quad (1)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{C_1}{C_2} \frac{\Delta T_{2,1}}{\Delta T_{1,2}} \quad \text{dla sytuacji b),} \quad (1)$$

przy czym:

$$C_1 = V_1 \rho_w c_w + V_2 \rho_0 c_0 \quad (\text{pojemność cieplna zawartości pierwszego naczynia}),$$

$$C_2 = V_3 \rho_0 c_0 \quad (\text{pojemność cieplna zawartości drugiego naczynia}),$$

c_0 – ciepło właściwe oleju,

$\Delta T_{1,1}$ – zmiana temperatury w pierwszym naczyniu pod wpływem ogrzewania grzałką o mocy P_1 ,

$\Delta T_{2,2}$ – zmiana temperatury w drugim naczyniu pod wpływem ogrzewania grzałką o mocy P_2 ,

$\Delta T_{2,1}$ – zmiana temperatury w pierwszym naczyniu pod wpływem ogrzewania grzałką o mocy P_2 ,

$\Delta T_{1,2}$ – zmiana temperatury w drugim naczyniu pod wpływem ogrzewania grzałką o mocy P_1 .

Przekształcając równania (1) i (2) otrzymujemy:

$$\Delta T_{2,2} = \frac{P_2}{P_1} \frac{C_1}{C_2} \Delta T_{1,1},$$

$$\Delta T_{1,2} = \frac{P_1}{P_2} \frac{C_1}{C_2} \Delta T_{2,1},$$

co można zapisać w postaci:

$$\Delta T_{2,2} = A_1 \Delta T_{1,1}$$

$$\Delta T_{1,2} = A_2 \Delta T_{2,1}.$$

Wartości stałych A_1 oraz A_2 można wyznaczyć mierząc zmiany temperatury w naczyniach. Ich znajomość pozwala na określenie stosunków:

$$\frac{P_1}{P_2} = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad \text{oraz} \quad \frac{C_1}{C_2} = \sqrt{A_1 A_2}.$$

Wykorzystując ostatni związek można obliczyć ciepło właściwe oleju:

$$c_0 = c_w \frac{V_1 \rho_w}{\rho_0 (V_3 \sqrt{A_1 A_2} - V_2)}.$$

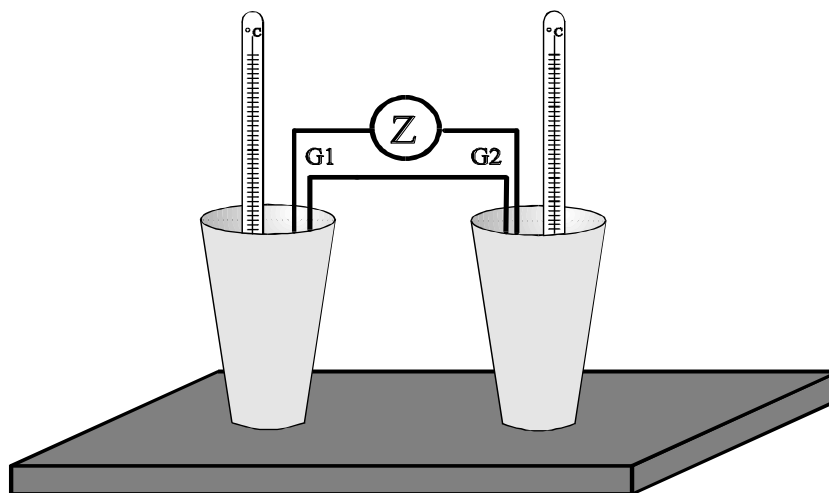
Część doświadczalna

Wyprowadzone w części teoretycznej wzory, odpowiadają sytuacji, w której nie ma wymiany ciepła między naczyniami a otoczeniem. Przed przystąpieniem do wykonania doświadczenia należało więc zastanowić się czy takie podejście do zagadnienia jest uzasadnione. Pozytywną rolę w odniesieniu do strat ciepła z naczyń odgrywa warstewka oleju, zapobiegająca parowaniu wody. Nie zapobiega ona jednak utracie ciepła do otoczenia za pośrednictwem przewodnictwa cieplnego czy konwekcji. Ponieważ w obu tych procesach ilość traconego

ciepła zależy od różnicy temperatur między naczyniami i otoczeniem, to należało w trakcie pomiarów zadbać o to aby, temperatury osiągnięte przez cieczy w kubkach nie były zbyt wysokie. Z drugiej jednak strony, ze względu na dokładność dostępnych w zestawie pomiarowym termometrów, zmiany temperatury nie mogły być zbyt małe. Trzeba więc wybrać pewien kompromis - możliwie dokładnie mierzyć zmiany temperatury, pamiętając przy tym o wzroście strat ciepła ze wzrostem temperatur cieczy w kubkach.

Inny argument przemawiający za stosowaniem wzorów wyprowadzonych w części teoretycznej opiera się na założeniu, że dla temperatur bliskich temperaturze pokojowej, wymiana ciepła z otoczeniem jest zdominowana przez procesy przewodnictwa cieplnego i konwekcji (pomijamy straty na promieniowanie i parowanie cieczy). W związku z tym wielkość strat jest wprost proporcjonalna do różnicy między temperaturą otoczenia, a temperaturą cieczy w kubku. Ponieważ temperatura cieczy zmienia się proporcjonalnie do mocy zanurzonej w niej grzałki, to również straty ciepła w jednostce czasu będą proporcjonalne do mocy grzałki. Oznacza to, że podczas ogrzewania cieczy, straty stanowią pewien stały ułamek mocy grzałki. Dzięki temu wyznaczony w doświadczeniu stosunek mocy (P_1/P_2) przekazywanych ciecjom powinien być bliski rzeczywistemu stosunkowi mocy grzałek.

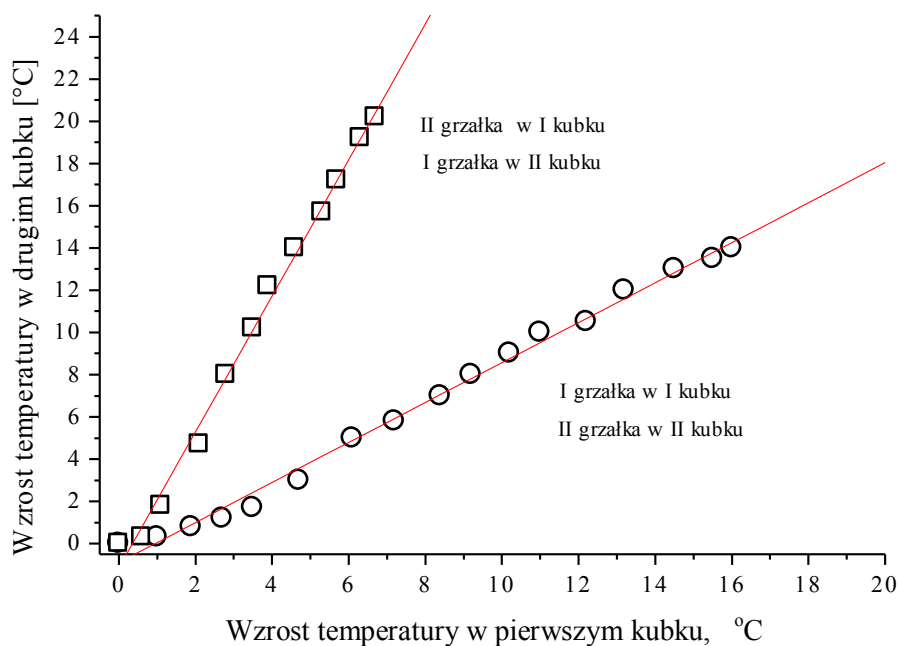
W celu wykonania pomiarów zmian temperatury w naczyniach z cieciami, zestawiono układ doświadczalny przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego: Z – źródło prądu, G1, G2 – grzałki.

Aby zapobiec przewróceniu kubków, termometry umocowano na statywie. W celu ograniczenia strat ciepła do otoczenia, kubki zostały ustawione na podkładce ze styropianu. Połączone szeregowo grzałki umieszczone zostały w naczyniach (pierwsza grzałka w naczyniu pierwszym, druga w drugim).

Po ich podłączeniu do źródła prądu co pewien czas odczytywano zmiany temperatury w obu kubeczkach (jednocześnie). Podczas ogrzewania cieczy systematycznie je mieszano, aby cała objętość naczynia ogrzewała się jednorodnie. Następnie prąd został wyłączony a grzałki wyciągnięto nad powierzchnię cieczy aby obciekły. Potem zamieniono grzałki miejscami tzn. grzałkę pierwszą umieszczono w drugim kubku, a drugą w pierwszym. Po odczekaniu aż cieczy ostygną, połączono grzałki ze źródłem prądu i obserwowano zmiany temperatury w naczyniach. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 2, w postaci zależności temperatury w drugim kubku (kubek z samym olejem) od temperatury w pierwszym kubku. W obu przypadkach odjęto temperatury początkowe cieczy.



Rys. 2. Zależność zmian temperatury w drugim kubku od zmian temperatury w pierwszym kubku w sytuacji, gdy grzałka I znajduje się w kubku I, a grzałka II w kubku II (kółka) oraz w sytuacji, gdy grzałka II znajduje się w kubku I, a grzałka I znajduje się w kubku II (kwadraty).

Widać, że zmiany temperatury w kubkach są od siebie liniowo zależne. Na podstawie wykresu wyznaczono współczynniki nachylenia prostych:

$$A_1 = 3,2 \pm 0,3 \quad \text{oraz} \quad A_2 = 0,95 \pm 0,10.$$

Fakt, że proste nie przechodzą dokładnie przez punkt (0,0) jest spowodowany prawdopodobnie mniejszym przewodnictwem cieplnym oleju, a co za tym idzie pewnym opóźnieniem we wzroście jego temperatury. Korzystając ze wzorów wyprowadzonych w części teoretycznej obliczono stosunek mocy grzałek:

$$P_1/P_2 = 0,54 \pm 0,05 \quad \text{oraz} \quad \text{ciepło właściwe oleju } \rho_0 = 1960 \pm 200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Do głównych źródeł niepewności pomiarowych należy zaliczyć brak właściwej izolacji cieplnej układu oraz nierównomierne nagrzewanie cieczy. Ponadto, w rozwiązaniu zaniedbano pojemność cieplną naczyń, termometrów, grzałek oraz mieszadełek.

Proponowana punktacja

Część teoretyczna

- | | |
|--|--------|
| 1. Pomysł rozwiązania | 5 pkt. |
| 2. Dokonanie przybliżeń (straty ciepła, pojemność cieplna naczyń itp.) | 2 pkt. |
| 3. Wyprowadzenie wzorów na P_1/P_2 oraz c_0 | 3 pkt. |

Część doświadczalna

- | | |
|--|--------|
| 4. Zestawienie układu pomiarowego | 2 pkt. |
| 5. Wykonanie (udokumentowane) pomiarów | 3 pkt. |
| 6. Wykonywanie co najmniej kilku pomiarów zmian temperatury | 3 pkt. |
| 7. Uzyskanie poprawnego wyniku uzupełnione analizą przyczyn błędów pomiaru | 2 pkt. |

Wskazówki dla organizatorów

1. Elementy grzejne grzałek wykonano z drutu miedzianego o średnicy 0,1 mm w izolacji emaliowej. Długość drutu dobrano tak aby po zanurzeniu w cieczy, przy zasilaniu prądem stałym o natężeniu ok. 1 A grzałki miały moc odpowiednio 4 W i 8 W (w doświadczeniu wzorcowym wykorzystano kawałki drutu o długości 120cm i 240cm). Miejsca lutowań, cienkiego drutu z doprowadzeniami pomalowano lakierem, aby uniemożliwić przepływ prądu przez wodę. Doprowadzenia wykonano z grubszego drutu.
2. Do doświadczenia użyto wody destylowanej oraz oleju rzepakowego.
3. Styropianową podkładkę pod plastikowe kubki jednorazowe do napojów, wykonano ze styropianowego ekranu stosowanego do izolacji ścian.
4. Do doświadczenia użyto zwykłych termometrów laboratoryjnych na zakres 0–100 °C.
5. Ponieważ chłodzenie cieczy zabiera dość dużo czasu, do zestawu dołączono naczynie z wodą, w którym można było ochłodzić kubki z badanymi cieczami.
6. Jako mieszadełek użyto słomek do napojów.

Większość uczniów wpadła na pomysł rozwiązania zadania i poprawnie zestawiła układ pomiarowy. Niestety tylko nieliczni zawodnicy poprawnie wykonali pomiary. Rzadko kto dyskutował problem strat ciepła z układu. Niewielu też powtarzało pomiary celem uzyskania dokładniejszego wyniku. W sumie jednak, zadanie wypadło dość dobrze.