



Modyfikacja ćwiczeń z przedmiotu Fizyka w ramach projektu pn.
„Innowacyjny program strategicznego rozwoju Uczelni” o numerze
POWR.03.05.00-00-Z020/18

Barbara Siemek, Magdalena Bacior

Ćwiczenie 13

Pomiar ciepła właściwego ciał stałych

I. CZĘŚĆ TEORETYCZNA

1. Termodynamika - podstawowe pojęcia

Termodynamika to dział fizyki, w którym rozpatruje się procesy zachodzące w układach składających się z dużej liczby cząsteczek. Układy takie zwane są układami makroskopowymi. Jednym z podstawowych pojęć stosowanych w termodynamice jest pojęcie układu fizycznego - wycinka materii, który został wyodrębniony w myślach z otoczenia. W omawianych poniżej zagadnieniach posługiwać się będziemy pojęciami układu izolowanego, zamkniętego i otwartego. Układ izolowany - jest to układ, który nie oddziałuje z otoczeniem i nie wymienia z nim ani energii ani masy. Układ zamknięty nie wymienia z otoczeniem masy, natomiast może wymieniać energię, a układ otwarty może wymieniać z otoczeniem zarówno masę, jak i energię. Jeżeli w układzie badamy zachodzące w nim zjawiska cieplne, to taki układ nazywamy termodynamicznym.

2. Parametry stanu. Równanie stanu

Opis termodynamiczny nie wymaga znajomości ogromnej liczby wielkości mikroskopowych opisujących układ, takich jak: położenia i prędkości poszczególnych atomów lub cząsteczek. Do opisu stanu układu makroskopowego potrzebna jest znajomość tzw. parametrów stanu (parametrów makroskopowych), takich jak: ciśnienie (p), temperatura (T) i objętość (V).

Parametry stanu są wielkościami mierzalnymi bezpośrednio i nie zależą od „historii układu” tzn. od tego co z układem działo się przed pomiarem.

Wyjaśnienie wielu właściwości rzeczywistych substancji uzyskać można na gruncie prostych modeli. Model można zdefiniować podając *równanie stanu*, które wiąże parametry stanu. Dla przykładu model gazu *doskonałego* odnosi się do gazu opisanego równaniem stanu:

$$pV = nRT, \quad (1)$$

gdzie: n oznacza liczbę moli gazu, R jest stałą gazową, natomiast T jest temperaturą w skali Kelvina.

3. Ciepły przepływ energii

Ciepło jest to energia, która przepływa z jednego ciała do drugiego na skutek istnienia różnicy temperatur (Halliday D., Resnick R., Fizyka Tom 1, s.664). Jednostką tak rozumianego "ciepła" jest 1 dżul (1J).

Temperatura jest skalarną wielkością fizyczną, której równość zapewnia równowagę termiczną ciał będących ze sobą w kontakcie. Aby tę definicję wyjaśnić prościej, weźmy pod uwagę dwa ciała: ciało A, które wydaje nam się zimne i B, które odczuwamy jako gorące. Jeżeli ciała te zetkniemy ze sobą, to po pewnym czasie stwierdzamy, że ich temperatura wyrównała się. Stan, który osiągną te ciała nazywamy stanem równowagi termicznej. Jednostką temperatury w układzie SI jest Kelvin.

Energia wewnętrzna. Prawo równomiernego rozkładu energii.

Z punktu widzenia mikroskopowej budowy ciała stałego wiemy, że ciało stałe zbudowane jest z cząsteczek i atomów znajdujących się w ściśle określonym uporządkowaniu przestrzennym, tworząc sieć krystaliczną (lub przestrzenną). Cząsteczki ciała stałego wykonują drgania wokół swoich położeń równowagi, przy czym przesunięcia cząsteczek z miejsca na miejsce w ciele stałym są możliwe ale zachodzą stosunkowo rzadko. Całkowita energia cząsteczki ciała stałego składa się z energii kinetycznej ruchu cieplnego (E_k) (oscylacji) oraz energii potencjalnej oddziaływań wzajemnych wewnątrzcząsteczkowych i międzycząsteczkowych (E_p).

W dostatecznie wysokich temperaturach średnie wartości energii kinetycznej i potencjalnej możemy uważać za jednakowe ($\bar{E}_k \approx \bar{E}_p$), a zatem energia wewnętrzna jednej cząsteczki ciała stałego jest równa:

$$U = \bar{E}_k + \bar{E}_p = 2\bar{E}_k. \quad (2)$$

Energia wewnętrzna (U) ciała - jest sumą energii kinetycznej ruchu (postępowego i obrotowego), cząsteczek lub atomów, energii potencjalnej ich wzajemnego oddziaływania oraz energii wiązania części składowych jąder atomowych. Do energii wewnętrznej nie zaliczamy energii mechanicznej ciała jako całości. Można wykazać, że energia wewnętrzna zależy od temperatury ciała i jest do niej wprost proporcjonalna. Ma ona określoną wartość, niezależną od sposobu przejścia układu ze stanu 1 do stanu 2, czyli jest funkcją stanu.

Zmiana energii wewnętrznej ciała (układu ciał) jest różnicą energii wewnętrznych ciała (układu ciał) w stanie końcowym oraz początkowym:

$$\Delta U = U_2 - U_1. \quad (3)$$

Jeżeli przyjmiemy w fizyce cząsteczkowej, metodę statystyczną, to przy opisie właściwości ciał korzystamy z **prawa równomiernego podziału energii między stopnie swobody**. Prawo to mówi, iż **średnia energia kinetyczna, przypadająca na każdy stopień swobody cząsteczki ciała jest taka sama dla wszystkich cząstek**.

Liczba stopni swobody (i) nazywamy najmniejszą liczbę współrzędnych (liczbę współrzędnych niezależnych), które należy koniecznie podać aby określić całkowite położenie ciała w przestrzeni np. punkt materialny poruszający się ruchem postępowym w przestrzeni ma trzy stopnie swobody (współrzędne x, y, z).

Jeżeli cząsteczka jest obdarzona „ i ” stopniami swobody, to zgodnie z prawem równomiernego podziału energii między stopnie swobody, jej średnia energia kinetyczna:

$$\bar{E}_k = \frac{i}{2} kT, \quad (4)$$

gdzie: k - stała Boltzmanna, i - oznacza liczbę stopni swobody cząsteczki, natomiast T jest temperaturą. Tak więc zgodnie ze wzorem (2) energia wewnętrzna cząsteczki ciała stałego będzie się wyrażała zależnością:

$$U = 2\bar{E}_k = ikT, \quad (5)$$

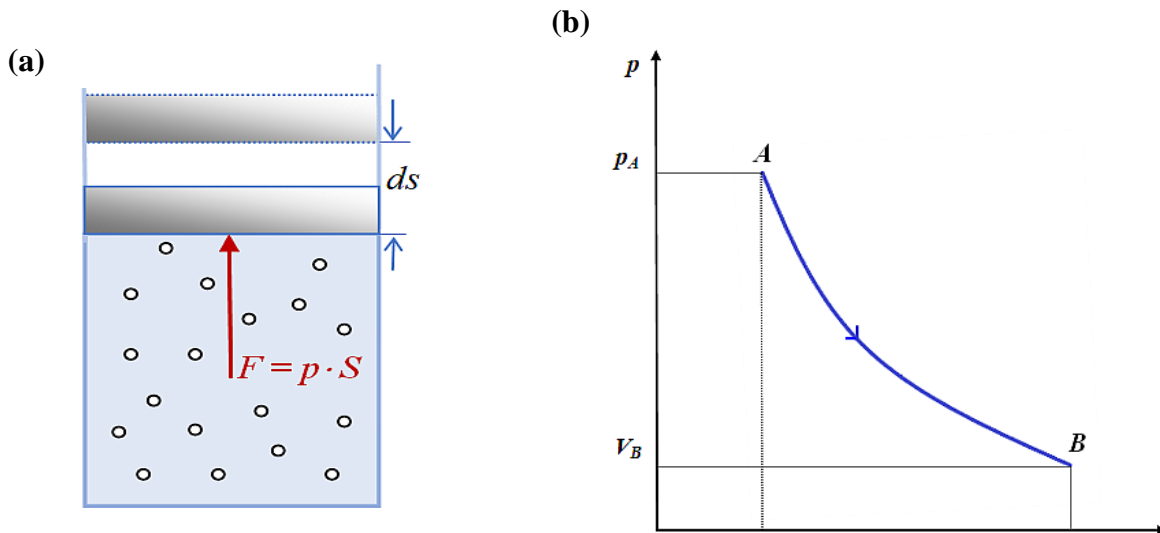
Ponieważ cząsteczka ciała stałego może jedynie oscylować wokół położenia równowagi i ma trzy stopnie swobody ($i = 3$), a zatem jej energia wewnętrzna $U = 3kT$. Jeżeli weźmiemy pod uwagę jeden mol chemicznie prostej substancji ciała stałego zawierający liczbę Avogadro cząsteczek to:

$$U = 3NkT = 3RT, \quad kN = R \quad (6)$$

gdzie : N jest to liczba Avogadro, R to stała Rydberga.

4. Praca procesu termodynamicznego

W termodynamice pracą nazywa się makroskopowy sposób przekazywania energii z układu do otoczenia lub z otoczenia do układu wiążący się ze zmianą objętości tegoż układu. Aby obliczyć pracę określonego procesu termodynamicznego weźmy pod uwagę gaz znajdujący się w cylindrze, zamknięty tłokiem o polu powierzchni S , scharakteryzowany poprzez parametry (p, V, T) . Tłok poruszający się bez tarcia, pod działaniem siły F zostanie przesunięty o odcinek ds (Rys.1).



Rys. 1(a). Praca wykonana przez zamknięty gaz przesuwający tłok na odległość ds jest wyrażona zależnością: $dW = Fds = pdV$. **(b)** Proces przejścia gazu ze stanu początkowego (A) do końcowego (B).

Rozważmy proces, w którym gaz rozpręża się i przechodzi ze stanu początkowego (A) do końcowego (B), osiągając stan równowagi scharakteryzowany ciśnieniem p_B i objętością V_B (Rys.1a,b). Gaz wykonuje pracę przy przesuwaniu tłoka. Praca wykonana przez gaz przy rozprężaniu ma znak dodatni, a przy sprężaniu znak ujemny. Praca dW wykonana przez gaz przy bardzo małym przemieszczeniu tłoka na drodze ds wynosi:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = p(Ads) = pdV, \quad (7)$$

gdzie: p jest to ciśnienie wywierane na gaz, A - pole powierzchni tłoka, dV oznacza zmianę objętości gazu. Całkowita praca przy dużym przesunięciu tłoka jest równa sumie prac elementarnych. Zastępując sumę przez całkę otrzymujemy:

$$W = \int dW, \quad W = \int_{V_A}^{V_B} pdV \quad (8)$$

Pracę tę można również obliczyć graficznie, mierząc pole powierzchni pod krzywą wykreśloną na płaszczyźnie p-V (Rys. 1b).

5. I zasada termodynamiki

Pierwsza zasada termodynamiki określa związek pomiędzy ciepłem i pracą oraz zmianą energii wewnętrznej ciała lub układu ciał. Stwierdza ona, że zmiana energii wewnętrznej układu może odbywać się poprzez wymianę ciepła Q z otoczeniem oraz wykonanie pracy W przez układ lub nad układem. Związek ten można wyrazić zależnością:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W,$$

(9)

gdzie: ΔU oznacza zmianę energii wewnętrznej, Q jest to ilość ciepła pobranego lub oddanego przez układ, W oznacza pracę wykonaną przez układ lub nad układem.

Przy stosowaniu powyższego równania musimy pamiętać, że:

$$\begin{array}{ll} \Delta Q > 0 & \text{ciepło pobrane przez układ,} \\ \Delta Q < 0 & \text{ciepło oddane przez układ} \\ \Delta W > 0 & \text{praca wykonana nad układem} \\ \Delta W < 0 & \text{praca wykonana przez układ} \end{array}$$

Zmiana energii wewnętrznej ciała lub układu ciał może być dodatnia lub ujemna.

6. Ciepło właściwe

Ciepłem właściwym (c_w) ciała (układu) nazywamy ilość ciepła pobranego przez jednostkę masy ciała przy zmianie jego temperatury o jeden stopień, powstałej w wyniku pobrania tego ciepła:

$$c_w = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad (10)$$

gdzie: Q jest to ilość ciepła pobranego przez ciało, m oznacza masę ciała, natomiast ΔT - zmianę temperatury. Jednostką tak rozumianego ciepła właściwego jest $J/kg \cdot K$.

Wzór ten jest słuszny tylko wówczas, jeśli ciepło właściwe nie zależy od temperatury lub dla bardzo małych przyrostów temperatur (ΔT). Dla dużych różnic temperatur mamy do czynienia z pewnym średnim ciepłem właściwym. Należy dodać, iż tak określone ciepło właściwe wymaga normalnego (stałego) ciśnienia.

7. Ciepło molowe

W termodynamice często wygodniej jest posługiwać się pojęciem ciepła molowego.

Ciepłem molowym (C) ciała nazywamy ilość ciepła pobranego przez jeden mol ciała, przy zmianie jego temperatury o jeden stopień powstałej w wyniku pobrania tego ciepła:

$$C = \frac{Q}{n \cdot \Delta T}, \quad (11)$$

gdzie n oznacza liczbę moli. Jednostką ciepła molowego jest $J/mol \cdot K$. Pomiędzy ciepłem właściwym i molowym zachodzi związek:

$$C = \mu \cdot c_w, \quad (12)$$

gdzie: (μ) jest masą cząsteczkową ciała, natomiast (c_w) jest *ciepłem właściwym* ciała.

8. Molowe ciepło właściwe gazów

W przypadku gazów wygodniej jest posługiwać się molem gazu zamiast np. kilogramem, dlatego w odniesieniu do gazów posługujemy się częściej pojęciem ciepła molowego niż właściwego. Ciepło molowe (właściwe) gazów zależy w istotny sposób od warunków w jakich zachodzi ich ogrzewanie. Dlatego też aby scharakteryzować gaz pod względem zdolności pobierania i oddawania energii wprowadza się dwa ciepła molowe: przy stałym ciśnieniu (C_p) i przy stałej objętości (C_v). Molowym ciepłem właściwym przy stałej objętości (C_v) nazywamy ilość ciepła pobranego przez jeden mol ciała przy zmianie jego temperatury o jeden stopień powstałej w wyniku pobrania tego ciepła, w stałej objętości. Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki $Q = \Delta U$ ($V = const$, więc $W = 0$), a ciepło molowe (zgodnie ze wzorem 11) będzie równe:

$$C_V = \frac{1}{n} \left(\frac{\Delta U}{\Delta T} \right)_{V=const} \quad (13)$$

Molowym ciepłem właściwym przy stałym ciśnieniu (C_p) nazywamy ilość ciepła pobranego przez jeden mol ciała, przy zmianie jego temperatury o jeden stopień powstałej w wyniku pobrania tego ciepła, przy stałym ciśnieniu:

$$C_p = \frac{1}{n} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_{p=const} \quad (14)$$

9. Ciepło molowe i właściwe ciał stałych

Na ogół ciepło właściwe ciał stałych jest mniejsze od ciepła właściwego danego materiału w stanie ciekłym lub gazowym. Wyjątkowo duże ciepło właściwe ma woda, co ma duże znaczenie w przyrodzie, gdyż zbiorniki wodne odgrywają rolę regulatorów ciepła (np. woda morska ogrzewa się latem znacznie słabiej niż ląd, a zimą stygnie znacznie szybciej niż ląd).

Z punktu widzenia mikroskopowej budowy ciała stałego wiemy, że w ciele stałym cząsteczki (atomy) znajdują się w ściśle określonym uporządkowaniu przestrzennym tworząc sieć krystaliczną oraz wykonują drgania wokół swoich położenia równowagi. Całkowita energia cząsteczki ciała stałego składa się z energii kinetycznej ruchu cieplnego E_k (oscylacji) oraz energii potencjalnej wzajemnych oddziaływań E_p .

Ze wzoru (6) wynika, że jeżeli weźmiemy pod uwagę jeden mol chemicznie prostej substancji to energia wewnętrzna takiej ilości ciała stałego będzie się wyrażała wzorem:

$$U = 3RT, \quad (15)$$

Tak więc zgodnie z definicją, ciepło molowe odniesione do jednego mola ciała stałego $C_v = 3R$, zaś ciepło właściwe $c_w = 3R/\mu$. Zakładając że $R = 8.32 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$, otrzymamy wartość ciepła molowego równą:

$$C_v = 25 \text{ [J/mol}\cdot\text{K]}. \quad (16)$$

Można to ująć słowami: w dostatecznie wysokich temperaturach ciepło molowe wszystkich chemicznie prostych ciał stałych jest w przybliżeniu jednakowe i wynosi $25 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$. Twierdzenie to nosi nazwę prawa Dulonga-Petita. Z powyższych zależności (w ujęciu klasycznym) wynika, że ciepło molowe ciał stałych nie zależy ani od temperatury ani od właściwości ciał stałych. Jednak doświadczenie wykazuje, że ciepło właściwe ciał stałych (c_w) zależy od temperatury, przy czym zależność taka szczególnie silnie przejawia się w niskich temperaturach.

10. Zasada bilansu cieplnego

Różne ciała stykając się ze sobą mogą wymieniać energię. Jednym z podstawowych i powszechnych sposobów wymiany energii między ciałami jest wymiana na sposób ciepła. Warunkiem koniecznym takiej wymiany jest istnienie różnicy temperatur i wówczas ciepło przepływa od ciał o wyższej temperaturze do ciał o niższej temperaturze. Niekiedy wymiana ciepła jest jedyną przyczyną zwiększania lub pomniejszania energii wewnętrznej ciała. Taka sytuacja ma

miejsce w przypadku układu ciał umieszczonych w *kalorymetrze*, czyli w urządzeniu, które uniemożliwia wymianę ciepła z otoczeniem realizując ideę izolacji ciał od otoczenia. W takich warunkach energia wewnętrzna całego układu jest stała, mimo że zachodzi wymiana ciepła pomiędzy tworzącymi go ciałami i energie wewnętrzne tych ciał ulegają zmianie. Układ taki dąży do stanu równowagi termodynamicznej, w którym to stanie temperatura wszystkich elementów jest jednakowa. Pierwsza zasada termodynamiki pozwala stwierdzić wówczas, że zmiana energii wewnętrznej całego układu jest zerowa. Możemy wtedy zastosować zasadę bilansu cieplnego.

Zasada bilansu cieplnego - mówi, że w układzie izolowanym suma ilości ciepła pobranego (Q_p) przez jedne ciała układu równa jest sumie ilości ciepła oddanego (Q_0) przez inne ciała tego układu.

Możemy to zapisać wzorem:

$$Q_1 + Q_2 + \dots = Q'_1 + Q'_2 + \dots, \quad (17)$$

czyli

$$Q_p = Q_0, \quad (18)$$

gdzie: poszczególne Q_1, Q_2 itd. oznaczają ilości ciepła pobrane przez poszczególne ciała w układzie, a Q'_1, Q'_2 itd. oznaczają ciepła oddane przez inne ciała tego układu.

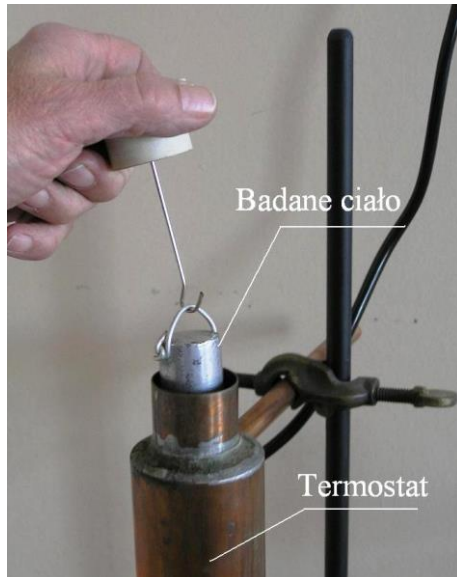
LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- Bolton W., Zarys fizyki, Tom 2, PWN, Warszawa 1988, s. 405-409
 Chyla K., Fizyka dla ZSZ, Wydanie trzecie, WSZiP, Warszawa 1991. s.122-123
 Dryński T. Doświadczenia pokazowe z fizyki, PWN, Warszawa, 1964
 Encyklopedia fizyki, Tom 1, PWN, Warszawa 1974, s.260-261
 Gabrylewski E., Fizyka dla klasy I liceum ogólnokształcącego, technikum i liceum zawodowego. PZWS, Warszawa 1973, s.217
 Halliday D., Resnick R., Fizyka Tom 1, PWN, Warszawa 1994, s.523
 Herman M., Kalestyński A., Widomski L., Podstawy fizyki dla kandydatów na wyższe uczelnie, PWN, Warszawa 1984, s.470-473, 204-207
 ISO (1995) Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization.
 Jaworski B.M., Piński A.A., Elementy fizyki, PWN, Warszawa 1979, s.321-346, 362-368
 Jenike M., Fizyka. Podręcznik dla liceów ogólnokształcących, WSZiP, Warszawa 1993, s.252-270
 Jeżewski M., Fizyka, PWN, Warszawa 1957, s.203-205
 Kamiński Z. Fizyka dla kandydatów na wyższe uczelnie techniczne, WNT, Warszawa 1984, s.262-263, 323-330
 Ling S .J., Sanny J., Moebis W. University Physics Volume 1, Samurai Media Limited, 2017.
 Szczeniowski S. Fizyka doświadczalna, Część II, PWN, Warszawa 1976, s.28-40
 Wróblewski A.K., Zakrzewski J.A., Fizyka, Tom 2, PWN, Warszawa 1984, s.543-545; 552

Modyfikacja ćwiczeń z przedmiotu Fizyka w ramach projektu pn. „Innowacyjny program strategicznego rozwoju Uczelni” o numerze POWR.03.05.00-00-Z20/18

13 POMIAR CIEPŁA WŁAŚCIWEGO CIAŁ STAŁYCH

ZASADA POMIARU



W czasie pomiaru ciało stałe o masie m_c i temperaturze T_p zawieszamy w termostacie. Para wodna przechodząca przez termostat ogrzewa to ciało do temperatury wrzenia wody (T_w). Ogrzane ciało zostaje następnie wprowadzone do kalorymetru z wodą. Ciało to oddaje ciepło Q_o :

$$Q_o = m_c c_c (T_w - T_k)$$

gdzie: c_c - ciepło właściwe badanego ciała, T_w - temperatura wrzenia wody, a T_k - temperatura końcowa ciała, wody i kalorymetru. Woda i kalorymetr ogrzewają się od temperatury T_p do T_k pobierając ciepło Q_p :

$$Q_p = (m_k c_k + m_w c_w) (T_k - T_p)$$

gdzie: m_k - masa kalorymetru, c_k jego ciepło właściwe, m_w - masa wody, c_w ciepło właściwe wody.

Metodą określenia poszukiwanej przez nas wielkości ciepła właściwego badanego ciała c_c jest zastosowanie zasady bilansu cieplnego. Zasadę tę można stosować do układów izolowanych. W naszym ćwiczeniu ideę izolacji układu od otoczenia realizuje kalorymetr. Zgodnie z zasadą bilansu cieplnego ciepło oddane przez badane ciało równe jest ciepłu pobranemu przez ciała pozostające z nim w kontakcie cieplnym:

$$Q_o = Q_p$$

Z równania bilansu cieplnego otrzymujemy następujący związek pomiędzy wielkościami mierzonymi a wyznaczanym ciepłem właściwym ciała:

$$c_c = \frac{(m_k c_k + m_w c_w)(T_k - T_p)}{m_c (T_w - T_k)} \quad (1)$$

gdzie: m_c - masa badanego ciała, m_w - masa wody w kalorymetrze, m_k - masa kalorymetru, $c_w = 4187 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ - ciepło właściwe wody, $c_k = 896 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ - ciepło właściwe kalorymetru aluminiowego, T_p - temperatura początkowa wody w kalorymetrze, T_k - temperatura końcowa wody w kalorymetrze (najwyższa po wrzuceniu ciała), T_w - temperatura wrzenia wody.

CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie średniego ciepła właściwego kilku ciał stałych metodą kalorymetryczną.



WYKONANIE ĆWICZENIA

1. Zważyć badane ciało (masa m_c) notując maksymalną niepewność pomiaru masy: $\Delta_d m_c = 0,1g$.
2. Włączyć ogrzewanie naczynia z wodą. Pokrętle regulatora ustawić maksymalną moc grzania.
3. Zawiesić na druciku badane ciało w termostacie (patrz fotografia) ogrzewając nadal wodę.
4. Zważyć osuszone naczynie kalorymetryczne (bez osłony) wraz z mieszadłem (masa m_k). $\Delta_d m_k = 0,1g$.
5. Napęlnić naczynie kalorymetryczne do połowy wodą destylowaną, a następnie zważyć je (masa m_l).
6. Doprowadzić wodę w ogrzewanym naczyniu do wrzenia i gotować ją przez 5 minut odprowadzając równocześnie parę wodną do naczynia z zimną wodą. Moc grzania można ograniczyć do $\frac{3}{4}$.
7. Wprowadzić zamocowany w statywie czujnik termometru cyfrowego do naczynia kalorymetrycznego i tuż przed włożeniem ciała do kalorymetru zmierzyć temperaturę (T_p). $\Delta_d T_p = 0,2^\circ C$.
8. Wprowadzić badane ciało do naczynia kalorymetrycznego (trzymając za drucik).
9. Mieszając wodę w naczyniu kalorymetrycznym obserwować wskazania termometru i zanotować najwyższą wartość temperatury (T_k). $\Delta_d T_k = 0,2^\circ C$.
10. Przyjmujemy, że temperatura badanego ciała po ogrzaniu jest równa temperaturze wrzenia wody (T_w). Ponieważ temperatura wrzenia wody zależy od ciśnienia powietrza, aktualne ciśnienie należy odczytać na barometrze i zanotować wynik pomiaru (p_t). Zgodnie ze wskazówkami podanymi w instrukcji barometru rtęciowego obliczyć poprawki Δp_1 , Δp_2 i Δp_3 i zapisać skorygowaną wartość ciśnienia p_a . W tablicach znaleźć temperaturę wrzenia wody (T_w) odpowiadającą ciśnieniu p_a .
11. Powtórzyć pomiary dla innego ciała.

OPRACOWANIE WYNIKÓW

A. Obliczenie wyniku pomiaru pośredniego

Obliczyć ciepło właściwe dla każdego z ciał użytych do pomiaru według wzoru (1). Wartości różnic temperatur wyrażone w kelwinach są równe liczbowo wartościom wyrażonym w stopniach Celsjusza. Wykonać rachunek na jednostkach.

B. Analiza niepewności pomiarowych

Niepewności standardowe pomiaru mas oraz temperatur obliczone na podstawie wzoru (4)* wynoszą

$$u(m_c) = u(m_k) = u(m_l) = \frac{\Delta_d m}{\sqrt{3}} = \frac{0,1g}{\sqrt{3}} = 0,058g; \quad u(T_p) = u(T_k) = \frac{\Delta_d T}{\sqrt{3}} = \frac{0,2^\circ C}{\sqrt{3}} = 0,12^\circ C.$$

1. Dla jednego z badanych ciał na podstawie wzoru (9)* obliczyć niepewność standardową złożoną pomiaru pośredniego $u(c_c)$ wyznaczonego ciepła właściwego c_c , korzystając z przekształconego wzoru (1) do postaci (2):

$$c_c = \frac{[m_k c_k + (m_l - m_k) c_w] (T_k - T_p)}{m_c (T_w - T_k)} \quad (2)$$

2. Wykonać rachunek na jednostkach.
3. Zaokrąglić uzyskaną wartość $u(c_c)$ oraz wynik c_c według zasad przedstawionych w (*).
4. Obliczyć niepewność rozszerzoną: $U(c_c) = k u(c_c)$, $k = 2$
5. Zapisać wynik w postaci: $c_c \pm U(c_c)$,
6. Otrzymane wyniki porównać z wartościami tablicowymi.

Wzory (*) patrz K.Rębilas „Wprowadzenie do metod opracowania wyników pomiarowych”.