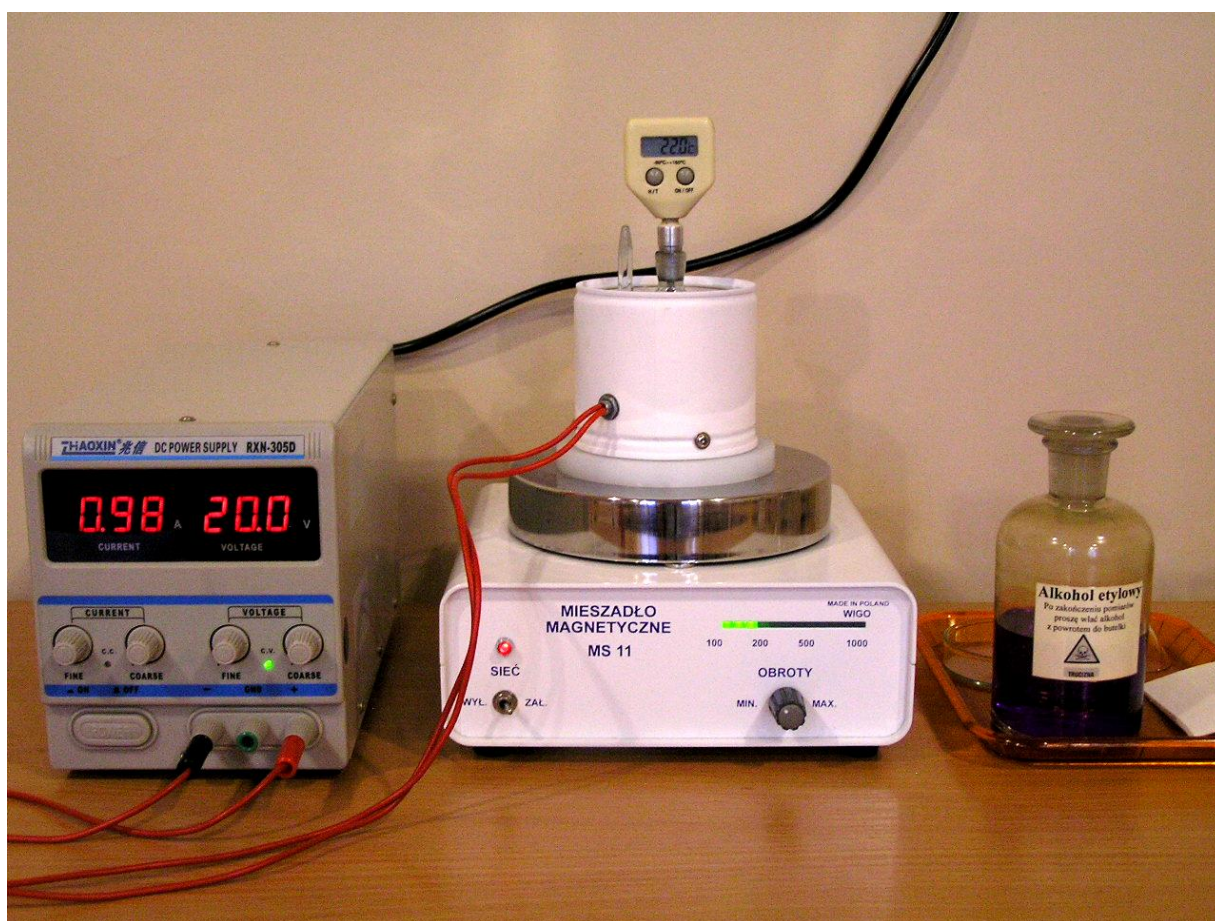


Anna Linscheid, Piotr Janas, Paweł Turkowski
Dydaktyka Fizyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

ĆWICZENIE 12

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ROZSZERZALNOŚCI CIECZY ZA POMOCĄ PIKNOMETRU

Kraków, 28.09.2021



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe do ćwiczenia nr 12 w pracowni fizycznej UR w Krakowie

SPIS TREŚCI

CZEŚĆ TEORETYCZNA

Cząsteczkowa teoria cieczy

Definicja współczynnika rozszerzalności objętościowej

Rozszerzalność objętościowa cieczy. Dane doświadczalne

Anomalna rozszerzalność wody

Współczynnik rozszerzalności cieczy dwuskładnikowej

Rozszerzalność objętościowa gazów

Zasada pomiaru

WYKAZ RYSUNKÓW

Rys.1. Stanowisko pomiarowe do ćwiczenia nr 12 w pracowni fizycznej UR w Krakowie

Rys.2. Zależność objętości wody od temperatury w zakresie temperatur od 0⁰C do 50⁰C

Rys.3. Zależność objętości wody od temperatury w zakresie temperatur od 0⁰C do 5⁰C

Rys.4. Zależność średniego współczynnika rozszerzalności objętościowej wodnego roztworu alkoholu etylowego C₂H₆O od zawartości alkoholu

Rys.5. Piknometry

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA INSTRUKCJA DO WYKONANIA ĆWICZENIA

ZAKRES WYMAGANYCH WIADOMOŚCI

Pojęcie temperatury, energii wewnętrznej, ciepła. Sposoby przekazywania ciepła.

Mikroskopowy i makroskopowy opis rozszerzalności cieplnej ciał. Rozszerzalność cieplna liniowa i objętościowa. Definicja współczynnika rozszerzalności objętościowej. Związek pomiędzy współczynnikiem rozszerzalności liniowej i objętościowej dla izotropowych ciał stałych. Rola rozszerzalności cieplnej w powstawaniu prądów konwekcyjnych. Anomalna rozszerzalność wody i jej znaczenie. Termometry cieczowe.

CZEŚĆ TEORETYCZNA

Cząsteczkowa teoria cieczy

Cząsteczki lub atomy ciała stałego mogą drgać wokół położenia równowagi. Amplituda tych drgań zależy od temperatury. Natomiast w gazach cząsteczki nie drgają lecz przemieszczają się swobodnie po całym dostępnym obszarze zderzając się między sobą i ze ściankami naczynia, w którym się znajdują. Wraz ze wzrostem temperatury rośnie średnia prędkość ich ruchu.

Ciecze posiadają charakter pośredni pomiędzy gazami i ciałami stałymi. Składają się z cząsteczek ciasno upakowanych, tak jak w ciele stałym. Jednak podobnie jak w gazach cząsteczki nie są uporządkowane i mogą się przemieszczać względem siebie. Ściślej mówiąc małe obszary cieczy mogą być jednak zajmowane przez cząsteczki ułożone w sposób uporządkowany. To chwilowe uporządkowanie w małym obszarze nazwane jest **uporządkowaniem bliskiego zasięgu**.

Cząsteczki w cieczech drgają, podobnie jak w ciałach stałych, wokół chwilowych położenia równowagi przeskakując po pewnym czasie w nowe położenie równowagi. Średni okres tych drgań (czas konieczny do wykonania jednego pełnego drgania) jest bardzo krótki i wynosi około 10^{-12} s. Średni czas przebywania w danym stanie równowagi, zwany **czasem relaksacji**, waha się od 10^{-11} s dla cieczy o małym współczynniku lepkości do godziny lub nawet doby dla cieczy bardzo lepkich. W tym czasie cząsteczka może wykonać dużą liczbę drgań.

Doprowadzenie ciepła do ciała w stanie stałym, ciekłym lub gazowym powoduje w nim szereg mikroskopowych i makroskopowych zmian. Poniżej zajmiemy się ilościowym opisem zjawiska rozszerzalności termicznej cieczy. Innym makroskopowym efektem doprowadzenia ciepła do pewnej objętości cieczy mogą być tzw. **prądy konwekcyjne**. Są to ruchy fragmentów cieczy w kierunku pionowym. Warunkiem powstania prądów konwekcyjnych jest istnienie różnic temperatur, a zatem i różnic gęstości, w naczyniu z cieczą. Zgodnie z prawem Archimedesesa, fragmenty cieczy o mniejszej gęstości wypływają na powierzchnię a ich miejsce zajmuje ciecz o większej gęstości. Cząsteczkowa teoria cieczy może być punktem wyjścia do wyjaśnienia tych zjawisk. Rozszerzalność objętościową gazów, można wyjaśnić na gruncie prostego modelu gazu zwanego gazem doskonałym.

Definicja współczynnika rozszerzalności objętościowej

Obserwując skalę termometru rtęciowego można wysunąć przypuszczenie, że podczas ogrzewania dowolnej cieczy zachodzi zmiana jej objętości ΔV tym większa im większy jest przyrost temperatury Δt . Równe odstępstwa pomiędzy działkami skali termometru (liniowość skali) sugerują nawet proporcjonalność zmian objętości i temperatury: $\Delta V \sim \Delta t$. Przyrost ΔV zależy także od tego z jak dużą ilością cieczy V_0 mamy do czynienia. Przypuszczamy, że zachodzi proporcjonalność $\Delta V \sim V_0$, tzn. że dwukrotnie większa ilość tej samej cieczy rozszerzy się przy tej samej zmianie temperatury Δt o dwukrotnie większą ilość cm^3 . Trzecim czynnikiem wpływającym na wartość przyrostu ΔV jest niewątpliwie rodzaj cieczy. Podsumowując te obserwacje możemy zapisać:

$$\Delta V \sim V_0 \Delta t$$

Jeśli chcemy zastąpić znak proporcjonalności "~" znakiem równości musimy wprowadzić współczynnik proporcjonalności, który zależy od rodzaju cieczy. Oznaczając go przez β możemy zatem napisać:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta t .$$

Powyższą zależność można uznać za definicję współczynnika β zwanego (średnim) współczynnikiem rozszerzalności cieplnej danej cieczy. **Średni współczynnik rozszerzalności objętościowej** zdefiniowany jest zatem następująco:

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0(t - t_0)}, \quad (1)$$

gdzie: V_0 jest objętością ciała w temperaturze t_0 natomiast V_t jego objętością w temperaturze t . Iloraz $(V_t - V_0)/V_0$ to względna zmiana objętości. Ponieważ tę względną zmianę objętości dzielimy w definicji (1) przez zmianę temperatury $(t - t_0)$ więc równanie definiujące współczynnik rozszerzalności objętościowej odczytać można także w następujący sposób: „ β jest względną zmianą objętości wywołaną zmianą temperatury o jeden stopień" (Celsjusza lub Kelvina). Z definicji (1) odczytać można jednostki, w których wyrażana jest wartość β : jest to $1/K$ (tzn. K^{-1}) lub $1/^\circ C$, gdzie K i $^\circ C$ oznaczają odpowiednio Kelwiny i stopnie Celsjusza. Niekiedy stosuje się oznaczenie $1/deg$ (deg^{-1}); deg jest międzynarodowym (układ SI) symbolem stopni. Wartości β dla czterech wybranych cieczy podano w Tabeli 1.

Tabela 1. Wartości współczynników rozszerzalności objętościowej wybranych cieczy w temperaturze $18^\circ C$.

CIECZ	alkohol etylowy	gliceryna	rtęć	woda
$\beta [1/^\circ C]$	0.00110	0.00050	0.000181	0.00018

Dla **izotropowych ciał** stałych w tablicach wielkości fizycznych odnajdujemy zwykle jedynie wartości współczynników rozszerzalności liniowej α . Wartość współczynnika β nie jest podawana, ponieważ zachodzi wówczas z dużą dokładnością związek

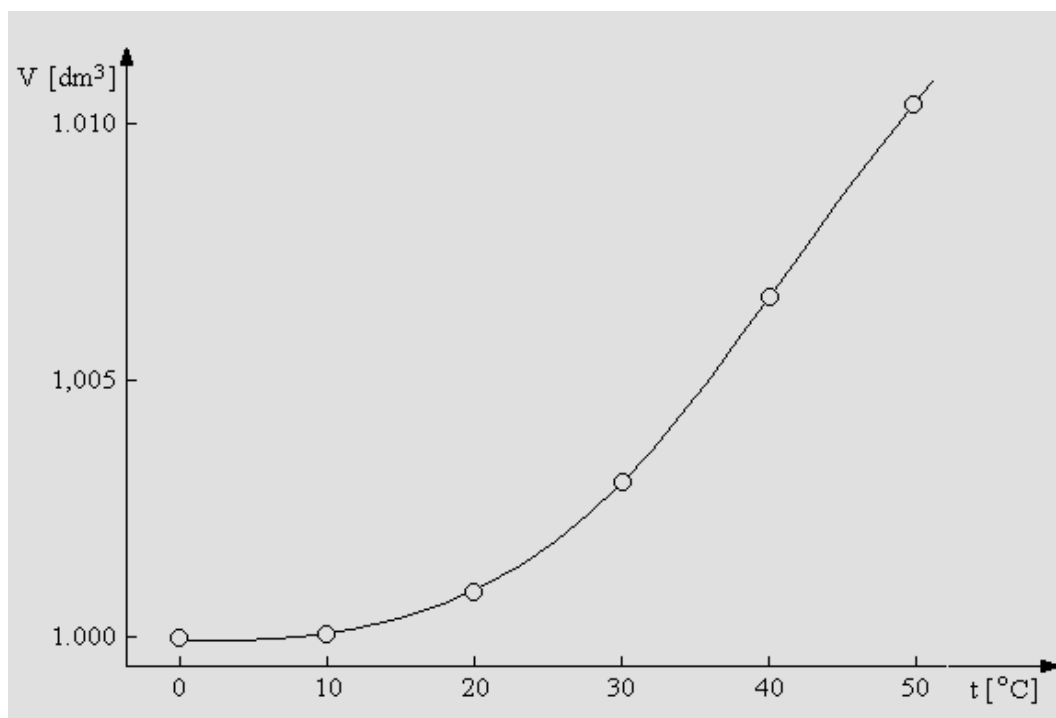
$$\beta = 3\alpha .$$

Anizotropowe ciała stałe (ciała, które nie rozszerzają się jednakowo we wszystkich kierunkach) wymagają opisu rozszerzalności termicznej za pomocą dwu lub trzech współczynników rozszerzalności liniowej.

Rozszerzalność objętościowa cieczy. Dane doświadczalne

Na ogół objętość ciał rośnie wraz ze wzrostem temperatury, tzn. $\beta > 0$. Ponadto wartość β jest zwykle różna dla różnych przedziałów temperatur ($t-t_0$), dla których została zmierzona. Rys.2 ilustruje zależność objętości V wody od temperatury t . Zależność ta nie jest liniowa.

W konsekwencji współczynnik rozszerzalności wody jest różny w różnych przedziałach temperatur i wyznaczanie jego wartości powinno być przeprowadzane przy zastosowaniu możliwie małej różnicy temperatur: końcowej i początkowej. Mała zmiana temperatury powoduje jednak niewielką zmianę objętości, którą nie jest łatwo zmierzyć z odpowiednią dokładnością.



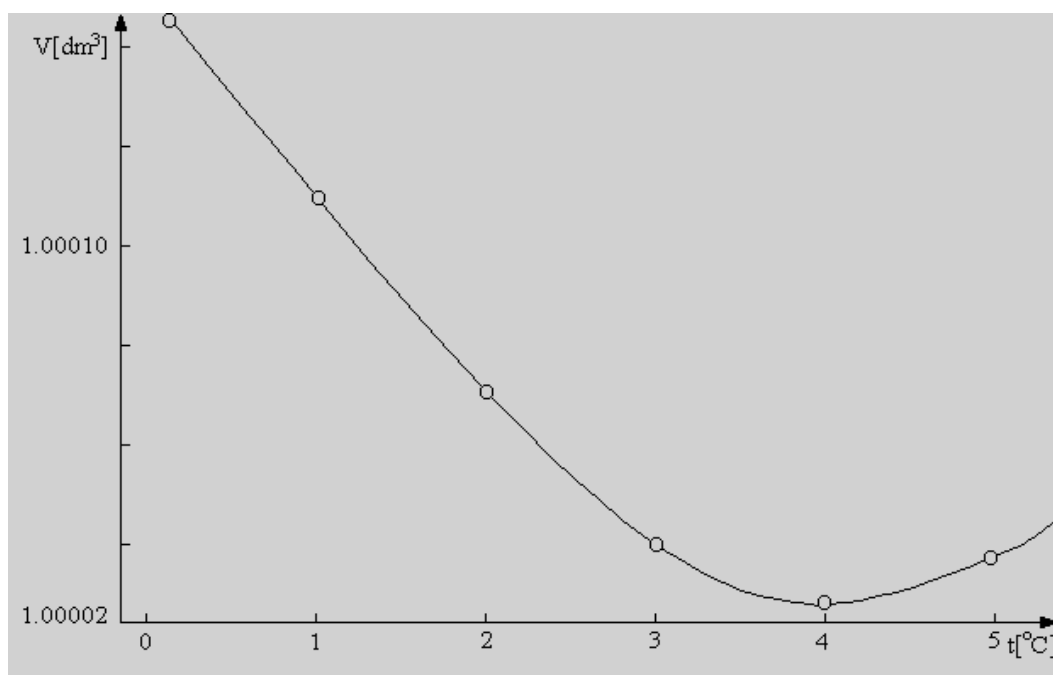
Rys.2. Zależność objętości wody od temperatury w zakresie temperatur od 0°C do 50°C [wg. Jeżewski i Kalisz s.50].

Druga trudność polega na tym, że pomiar musi być przeprowadzany w naczyniu, które również rozszerza się przy ogrzewaniu. Efekt ten należy uwzględnić w opracowaniu wyniku pomiaru. Okazuje się jednak, że współczynniki rozszerzalności objętościowej ciał stałych są zwykle o rząd wielkości mniejsze (tzn. od 10x do 100x) od tych, które charakteryzują ciecze. Dla przykładu szkło typu *crown*, w przedziale temperatur 0°C - 100°C , posiada $\beta \approx 0.000026$ [$1/^\circ\text{C}$] = $2.6 \cdot 10^{-5}$ [$1/^\circ\text{C}$].

Z porównania podanych w Tabeli 1 wartości współczynników β ze współczynnikiem opisującym szkło wynika, że poziom tych cieczy w naczyniu szklanym będzie podnosił się podczas ogrzewania. Efekt ten jest jednak niewielki, ponieważ zmiana temperatury o 10°C spowoduje najwyżej 1% wzrost poziomu cieczy.

Anomalna rozszerzalność wody

Rys.1 sugeruje, że w przedziale temperatur od 0°C do 50°C objętość wody rośnie monotonicznie. Dokładniejszy wykres przedstawiony na Rys.3. ujawnia, że w zakresie temperatur od 0°C do 4°C (ściślej mówiąc do 3.98°C) wzrost temperatury powoduje zmniejszenie objętości czyli wzrost gęstości wody. Tego typu zachowanie cieczy jest rzadkie. Określone zostało więc jako **anomalna rozszerzalność wody**. Anomalną rozszerzalność tłumaczyć można tzw. asocjacją drobin H₂O.



Rys.3. Zależność objętości wody od temperatury w zakresie temperatur od 0°C do 5°C [wg. Jeżewski i Kalisz s.50].

Największa gęstość wody przypada na 3.98°C i wynosi prawie dokładnie 10³kg/m³. W temperaturach niższych i wyższych jej gęstość jest mniejsza. Ta własność jest ważna dla życia organicznego w wodzie, gdyż utrudnia zamarzanie wody w pobliżu dna. Przy dostatecznie niskiej temperaturze powietrza woda w głębokim zbiorniku zachowuje się w ten sposób, że ochłodzona poniżej 4°C pozostaje na powierzchni natomiast woda o temperaturze 4°C, która posiada największą gęstość, opada na dno zgodnie z prawem Archimedes'a (ciała o gęstości większej toną w cieczy o gęstości mniejszej). W końcu na powierzchni wody powstaje warstwa lodu chroniąca zbiornik przed dalszym obniżaniem temperatury. Stała dodatnia temperatura wody w pobliżu dna, choć jest niska, pozwala na przetrwanie życia organicznego.

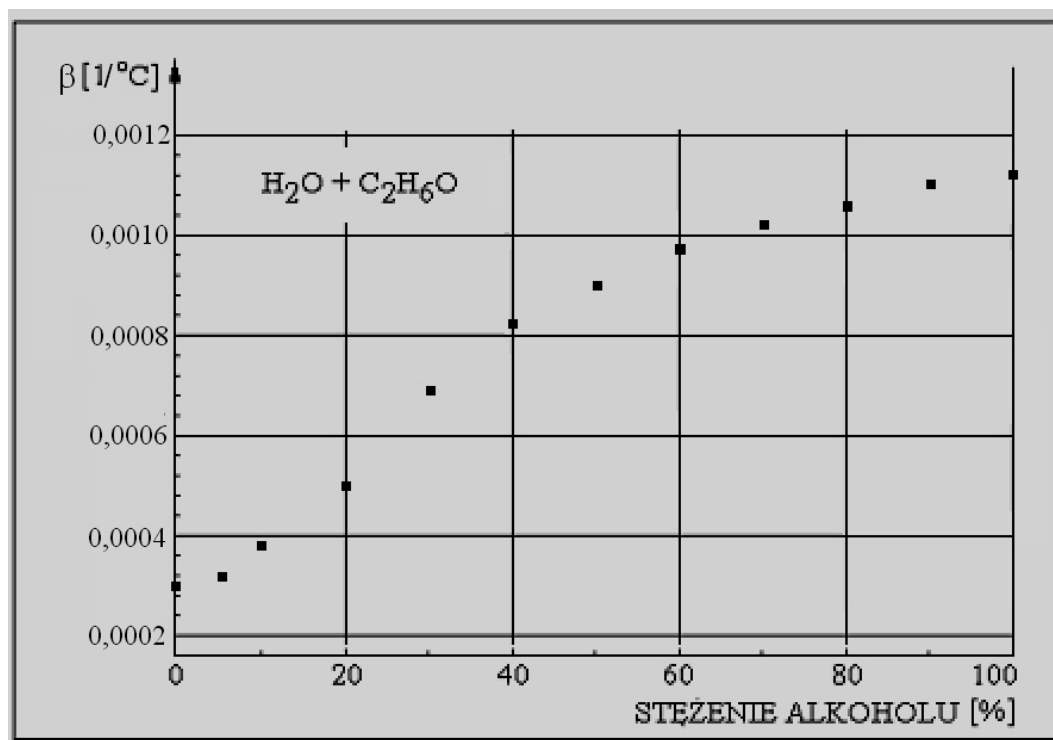
Współczynnik rozszerzalności cieczy dwuskładnikowej

W przeprowadzonym w pracowni UR ćwiczeniu badamy rozszerzalność objętościową **alkoholu etylowego skażonego** (jego handlowa nazwa to „denaturat”). Jest to ciecz dwuskładnikowa ($H_2O + C_2H_6O$) o zawartości procentowej alkoholu wynoszącej od około 80% do około 92%. Niewielka ilość dodatkowych substancji nadających tej cieczy między innymi nieprzyjemny zapach nie wpływa znacząco na wartość współczynnika rozszerzalności. Natomiast ostrzegawcza fioletowa barwa ułatwia poprawne wykonanie ćwiczenia poprzez łatwiejszą kontrolę obecności niepożądanych pęcherzyków powietrza w naczyniu pomiarowym.

Współczynnik rozszerzalności objętościowej dwuskładnikowej cieczy nie jest średnią arytmetyczną ważoną współczynników odnoszących się do jego składników. Gdyby tak było poniżej przedstawiony wykres (Rys.4) zależności średniego współczynnika rozszerzalności wodnego roztworu alkoholu etylowego od zawartości alkoholu miałyby przebieg liniowy.

Uzyskane w naszym ćwiczeniu wyniki proponujemy porównać z wartością tablicową dla wodnego roztworu alkoholu etylowego o stężeniu 80%:

$$\beta(TAB) = 0,00107 [1/^\circ C].$$



Rys.4. Zależność średniego współczynnika rozszerzalności objętościowej wodnego roztworu alkoholu etylowego C_2H_6O od zawartości alkoholu. Pomiar przeprowadzono w zakresie temperatur od $20^\circ C$ do $40^\circ C$ – stąd określenie „średni współczynnik rozszerzalności”. Wykres sporządzony na podstawie: J.Timmermans: *The Physico-Chemical Constants of Binary Systems in Concentrated Solutions*, vol.4., Interscience Publishers, New York 1960, s.186

Rozszerzalność objętościowa gazów

Gazy, podobnie jak ciała stałe i ciecze, zwiększają swoją objętość gdy są ogrzewane pod stałym ciśnieniem. Empiryczna zależność objętości V_t od temperatury t przy stałym ciśnieniu nosi nazwę prawa Gay-Lussaca:

$$V_t = V_0(1 + \gamma \cdot t),$$

gdzie V_0 oznacza objętość gazu w temperaturze 0°C , γ oznacza współczynnik rozszerzalności cieplnej danego gazu, a t temperaturę w skali Celsjusza. W Tabeli 2 podane są wartości współczynników γ dla kilku wybranych gazów.

Tabela 2.

Wartości współczynników rozszerzalności objętościowej wybranych gazów pod ciśnieniem normalnym ($p_0 = 1.01 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$), w temperaturze 0°C .

GAZ	azot	hel	powietrze	wodór
$\gamma [1/^\circ\text{C}]$	0.003673	0.003658	0.003674	0.003659

Z analizy danych liczbowych zawartych w Tabeli 2 wynika, że wartości γ są znacznie większe od współczynników rozszerzalności cieczy (patrz Tabela 1). Ponadto wartości współczynników niewiele się między sobą różnią. Różnice te jeszcze maleją jeśli γ wyznaczone zostanie dla mniejszych ciśnień. Współczynnik γ zbliża się wtedy do wartości $0.00366 [1/^\circ\text{C}]$. Nasuwa się przypuszczenie, że cieplna rozszerzalność gazów w stosunkowo dużym zakresie ciśnień i temperatur może zostać opisana za pomocą prostego modelu.

Rzeczywiście, wyjaśnienie powyższych własności gazów rzeczywistych uzyskać można już na gruncie modelu gazu doskonałego. Daną masę gazu można scharakteryzować przez podanie zajmowanej przez nią objętości V , ciśnienia p i temperatury T . Wielkości te są od siebie uzależnione, a równanie które je wiąże nazywamy **równaniem stanu (równanie Clapeyrona)**. Model gazu doskonałego odnosi się do gazu o równaniu stanu

$$pV = nRT,$$

gdzie n oznacza liczbę moli gazu, R oznacza tzw. **stałą gazową**, T jest temperaturą w skali Kelvina. Współczynnik rozszerzalności cieplnej gazu doskonałego, w temperaturze 0°C , ma wartość $\gamma = 1/273.16 \approx 0.00366 [1/^\circ\text{C}]$. Wartość ta wynika bezpośrednio z równania gazu doskonałego i ze związku pomiędzy temperaturą T w skali Kelvina i temperaturą t w skali Celsjusza

$$T = 273.16 + t.$$

Stosując równanie stanu gazu doskonałego do określonej masy gazu podlegającego przemianom, w której temperatura początkowa $t_0 = 0^\circ\text{C}$ (273.16K) a końcowa jest równa $t [^\circ\text{C}]$ oraz $(273.16 + t) [\text{K}]$ otrzymujemy:

$$\frac{p_0 V_0}{273.16} = \frac{pV}{273.16 + t}.$$

Zakładając stałość ciśnienia podczas przemiany, $p = p_0$, powyższe równanie przyjmuje postać empirycznego równania Gay-Lussaca

$$V = \frac{V_0(273.16 + t)}{273.16} = V_0 \left(1 + \frac{t}{273.16} \right) = V_0(1 + \gamma t).$$

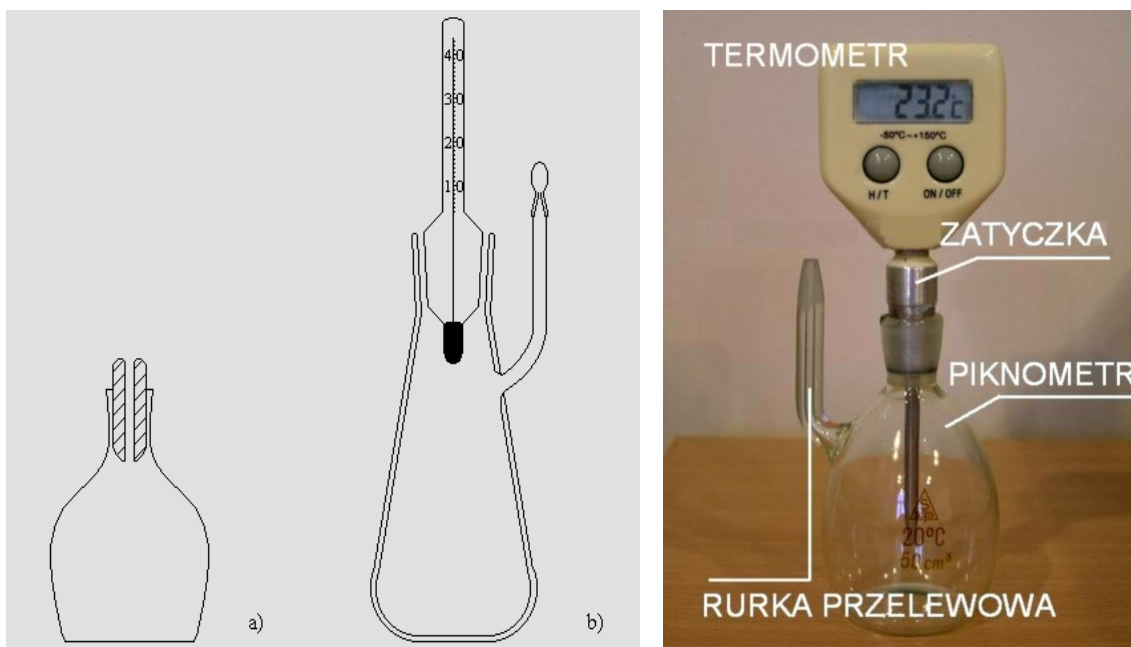
Zasada pomiaru

Opisana poniżej metoda pomiaru współczynnika rozszerzalności objętościowej oparta jest na definicji współczynnika β . Dla określonej ilości cieczy o masie m jej gęstość ρ jest odwrotnie proporcjonalna do objętości ($\rho_0 = m/V_0$, $\rho_t = m/V_t$). Definicję (1) można zapisać więc następująco:

$$\beta = \frac{\rho_0 - \rho_t}{\rho_t(t - t_0)},$$

gdzie ρ_t – gęstość cieczy w temperaturze t , ρ_0 – gęstość cieczy w temperaturze t_0 . W naszym ćwiczeniu zmiana $(t - t_0)$ temperatury mierzona jest bezpośrednio termometrem elektronicznym. Gęstość cieczy wyznacza się przy pomocy piknometru.

Piknometr (Rys 5) jest to naczynie szklane, które pozwala na dokładny pomiar masy cieczy przy ściśle określonej objętości (w naszym ćwiczeniu jest to objętość $V_0 = 50 \text{ cm}^3$). Piknometr posiada zwykle szlifowany korek umożliwiający wypływ nadmiaru badanej cieczy przez odpowiedni otwór w korku lub przez specjalną rurkę umieszczoną w bocznej jego ścianie. Pomiar temperatury cieczy dokonywany jest termometrem cieczowym lub elektronicznym umieszczonym w korku-zatyczce.



Rys.5. Piknometry

W temperaturze t_0 określamy masę cieczy m_0 zawartą w objętości piknomietru V_0 . Gęstość cieczy: $\rho_0 = m_0/V_0$. Po ogrzaniu nadmiar cieczy wypłynie i w objętości piknomietru pozostanie ciecz o masie $m_t < m_0$. Gęstość tej cieczy będzie wynosiła $\rho_t = m_t/V_0$. Zgodnie z powyżej przedstawionym równaniem współczynnik rozszerzalności β cieczy można zatem przedstawić w postaci

$$\beta = \frac{m_0 - m_t}{m_t(t - t_0)}. \quad (2)$$

Wyprowadzając wzór (2) zaniedbano efekt rozszerzalności objętościowej piknomietru. W rzeczywistości objętość jego wnętrza po ogrzaniu nieco wzrośnie i wyniesie $V_t = V_0(1 + \gamma(t - t_0))$ gdzie γ oznacza współczynnik rozszerzalności objętościowej szkła. Zamiast równania (2) otrzymamy równanie

$$\beta = \frac{m_0 - m_t}{m_t(t - t_0)} + \gamma \frac{m_0}{m_t}, \quad (3)$$

gdzie $\gamma = 2.6 \cdot 10^{-5} [1/^\circ\text{C}]$.

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- Blinowski J., Trylski J., *Fizyka dla kandydatów na wyższe uczelnie*, Wydanie VIII. PWN, Warszawa 1983
- Bolton W., *Zarys fizyki*, PWN, Warszawa 1988
- Buszmanow B.N., Chronow J.A., *Wstęp do fizyki ciała stałego*, Warszawa 1973. s.98-100
- Chyla K., *Fizyka dla ZSZ*, Wydanie trzecie, WSZiP, Warszawa 1991. s.113-121
- Dryński T., *Doświadczenia pokazowe z fizyki*, PWN, Warszawa 1964
- Encyklopedia Fizyki*, Tom 3, PWN, Warszawa 1974, s.249
- Halliday D., Resnick R., *Fizyka Tom 1*, PWN, Warszawa 1975, s.641-647
- Herman M., Kalestyński A., Widomski L., *Podstawy fizyki dla kandydatów na wyższe uczelnie*, PWN, Warszawa 1984, s.468
- Gabrylewski E., *Fizyka dla klasy I liceum ogólnokształcącego, technikum i liceum zawodowego*, PZWS, Warszawa 1973, s.217-224
- Jeżewski M., Kalisz J., *Tablice wielkości fizycznych oraz pomocnicze tablice matematyczne*, PWN, Warszawa 1957
- Szczeniowski S., *Fizyka Doświadczalna*, Tom II, PWN, Warszawa 1976, s.15-26; 347-349
- Wert Ch.A., Thompson R.M., *Fizyka ciała stałego*, PWN, Warszawa 1974. s.40

ZASADA POMIARU

Średni współczynnik rozszerzalności objętościowej zdefiniowany jest następująco:

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0(t - t_0)} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right] \quad (1)$$

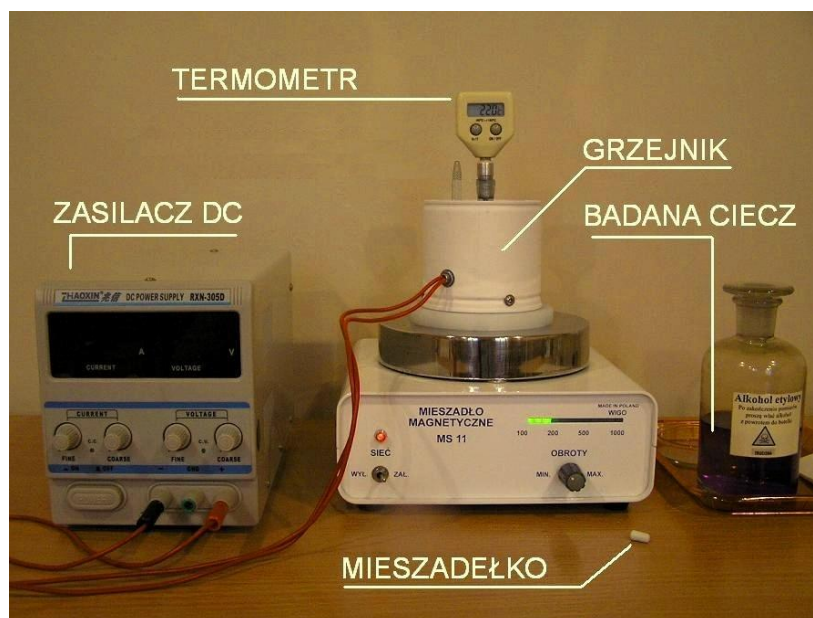
gdzie: V_0 jest objętością ciała w temperaturze t_0 , natomiast V_t objętością w temperaturze t . Iloraz $(V_t - V_0)/V_0$ reprezentuje względną zmianę objętości. Zatem definicję wyrażoną wzorem (1) można odczytać następująco: „współczynnik β jest względną zmianą objętości ciała wywołaną zmianą jego temperatury o jeden stopień”.

W naszym ćwiczeniu nie korzystamy bezpośrednio z definicji (1). Zasada pomiaru jest następująca. W temperaturze pokojowej t_0 określamy masę cieczy m_0 zawartą w objętości V_0 naczynia zwanego piknometrem. Następnie podnosimy temperaturę cieczy do wartości t . Po ogrzaniu nadmiar cieczy wypływa przez rurkę przelewową piknometru i w jego objętości pozostaje ciecz o mniejszej masie m_t . Zmierzone wielkości: t_0 , t , m_0 oraz m_t pozwalają wyznaczyć wartość współczynnika rozszerzalności cieczy z równania:

$$\beta = \frac{m_0 - m_t}{m_t(t - t_0)} \quad (2)$$

Wyprowadzając wzór (2) z definicji (1) zaniedbano efekt rozszerzalności objętościowej piknometru. W rzeczywistości jego objętość po ogrzaniu także nieco wzrasta i wynosi $V_t = V_0(1 + \gamma(t - t_0))$, gdzie γ oznacza współczynnik rozszerzalności objętościowej szkła. Po uwzględnieniu tego niewielkiego efektu otrzymamy równanie:

$$\beta = \frac{m_0 - m_t}{m_t(t - t_0)} + \gamma \frac{m_0}{m_t} \quad (3)$$



Rys. Aparatura do pomiaru współczynnika rozszerzalności objętościowej cieczy

CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynnika rozszerzalności objętościowej wybranej cieczy.

WYKONANIE ĆWICZENIA

1. Wprowadzić mieszadełko do wnętrza pustego piknometru. Zważyć piknometr wraz z termometrem i mieszadełkiem wyznaczając jego masę m_1 . Zanotować wartość niepewności pomiaru masy: $\Delta_d m_1 = 0.1\text{g}$.
2. Napełnić piknometr badaną cieczą (alkohol etylowy skażony) i zatkać go termometrem-zatyczką, tak by nadmiar cieczy wylał się, a w środku nie pozostało powietrze. Dokładnie osuszyć piknometr z zewnątrz.
3. Włączyć termometr i po ustabilizowaniu się temperatury odczytać jej wartość t_0 . Zanotować wartość t_0 oraz przyjąć niepewność pomiaru temperatury: $\Delta_d t_0 = 0.1^\circ\text{C}$.
4. Wyznaczyć masę napełnionego piknometru wraz z mieszadełkiem i termometrem m_2 . Zanotować wartość m_2 oraz $\Delta_d m_2 = 0.1\text{g}$. Masa m_0 cieczy zawartej w piknometrze równa jest $m_0 = m_2 - m_1$.
5. Umieścić piknometr wewnątrz grzejnika zamocowanego na mieszadle magnetycznym (Rys). Włączyć mieszadło ustawiając szybkość mieszania 100-200 rpm (ang. revolutions per minute, obroty na minutę).
6. Włączyć zasilacz napięcia stałego (ang. DC power supply) ustawiając pokrętkiem napięcie 20V.
7. Obserwować wskazania termometru. Po osiągnięciu temperatury wyższej od t_0 o około 20°C wyjąć piknometr z grzejnika jednocześnie notując wartość temperatury końcowej t . Przyjąć $\Delta_d t = 0.1^\circ\text{C}$.
8. Wyłączyć zasilacz DC. Wyłączyć mieszadło magnetyczne.
9. Po osuszeniu piknometru z zewnątrz wyznaczyć jego masę wraz z mieszadełkiem i termometrem m_3 . Zanotować wartość m_3 oraz $\Delta_d m_3 = 0.1\text{g}$. Masa m_t badanej cieczy, która pozostała w piknometrze po ogrzaniu jest równa $m_3 - m_1$.
10. Po zakończonym pomiarze badaną cieczą przelać z powrotem do butelki.

OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Korzystając z wyników pomiarów m_1, m_2, m_3, t_0, t obliczyć współczynnik rozszerzalności objętościowej β alkoholu etylowego skażonego stosując wzór (4):

$$\beta = \frac{m_2 - m_3}{(m_3 - m_1)(t - t_0)} \quad (4)$$

Wzór (4) otrzymujemy ze wzoru (2) po podstawieniach $m_0 = m_2 - m_1$ oraz $m_t = m_3 - m_1$.

2. Obliczyć współczynnik rozszerzalności objętościowej β stosując wzór (3) uwzględniający rozszerzalność szkła piknometru. Współczynnik rozszerzalności objętościowej szkła $\gamma = 2.6 \cdot 10^{-5} [1/^\circ\text{C}]$.
3. Zanotować niepewności standardowe pomiaru mas: $u(m_1), u(m_2), u(m_3)$ oraz temperatur: $u(t_0), u(t)$, które wynoszą (*):

$$u(m_1) = u(m_2) = u(m_3) = \frac{\Delta_d m_1}{\sqrt{3}} = \frac{0.1\text{g}}{\sqrt{3}} = 0.058\text{g} \quad u(t_0) = u(t) = \frac{\Delta_d t_0}{\sqrt{3}} = \frac{0.1^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.058^\circ\text{C}$$

4. Obliczyć niepewność standardową pomiaru pośredniego $u(\beta)$ współczynnika rozszerzalności β . W obliczeniu stosujemy wzór (9) z materiałów (*):

$$u(\beta) = \sqrt{\left(\frac{\partial\beta}{\partial m_1}\right)^2 (u(m_1))^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial m_2}\right)^2 (u(m_2))^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial m_3}\right)^2 (u(m_3))^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial t_0}\right)^2 (u(t_0))^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial t}\right)^2 (u(t))^2}$$

gdzie symbole $\partial\beta/\partial m_1$ itd. oznaczają pochodne cząstkowe funkcji β wyrażonej wzorem (4) po m_1, m_2 itd.

5. Zaokrąglić uzyskaną wartość $u(\beta)$ oraz wynik β według zasad przedstawionych w materiałach (*).
6. Obliczyć niepewność rozszerzoną $U(\beta) = 2 \cdot u(\beta)$.
7. Zapisać wynik końcowy β wraz z niepewnością rozszerzoną dokonując odpowiedniego zaokrąglenia.
8. Uzyskane wyniki porównać z wartością tablicową: $\beta(\text{TAB}) = 0,00107 [1/^\circ\text{C}]$.

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