

XXXV OLIMPIADA FIZYCZNA ETAP III

Zadanie doświadczalne

ZADANIE D1

Nazwa zadania: „Wyznaczanie ciepła pierwiastków (azot, ołów)”

Wyznacz ciepło parowania ciekłego azotu oraz ciepło właściwe ołowiu (wartość średnią dla przedziału temperatur 77K - 300K). Do dyspozycji są:

- walcowe styropianowe naczynie z przykrywką z otworem,
- ciekły azot (w drugim naczyniu),
- kawałek ołowiu o masie (200 ± 3) g i sznurek do jego mocowania,
- grzejnik elektryczny (oporniki) z przewodami,
- zasilacz prądu stałego (o znanym, regulowanym napięciu),
- miernik uniwersalny z przewodami,
- stoper,
- przezroczysta linijka z podziałką,
- termometr na zakres temperatur w pobliżu temperatury pokojowej (udostępniany przez asystenta) oraz dodatkowo:
 - papier milimetrowy,
 - naczynie z wodą (do ogrzewania ochłodzonego ołowiu),
 - lignina (do obsuszania ołowiu).

Opisz szczegółowo przebieg doświadczenia. Omów źródła błędów i oceń błąd każdego z wyników.

Dane: - temperatura wrzenia ciekłego azotu pod ciśnieniem atmosferycznym – 77 K,
- gęstość ciekłego azotu – $0,81 \text{ kg/dm}^3$.

Uwaga:

1. Z ciekłym azotem należy się obchodzić maksymalnie ostrożnie! Unikać rozpryskiwania go przy nalewaniu, jak również przy gwałtownym zanurzaniu w nim przedmiotów!

Ciekły azot oraz przedmioty nim chłodzone w kontakcie z ciałem grożą „oparzeniem"! Szczególnie niebezpieczne jest polanie odzieży, np. swetra, ze względu na przesiąkanie ciekłego azotu!

2. W grzejniku może być wydzielana moc do 40 W, jeżeli grzejnik zanurzony jest w ciekłym azocie i do 4 W — w powietrzu. Wartości tych nie wolno przekraczać (grozi spalaniem oporników).

3. W sprawie uzupełniania zapasu ciekłego azotu, udostępniania termometru, a także ewentualnej zmiany wody w naczyniu należy zwracać się do opiekuna (asystenta).

ROZWIĄZANIE ZADANIA D1

Wyznaczanie ciepła parowania ciekłego azotu

Ciepło parowania c_{pa} ciekłego azotu, który ma przez cały czas temperaturę wrzenia, wyznaczamy na podstawie pomiaru energii (ilości ciepła) E_a , powodującej wyparowanie masy m_a cieczy, jako

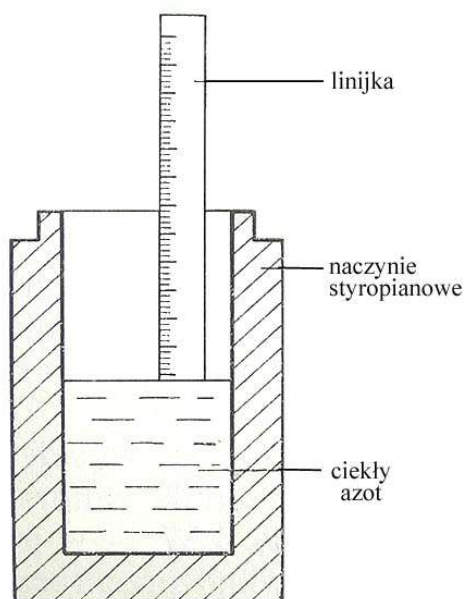
$$c_{pa} = \frac{E_a}{m_a}. \quad (1)$$

Wykorzystujemy w tym celu grzejnik elektryczny, zanurzony w ciekłym azocie nalanym do naczynia styropianowego. Masę m_a wyparowanego azotu określamy na podstawie zmian poziomu Δh ciekłego azotu:

$$m_a = \frac{\pi}{4} \rho d^2 \Delta h;$$

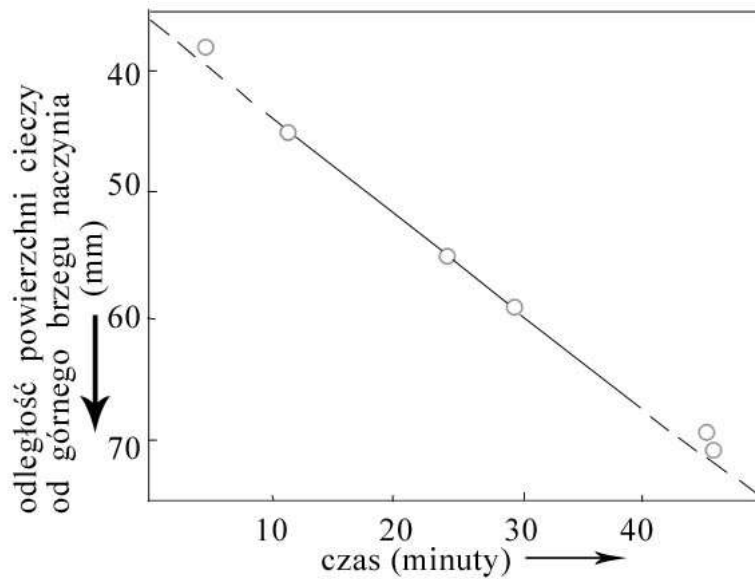
ρ oznacza tu gęstość ciekłego azotu, d – średnicę wewnętrzną walcowego naczynia.

Ponieważ naczynie styropianowe nie zapewnia idealnej izolacji cieplnej, trzeba sprawdzić, czy dopływ ciepła z otoczenia jest znaczący i ewentualnie go uwzględnić. W tym celu badamy, jak się obniża poziom ciekłego azotu z upływem czasu w naczyniu bez grzejnika (lub z grzejnikiem wyłączonym). Położenie tego poziomu daje się najdokładniej określić względem górnej krawędzi naczynia, jak na rycinie 6 (dzięki przezroczystości linijki można stosunkowo łatwo stwierdzić, kiedy jej krawędź dotyka powierzchni cieczy).



Ryc. 6

Wyniki takich pomiarów są przedstawione na rycinie 7. Widać z niej, że na skutek dopływu ciepła z otoczenia (przy nałożonej pokrywie styropianowej) poziom ciekłego azotu



Ryc. 7

- w zakresie odległości 40 – 70 mm od górnej krawędzi naczynia – obniża się ze średnią szybkością $w = 0,8$ mm/min. Odpowiada to w przybliżeniu stałej mocy dopływającej do parującego azotu z zewnątrz. Ten dopływ ciepła z otoczenia dodaje się do ciepła dostarczanego ciekłemu azotowi przez zanurzony w nim grzejnik lub ołowianą bryłkę. Ilość azotu, jaka wyparuje w czasie t_w , na skutek wymiany cieplnej z otoczeniem można obliczyć jako

$$m_{aw} = \frac{\pi}{4} \rho d^3 w t_w$$

i uwzględnić w dalszych rachunkach.

Masę ciekłego azotu, który odparował pod wpływem badanego procesu, np. wydzielania ciepła w grzejniku, obliczamy jako różnicę masy odparowanej wskutek grzania i masy odparowanej „samoistnie”:

$$m'_a = m_a - m_{aw} = \frac{\pi}{4} \rho d^2 (\Delta h - w t_w). \quad (2)$$

Podstawiając to wyrażenie do wzoru (1) w miejsce m_a , otrzymujemy

$$c_{pa} = \frac{4E_a}{\pi \rho d^2 (\Delta h - w t_w)}. \quad (3)$$

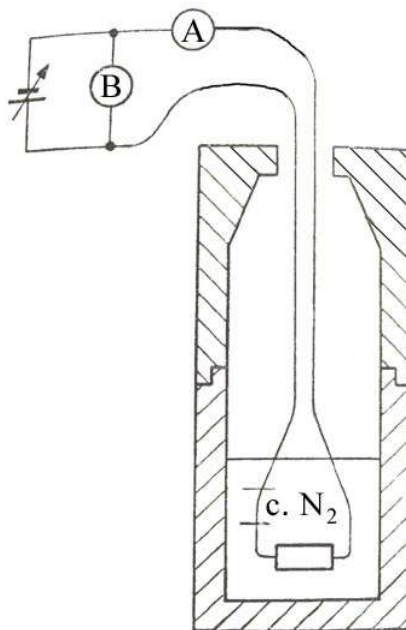
Jeśli napięcie na grzejniku i natężenie prądu przezeń płynącego oznaczymy odpowiednio przez U oraz I , zaś czas przepuszczania prądu – przez t_p , będziemy mieli $E_a = U I t_p$ i wzór (3) przyjmie postać

$$c_{pa} = \frac{4 U I t_p}{\pi \rho d^2 (\Delta h - w t_w)}. \quad (4)$$

Podczas wykonywania doświadczenia celowe jest stosowanie możliwie dużej mocy wydzielanej w grzejniku, tak aby udział dopływu ciepła z otoczenia był stosunkowo mały (odpowiadał on mocy 3 – 7 W).

Przebieg doświadczenia

Dobieramy wartość napięcia zasilającego tak, aby wydzielana w grzejniku moc była bliska wartości 40 W i nastawiamy odpowiednie zakresy pomiarowe woltomierza oraz amperomierza. Przewlekamy przewody grzejnika przez otwór w pokrywce i zanurzamy grzejnik w ciekłym azocie, jak na rycinie 8; obwód elektryczny pozostaje rozarty. Po ochłodzeniu się grzejnika do temperatury ciekłego azotu (po ustaniu jego gwałtownego wrzenia) zdejmujemy pokrywkę i mierzymy położenie poziomu cieczy notując czas, w którym pomiar został dokonany (uruchamiamy stoper). Następnie łączymy grzejnik z zasilaczem, odczytujemy napięcie U i natężenie prądu I grzejnika: po czasie t_p wyłączamy grzejnik. Mierzymy ponownie położenie poziomu cieczy i wyznaczamy czas t_w , jaki upłynął od poprzedniego pomiaru.



Ryc. 8

Przykładowe wyniki pomiarów:

$$d = (58 \pm 0,5) \text{ mm},$$

$$U = (25 \pm 0,75) \text{ V},$$

$$I = (1,35 \pm 0,02) \text{ A},$$

$$t_p = (210 \pm 1) \text{ s} \text{ — czas przepuszczania prądu przez grzejnik,}$$

$$\Delta h = (64 \pm 0,5) \text{ mm} - (42 \pm 0,5) \text{ mm} = (22 \pm 1) \text{ mm},$$

$$t_w = (300 \pm 15) \text{ s} \text{ — czas między pomiarami poziomu ciekłego azotu.}$$

Podane tu błędy są błędami maksymalnymi, wynikającymi z dokładności użytych przyrządów pomiarowych lub zastosowanej metody pomiaru np. błąd t_w wynika z dokładności określenia czasu między dwoma pomiarami poziomu ciekłego azotu).

Obliczone ze wzoru (4) na podstawie powyższych wyników ciepło parowania azotu jest równe $c_{pa} = 184 \text{ kJ/kg}$. Błąd maksymalny tego wyniku, obliczony metodą różniczki zupełnej, wynosi 28 kJ/kg (około 15%).

Wobec szacunkowego charakteru tego błędu można ostateczny wynik podać w zaokrągleniu: $c_{pa} = (180 \pm 30) \text{ kJ/kg}$. Wartość tablicowa ciepła parowania azotu wynosi 199 kJ/kg , mieści się więc w granicach podanego błędu.

Dokładność uzyskanego wyniku można zwiększyć, powtarzając doświadczenie kilka razy. Można przy tym zmieniać czas grzania oraz moc grzejnika. Należy jednak unikać małych mocy (poniżej 10 W) oraz krótkich czasów grzania, którym odpowiadają małe wartości Δh .

Niektórzy zawodnicy powtarzali doświadczenie z różnymi wartościami mocy grzania, stosując jednak za każdym razem ten sam czas $t_p \approx t_w$. Wykreślając następnie zależność $\Delta h(UI)$ mogli oni wyznaczyć moc dopływu ciepła z otoczenia i wyeliminować jego wpływ na wynik końcowy bez badania „naturalnego” parowania ciekłego azotu w naczyniu.

Wyznaczanie ciepła właściwego ołowiu

W celu wyznaczenia ciepła właściwego ołowiu – wartości średniej dla przedziału temperatur 77 K-300 K – należy ochładzać ołów od temperatury pokojowej (ok. 300 K) do temperatury wrzenia azotu (77 K) lub też ogrzewać go od 77 K do 300 K w taki sposób, aby można było określić energię (ilość ciepła) przekazaną w tym procesie, tj. oddaną bądź pobraną przez ołów. Jeśli energię oddaną przez ołów o masie m_0 podczas zmiany jego temperatury od T_1 do T_2 oznaczymy przez E_0 , poszukiwane ciepło właściwe określi nam wzór

$$c_0 = \frac{E_0}{m_0(T_1 - T_2)}. \quad (5)$$

Energię E_0 można wyznaczyć zanurzając (zawieszoną na sznurku) bryłkę ołowiu o temperaturze pokojowej w ciekłym azocie — aż się ochłodzi do temperatury 77 K (objawia się to ustaniem burzenia się cieczy). Wyjmujemy ją następnie i mierzymy obniżenie się poziomu Δh_0 ciekłego azotu, podobnie jak przy wyznaczaniu ciepła parowania. Możemy zastosować wzór analogiczny do wzoru (3), zawierający Δh_0 w miejscu Δh oraz t_{w0} zamiast t_w . Otrzymujemy stąd

$$E_0 = c_{pa} \frac{\pi}{4} \rho d^2 (\Delta h_0 - wt_{w0}).$$

Po skorzystaniu z wzorów (4) i (5) uzyskujemy wzór na ciepło właściwe ołowiu

$$c_0 = \frac{UI t_p (\Delta h_0 - wt_{w0})}{m_0 (T_1 - T_2) (\Delta h - wt_w)}, \quad (6)$$

w którym zostały wyeliminowane czynniki ρ oraz d , a więc także związane z nimi błędy.

Przebieg doświadczenia

Mierzmy położenie poziomu ciekłego azotu włączając w tym momencie stoper. Następnie ostrożnie zanurzamy bryłkę ołowiu zawieszoną na sznurku, jak na rycinie 9. po ustaniu gwałtownego wrzenia ciekłego azotu, co świadczy o ochłodzeniu się ołowiu do temperatury 77 K, wyjmujemy bryłkę i ponownie wyznaczamy położenie poziomu cieczy odczytując czas, jaki upłynął od poprzedniego pomiaru.

Przed każdym zanurzeniem w ciekłym azocie ołów powinien mieć temperaturę pokojową. Wyjęty z ciekłego azotu ołów najszybciej doprowadzamy do odpowiedniej temperatury przez zanurzenie go w zlewce z wodą. Temperaturę wody mierzymy

termometrem, a przed powtórzeniem doświadczenia bryłkę ołowiu obsuszamy ligniną.

Przykładowe wyniki pomiarów (z zaznaczonymi błędami maksymalnymi):

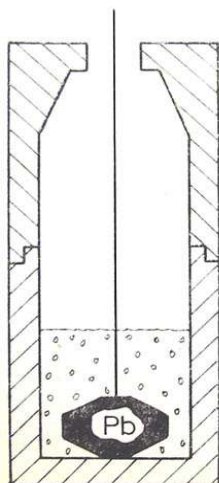
$$\Delta h_o = (58 \pm 0,5) \text{ mm} - (43 \pm 0,5) \text{ mm} = (13 \pm 1) \text{ mm},$$

$t_{wo} = (150 \pm 1) \text{ s}$ — czas między pomiarami poziomu ciekłego azotu przed zanurzeniem ołowiu i po jego wyjęciu,

$T_1 = (291 \pm 1) \text{ K}$ — temperatura początkowa ołowiu, równa temperaturze powietrza lub też wody, w której był zanurzony po poprzednim ochłodzeniu.

Pozostałe dane bierzemy z pierwszej części zadania lub z jego treści:

$$m_o = (200 \pm 3) \text{ g},$$



Ryc. 9

$$T_2 = 77 \text{ K},$$

$$\rho = 0,81 \text{ kg/dm}^3.$$

Obliczona ze wzoru (6) na podstawie wyników pomiarowych obu części zadania wartość ciepła właściwego ołowiu wynosi

$$(120 \pm 30) \frac{\text{J}}{\text{kgK}};$$

podany tu błąd maksymalny obliczono metodą różniczki zupełnej.

Decydujące dla dokładności wyniku znaczenie ma tutaj - podobnie jak i w poprzednim przypadku — błąd pomiaru różnicy poziomów ciekłego azotu. Powtarzając pomiar parokrotnie można ten błąd nieco zmniejszyć, większe jednak znaczenie od statystyki pomiarów ma w tym przypadku ich prawidłowe i staranne wykonanie; stąd obliczanie przez niektórych zawodników odchylenia standardowego nie miało większego sensu.

Średnia wartość ciepła właściwego ołowiu dla przedziału temperatur 77 K — 300 K. obliczona na podstawie danych tablicowych ciepła właściwego w funkcji temperatury wynosi 124 J/kg K). Uzyskany wynik, mimo 25% błędu, jest bardzo zbliżony do tej wartości. Najwidoczniej nastąpiło tu skompensowanie się błędów doświadczalnych działających w przeciwne strony.

Wychodząc nieco poza ramy zadania obliczmy na podstawie uzyskanego wyniku molowe ciepło właściwe ołowiu. Wynosi ono

$$25 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol} \cdot \text{K}},$$

co jest równe $3R$ (R — stała gazowa). Potwierdza się zatem w tym przypadku prawo Dulonga-Petita.

Źródło:
Zadanie pochodzi z czasopisma „Fizyka w Szkole”
Komitet Okręgowy Olimpiady Fizycznej w Szczecinie
www.of.szcz.pl