

Wyznaczanie ciepła właściwego powietrza metodą rozładowania kondensatora

- I. Cel ćwiczenia:** zapoznanie z zagadnieniem pomiaru ciepła właściwego gazów, zjawiskiem rozładowania kondensatora i metodą pomiaru energii zgromadzonej w naładowanym kondensatorze elektrolitycznym.
- II. Przyrządy:** układ pomiarowy złożony z zasilacza, baterii kondensatorów elektrolitycznych o nominalnej pojemności 10000 μF i naczynia Dewara z manometrem cieczowym (nafta), multimetr cyfrowy, opornik wzorcowy 10 k Ω , sekundomierz.
- III. Literatura:**
- [1] S. Szczeniowski – Fizyka doświadczalna, t.II „Ciepło” (Ciepło właściwe gazów i metoda jego wyznaczenia);
 - [2] E. M. Purcell – Elektryczność i magnetyzm (Proces rozładowywania kondensatora);
 - [3] J. Weysenhoff – Zasady elektromagnetyki i optyki klasycznej (Elementy teorii dielektryków).
 - [4] Instrukcja do ćwiczenia E-25 „Rozładowanie kondensatora”.

IV. Wprowadzenie

Ciepłem właściwym substancji w danej temperaturze nazywamy granicę stosunku ilości ciepła ΔQ , pobranego przez jednostkę masy tej substancji do zmiany temperatury powstałej w wyniku pobrania tego ciepła, a dążącej do zera:

$$c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{dQ}{dT} \quad (1)$$

Stosunek $\Delta Q/\Delta T$ odniesiony do całej próbki danej substancji (ciała, układu ciał) nazywamy pojemnością cieplną, a odniesiony do jednego mola substancji - ciepłem molowym (C)

Ciepło właściwe stanowi nie tylko cechę charakterystyczną każdego pierwiastka lub związku chemicznego, ale zależy ponadto od jego stanu skupienia, sposobu ogrzewania (np. w stałej objętości jest to c_v , pod stałym ciśnieniem jest to c_p) i temperatury.

Jednym ze sposobów wyznaczenia ciepła właściwego gazu pod stałym ciśnieniem jest przepuszczanie gazu ogrzewanego do określonej temperatury przez system srebrnych rurek, wypełnionych w celu szybkiej wymiany ciepła srebrnymi opilkami i zanurzonych w kalorymetrze wodnym. Mierzy się wówczas temperaturę początkową i końcową gazu, temperaturę wody w kalorymetrze oraz ilość przepływającego gazu.

Ciepło właściwe gazu w stałej objętości wyznaczyć można za pomocą tzw. manometrycznej bomby kalorymetrycznej. W stalowym, kulistym zbiorniku zanurzonym w kalorymetrze wodnym umieszcza się ładunek wybuchowy w atmosferze badanego gazu. Po elektrycznym odpaleniu ładunku mierzy się maksymalne ugięcie membrany, zamykającej niewielki otwór w zbiorniku, a następnie oblicza się maksymalne ciśnienie wytworzone w zbiorniku pod wpływem ogrzania gazu. Metoda ta wymaga znajomości ilości ciepła wydzielającego się podczas eksplozji oraz pojemności cieplnej spalin. W opisanym ćwiczeniu zastosowano modyfikację tej ostatniej metody, polegającej na dostarczeniu do wnętrza zbiornika powietrza energii z naładowanej baterii kondensatorów o dużej pojemności.

Po zamknięciu wyłącznika W (rys. 1) zasilacz zostaje odłączony od baterii kondensatorów, która rozładowuje się poprzez umieszczoną wewnątrz naczynia Dewara spiralę z cienkiego drutu oporowego o znikomej pojemności cieplnej. Wskutek wydzielania się w naczyniu Dewara określonej energii cieplnej E temperatura powietrza wzrasta o ΔT zgodnie z równaniem

$$E = \frac{m}{\mu} C_v \Delta T \quad (2)$$

gdzie

m – masa powietrza w naczyniu,

μ – masa 1 mola powietrza w danych warunkach,

C_v – molowe ciepło właściwe powietrza w stałej objętości.

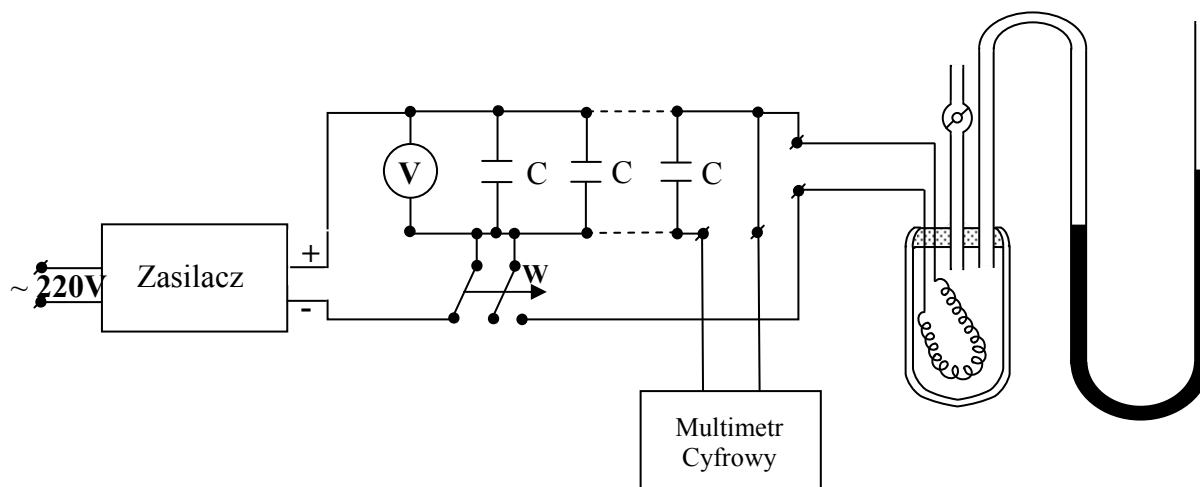
Dla procesu zachodzącego w stałej objętości, gdy $V = \text{constans}$ (przemiana izochoryczna) mamy zależność $p/T = \text{constans}$. Stąd otrzymujemy

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} = \text{const} = \frac{p}{T} \quad (3)$$

$$\Delta p_{\text{max}} = \frac{p}{T} \Delta T \quad (4)$$

IV.1 Metoda wyznaczania ciepła właściwego powietrza w stałej objętości.

Układ pomiarowy przedstawiony jest schematycznie na rys. 1



Rys.1 Układ pomiarowy

Stosunek mas m/μ możemy zastąpić przez stosunek objętości 1 mola powietrza w danych warunkach do objętości naczynia Dewara V_m/V_o i korzystając ze wzorów (2) i (4) otrzymujemy wzór na doświadczalną wartość ciepła molowego

$$C_v = \frac{V_m}{V_o} \cdot \frac{p}{T} \cdot \frac{E}{\Delta p_{\text{max}}} \quad (5)$$

gdzie Δp_{max} jest maksymalną różnicą ciśnień wskazaną przez manometr cieczowy podczas rozładowania baterii kondensatorów.

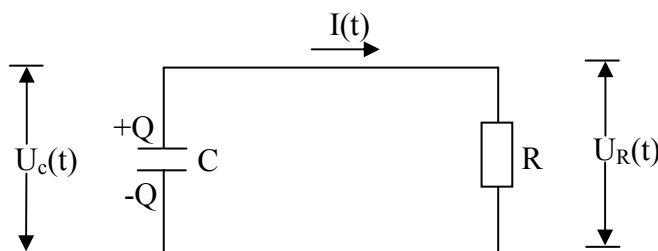
IV.2 Metoda pomiaru energii

Energia naładowanego kondensatora próżniowego o pojemności C , pomiędzy którego okładkami istnieje różnica potencjałów U , jest jednoznacznie określona wzorem

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (6)$$

Jeżeli okładki tego kondensatora połączymy ze sobą przewodnikiem o stałym oporze elektrycznym R (rys.2), to zgodnie z II prawem Kirchhoffa dla obwodu zamkniętego suma spadków potencjałów musi przyjąć wartość równą zero:

$$U_C + U_R = \frac{Q}{C} + IR = 0 \quad (7)$$



Rys.2

Różniczkując ostatnie wyrażenie względem czasu otrzymujemy po prostym przekształceniu równanie różniczkowe o rozdzielonych zmiennych

$$\frac{dI}{I} = -\frac{1}{RC} dt \quad (8)$$

którego rozwiązaniem jest funkcja opisująca zależność natężenia prądu w obwodzie od czasu

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (9)$$

gdzie U_0 jest różnicą potencjałów między okładkami kondensatora w chwili $t = 0$, kiedy to zaczyna się proces rozładowania.

A zatem napięcia na kondensatorze i oporniku maleją wykładniczo z czasem

$$U_C = U_R = U_0 e^{-\alpha t} \quad (10)$$

gdzie $\alpha = \frac{1}{RC}$.

Iloczyn RC posiada wymiar czasu i nazywany jest stałą czasową obwodu RC . Natężenie prądu i napięcie $U_C = U_R$ maleją po czasie $\tau = RC$ $e -$ krotnie.

Podczas procesu rozładowania kondensatora energia pola elektrycznego ulega przemianie w energię cieplną, wydzieloną na przewodniku łączącym okładki. Wartość chwilowa mocy prądu elektrycznego przepływającego przez opór R wyraża się wzorem

$$W = U_R \cdot I = \frac{1}{R} \cdot U_R^2 = \frac{1}{R} \cdot U_0^2 e^{-2\alpha t} \quad (11)$$

Aby znaleźć wartość energii, wydzielonej w przedziale czasu $[t_1, t_2]$ należy scałkować funkcję (11) względem czasu w tym przedziale:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} W(t)dt = \frac{U_0}{R} \int_{t_1}^{t_2} e^{-2\alpha t} dt = \frac{1}{2\alpha R} [U_R^2(t_1) - U_R^2(t_2)] \quad (12)$$

W szczególności całkowita energia wydzielona podczas rozładowania kondensatora wynosi

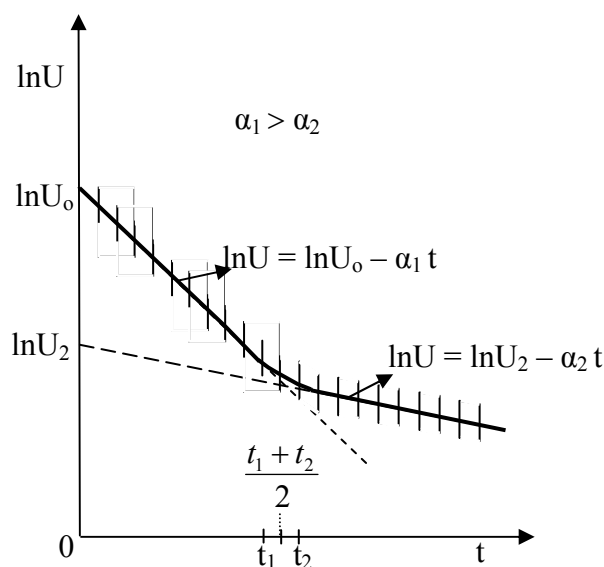
$$E_C = \frac{U_0^2}{2\alpha R} = \frac{1}{2} C U_0^2 \quad (13)$$

W przeciwieństwie do kondensatora próżniowego kondensator elektrolityczny nie posiada jednoznacznie określonej pojemności, gdyż wartość stałej dielektrycznej substancji wypełniającej przestrzeń między okładkami może zależeć nie tylko od temperatury i natężenia pola elektrycznego, ale od „historii” danego kondensatora czyli od jego poprzednich warunków pracy.

W szczególności proces rozładowania kondensatora elektrolitycznego nie musi wcale przebiegać w sposób opisany równaniami (9) i (10). Aby ocenić energię wydzieloną w procesie rozładowania należy zatem wyznaczyć zależność spadku potencjału od czasu na oporniku przez, który rozładowujemy baterię kondensatorów, a następnie obliczyć energię z zależności

$$E = \int_0^{\infty} W(t)dt = \int_0^{\infty} \frac{U_R^2(t)}{R} dt \quad (14)$$

Przypuśćmy, że proces rozładowania przebiega tak, jakby pojemność baterii ulegała w pewnym, dostatecznie „wąskim” przedziale czasu $[t_1, t_2]$ zmianie z wartości C_1 na C_2 . Wówczas wykres funkcji $U_R = f(t)$ w skali logarytmiczno-liniowej będą w przedziałach $[0, t_1]$ i $[t_2, \infty]$ dwie proste o różnych współczynnikach kierunkowych i krzywa w przedziale $[t_1, t_2]$, jak to ilustruje rys.3.



Rys. 3 Krzywa rozładowania kondensatora, którego parametry ulegają zmianie w przedziale czasu (t_1, t_2) .

Jeżeli czas $\Delta t = t_2 - t_1$ jest znacznie krótszy od czasu t_1 , to możemy przyjąć, iż energia wydzielona w procesie rozładowania jest równa

$$E = \int_0^{\infty} W(t) dt \cong \frac{U_0}{R} \int_0^{\frac{1}{2}(t_2+t_1)} e^{-2\alpha_1 t} dt + \frac{U_0}{R} \int_{\frac{1}{2}(t_2+t_1)}^{\infty} e^{-2\alpha_2 t} dt =$$

$$= \frac{1}{2\alpha_1 R} [U_R^2(t=0) - U_R^2(t = \frac{t_2+t_1}{2})] + \frac{1}{2\alpha_2 R} U_R^2(t = \frac{t_2+t_1}{2}) \quad (15)$$

gdzie stałe α_1 i α_2 są liczbowo równe odpowiednio $\frac{1}{RC_1}$ i $\frac{1}{RC_2}$.

Innymi słowy zastąpiliśmy zależność $U_R = f(t)$ funkcją wykładniczą o wykładniku zmieniającym się skokowo dla $t = \frac{1}{2}(t_2 + t_1)$

Jeżeli otrzymana w wyniku pomiaru zależność $U_R(t)$ wykreślona w skali logarytmiczno (logarytm naturalny) – liniowej, daje się aproksymować z pewnym przybliżeniem dwoma prostymi, to najprostszym sposobem oceny energii jest obliczenie na podstawie wykresu wartości odpowiednich wielkości i skorzystanie ze wzoru (15).

IV.3 Poprawka na rozpraszanie energii na zewnątrz układu.

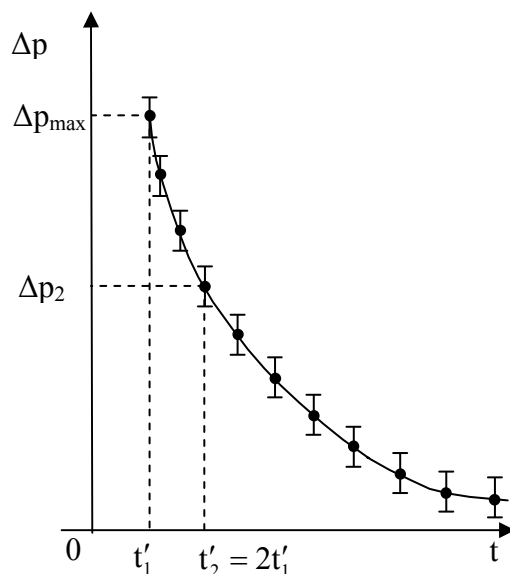
W dotychczasowych rozważaniach przyjmowaliśmy, że izolacja cieplna układu jest idealna, podczas gdy w rzeczywistości energia cieplna wydzielona w naczyniu Dewara ulega stosunkowo szybkiemu rozproszeniu na zewnątrz, co ma istotny wpływ na wartość ciepła właściwego C_V obliczaną za pomocą wzoru (5). Jeżeli energię rozproszoną do chwili osiągnięcia przez powietrze maksymalnego ciśnienia oznaczamy przez E_r to wzór (5) możemy przedstawić w postaci

$$C_V = \alpha \cdot \frac{V_m}{V_0} \cdot \frac{p}{T} \cdot \frac{E}{\Delta p_{\max}} \quad (16)$$

gdzie
$$\alpha = \frac{E - E_r}{E} \quad (16a)$$

Ponieważ różnica ciśnień Δp jest proporcjonalna do różnicy energii wydzielonej i rozproszonej, to miarą szybkości rozpraszania energii jest szybkość spadku ciśnienia w naczyniu po osiągnięciu maksimum ciśnienia. Załóżmy, że doświadczalną zależność Δp od czasu t przedstawia rys.4. W pierwszym przybliżeniu możemy przyjąć, iż względny ubytek energii E_r/E od chwili rozpoczęcia rozładowania $t = 0$ do chwili osiągnięcia przez ciśnienie wartości maksymalnej jest taki sam, jak ubytek energii w czasie $\Delta t = t'_2 - t'_1$ co prowadzi do zależności

$$\alpha = 1 - \frac{E_r}{E} \cong 1 - \frac{\Delta p_{\max} - \Delta p_2}{\Delta p_{\max}} = \frac{\Delta p_2}{\Delta p_{\max}} \quad (17)$$



Rys. 4 Przewidywana zależność różnicy ciśnień od czasu.

V. Pomiary

1. Wyrównać ciśnienie wewnątrz naczynia Dewara do atmosferycznego, zanotować jego wartość oraz temperaturę otoczenia. Naładować baterię kondensatorów tak, aby różnica potencjałów wynosiła 12 V według wskazań multimetru cyfrowego. Wyznaczyć maksymalną różnicę ciśnień Δp_{\max} podczas rozładowania baterii.
2. Wyznaczyć zależność różnicy ciśnień Δp od czasu podczas rozładowania kondensatorów, a w szczególności czasu osiągnięcia maksimum ciśnienia.
3. Wyznaczyć zależność napięcia $U_R(t)$ od czasu podczas rozładowania baterii naładowanej do takiej samej różnicy jak poprzednio poprzez opornik wzorcowy 10 k Ω . Pomiary napięcia wykonać multimetrem cyfrowym w przedziale napięć $[U_{\max}, 0.1U_{\max}]$ co 15 s.
4. Powtórzyć pomiary, omówione w punktach 1 i 3 dla dwu innych napięć.
5. Zmierzyć opór elektryczny spirali w naczyniu Dewara.

VI. Sposób opracowania wyników

1. Wykreślić zależność logarytmu napięcia na oporniku wzorcowym od czasu $\ln U_R(t)$, a następnie wyznaczyć wartości współczynników kierunkowych prostych, opisujących przebieg punktów doświadczalnych na wykresie. Obliczyć całkowitą energię E wydzieloną na oporniku.
2. Wykreślić zależność różnicy ciśnienia Δp od czasu i wyznaczyć wartość poprawki α (wzory 16 i 17).
3. Obliczyć wartość ciepła molowego powietrza C_V i oszacować błąd tej wartości.
4. Ocenić wpływ czasu rozładowania baterii kondensatorów na uzyskany wynik.
5. Przeprowadzić dyskusję następujących zagadnień:
 - a) Energia wydzielona w naczyniu Dewara oceniana jest w tym ćwiczeniu z pomiarów rozładowania kondensatorów przez opór 10 k Ω , podczas gdy opór grzejniczka jest rzędu kilkudziesięciu omów. Czy może mieć to wpływ na dokładność oceny energii i w jaki sposób można by było sprawdzić to doświadczalnie?
 - b) Podczas rozładowania kondensatorów przez opornik wzorcowy równoległe do baterii włączone są: miernik analogowy o oporze wewnętrznym 200 k Ω i miernik cyfrowy o oporze 10 M Ω . Jaki wpływ wywiera to na pomiar energii?

- c) Jakie czynniki zewnętrzne, oprócz ciśnienia atmosferycznego i temperatury powietrza mogą rzutować na otrzymaną wartość C_V ?

VII. Uzupełnienia

Jeżeli pomiaru napięcia dokonujemy standardowymi miernikami cyfrowymi, stosujemy się do wskazówek zamieszczonych poniżej.

Gniazdami pomiarowymi multimetru cyfrowego (MX505, METEX 280 i podobnych) są gniazda **COM** i jedno z gniazd oznaczonych symbolem **V/Ω, mA(A), 20A(10A)**. W celu pomiaru napięcia łączymy przewody do zacisków **COM** i **V/Ω**. Przed przyłączeniem gniazd pomiarowych miernika do układu przełącznik **DC/AC** (jeśli taki jest) ustawiamy w położeniu **DC**. Obrotowy przełącznik funkcji i zakresów ustawiamy w położeniu **20V**. Wówczas multimetr będzie pracował jako woltomierz cyfrowy napięcia stałego o zakresie **20V**.

Jeśli przełącznika **DC/AC** nie ma, wówczas rodzaj pracy **DC** lub **AC** jest wybierany obrotowym przełącznikiem funkcji i zakresów (jednocześnie z wyborem zakresu).

W czasie wykonywania pomiarów napięcia przełączanie go na inny rodzaj pracy („Ω”, „C”, „mA”) jest niedopuszczalne, gdyż grozi uszkodzeniem.