

Zad. M 12	I PRACOWNIA FIZYCZNA Instytut Fizyki US
Temat:	Wyznaczanie stosunku c_p/c_v dla powietrza metodą Clémenta i Desormesa

Cel: wyznaczenie współczynnika $\kappa = c_p/c_v$ – stosunku ciepła właściwego powietrza przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego przy stałej objętości metodą Clémenta i Desormesa. Zapoznanie się z przemianami gazów. Prawidłowe i szczegółowe opracowanie danych pomiarowych, wykonanie wykresów badanych zależności, obliczenie i analiza niepewności pomiaru. Wykształcenie u studenta samodzielnego posługiwania się aparaturą pomiarową oraz umiejętności analizy i interpretacji wyników pomiarów.

Przyrządy: duża butla szklana – balon o objętości ok. 50 dm³, w obudowie zamknięta korkiem, w którym zamocowane są rurka z korkiem, rurka do podłączenia przewodu do manometru, wentyl do podłączenia pompki, pompka nożna z przewodem, cyfrowy manometr różnicowy CHY 886.

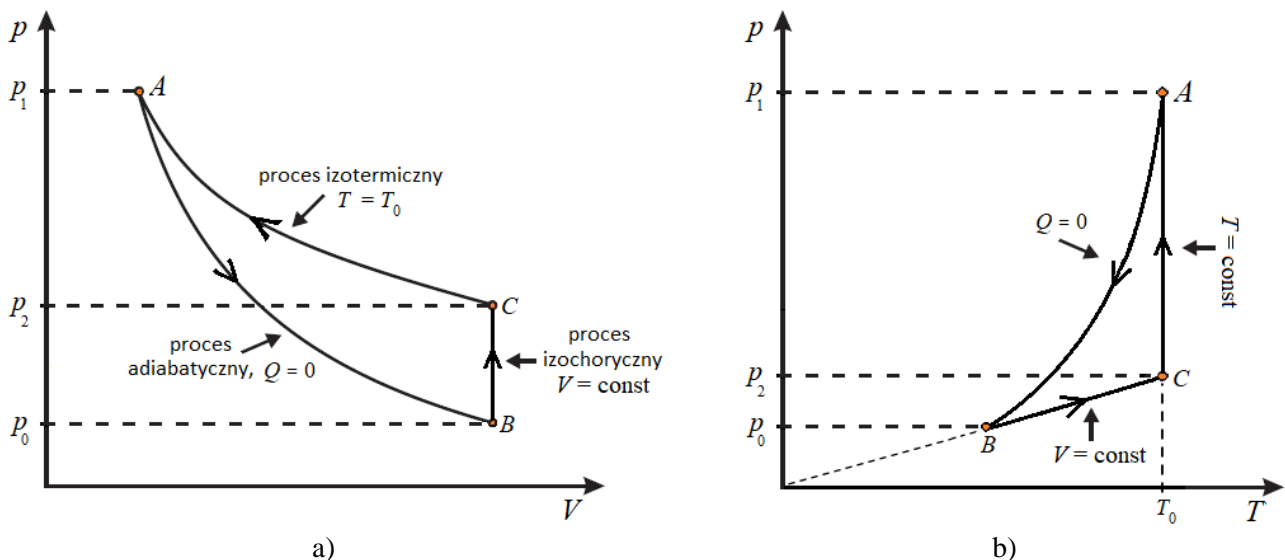
1. ZAGADNIENIA

1. Przemiany gazów doskonałych, równania: Clapeyrona, Mayera, Poissona dla przemiany adiabatycznej, pojęcia parametrów i stałych występujących w tych równaniach. Wykresy przemian gazowych.
2. I zasada termodynamiki. Ciepło, ciepło molowe i właściwe gazów przy stałym ciśnieniu i stałej objętości.
3. Interpretacja pojęcia ciepła molowego gazów na gruncie teorii kinetyczno-molekularnej.
4. Zasada ekwipartycji energii. Wartość $\kappa = c_p/c_v$ w zależności od budowy cząsteczek gazów.
5. Metoda Clémenta-Desormesa wyznaczania wielkości κ . Zależność ciśnienia p od objętości V gazu w metodzie Clémenta i Desormesa (cykl przemian gazu).
6. Sposób pomiaru ciśnienia manometrem cyfrowym CHY 886 i znajomość jednostek ciśnienia w tym mierniku.

2. OPIS ZAGADNIENIA

Na podstawie literatury zapoznać się z opisem zjawiska i wyprowadzeniami wzorów – patrz też Dodatek 2, dalej ozn. D2.

Wyznaczanie wartości $\kappa = c_p/c_v$ metodą Clémenta-Desormesa polega na adiabatycznym rozprężaniu gazu – proces A-B na rys. 1, spełniającego równanie stanu gazu doskonałego (D2).



Rys. 1. Cykl przemian gazu w doświadczeniu Clémenta-Desormesa.

Rozważmy gaz w stanie A – rys. 1, pod ciśnieniem p_1 , wyższym od ciśnienia atmosferycznego p_0 , zamknięty w butli, na rys. 2 – „4”, o objętości V_0 . Temperatura gazu w butli jest równa temperaturze otoczenia T_0 . Zakładamy, że temperatura otoczenia i ciśnienie atmosferyczne są stałe ($T_0 = \text{const}$ i $p_0 = \text{const}$). Stan początkowy A gazu w butli opisują parametry (p_1, V_0, T_0) i gaz spełnia równanie Clapeyrona:

$$p_1 V_0 = n_1 R T_0, \quad (1)$$

gdzie n_1 jest licznością materii (liczbą moli) gazu zamkniętego w butli w stanie początkowym.

Po szybkim otwarciu butli za pomocą korka „3” – rys. 2, zawarty w butli gaz w krótkim czasie rozpręża się do ciśnienia atmosferycznego. Ponieważ proces odbywa się tak szybko, że nie zdąży zajść wymiana ciepła między gazem a ściankami balonu, przemianę gazową można (z dobrym przybliżeniem) uznać za adiabatyczną. Ponieważ zachodzą bardzo niewielkie zmiany ciśnienia (objętość balonu jest duża), ubytek gazu z balonu jest zaniedbywalny. W wyniku adiabatycznego rozprężenia do atmosfery, ciśnienie gazu w butli wyrównuje się z ciśnieniem atmosferycznym a jego temperatura obniża się. Na wykresie – rys. 1, odpowiada to przejściu z punktu A do B po adiabadzie. Teraz stan n_1 moli gazu w punkcie B , który poddaliśmy przemianie adiabatycznej, opisują parametry (p_0, V_1, T_1) , a równanie Clapeyrona przyjmuje postać:

$$p_0 V_1 = n_1 R T_1, \quad (2)$$

gdzie V_1 i T_1 są odpowiednio objętością i temperaturą gazu po zakończeniu przemiany adiabatycznej. Ponieważ dla przemiany adiabatycznej spełniony jest związek $pV^\kappa = \text{const}$, więc możemy zapisać:

$$p_1 V_0^\kappa = p_0 V_1^\kappa. \quad (3)$$

Natychmiast po zakończeniu przemiany adiabatycznej następuje zamknięcie butli. Gaz w butli powoli ogrzewa się do temperatury otoczenia przy ustalonej objętości, a jego ciśnienie rośnie do wartości p_2 , niższej od p_1 . Odpowiada to przejściu po izochorze z punktu B do C (rys. 1). Stan końcowy gazu w butli opisują parametry (p_2, V_0, T_0) . Należy zwrócić uwagę, że przemianie izochorycznej poddane zostało $n_2 < n_1$ moli gazu, przy czym $\Delta n/n_1 \ll 1$, $\Delta n = n_1 - n_2$. Dla przemiany izochorycznej $p/T = \text{const}$ więc:

$$\frac{p_0}{T_1} = \frac{p_2}{T_0}. \quad (4)$$

Eliminując n_1 z równań (1) i (2) otrzymujemy

$$\frac{p_1 V_0}{p_0 V_1} = \frac{T_0}{T_1}. \quad (5)$$

Podstawiając T_1 obliczone z (4) dostajemy wyrażenie na V_1 w postaci:

$$V_1 = \frac{p_1}{p_2} V_0. \quad (6)$$

Wstawiając to wyrażenie do równania (3) dochodzimy do zależności:

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^\kappa. \quad (7)$$

Stąd, logarytmując, otrzymamy

$$\kappa = \frac{\ln(p_1/p_0)}{\ln(p_1/p_2)}. \quad (8a)$$

Ciśnienie w butli mierzymy względem ciśnienia otoczenia manometrem różnicowym, który wskazuje różnicę Δp_i między ciśnieniem wewnątrz zbiornika a ciśnieniem na zewnątrz – atmosferycznym, czyli

$$p_i = p_0 + \Delta p_i \quad (i = 1, 2), \quad (9)$$

gdzie $\Delta p_1/p_0 \ll 1$. Zatem (8a) możemy zapisać w postaci

$$\kappa = \frac{\ln(p_0 + \Delta p_1)}{\ln \frac{p_0 + \Delta p_1}{p_0 + \Delta p_2}} = \frac{\ln \left(1 + \frac{\Delta p_1}{p_0} \right)}{\ln \left(1 + \frac{\Delta p_1}{p_0} \right) - \ln \left(1 + \frac{\Delta p_2}{p_0} \right)}. \quad (8b)$$

Ponieważ $\Delta p_i/p_0 \ll 1$ ($i = 1, 2$), zatem korzystając ze znanego przybliżenia $\ln(1+x) \approx x$, słusznego dla $x \ll 1$, po przekształceniach (8b) otrzymujemy przybliżone wyrażenie na κ w postaci:

$$\kappa = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2}. \quad (10a)$$

Ten sam wzór można wyprowadzić również inną metodą – porównaj z rozwiązaniem zadania doświadczalnego z XXXI Olimpiady Fizycznej [1].

Osiągnięcie przez gaz stanu A odbywa się na drodze izotermicznego sprężania gazu, proces CA na rys. 1, podczas jego włączania do butli.

Natomiast, korzystając z zasady ekwipartycji energii i równania Mayera (D2), otrzymujemy

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i}, \quad (11)$$

gdzie i jest liczbą stopni swobody cząsteczek gazu ($i = 5$ dla cząsteczki gazu dwuatomowego).

3. PRZEBIEG WYKONANIA ĆWICZENIA

A. Układ doświadczalny – patrz schemat i opis pod rys. 2.

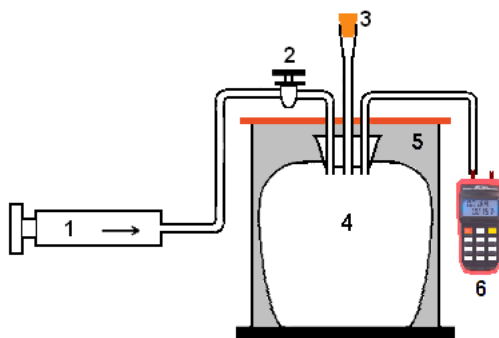
B. Wykonanie doświadczenia.

Przed przystąpieniem do pomiarów należy sprawdzić działanie manometru, zaworu, pompki oraz szczelność układu. Konieczne jest wykonanie kilku pomiarów próbnych, w których rurka wlotowa z korkiem „3” na rys. 1, otwarta była zbyt długo lub zbyt krótko przy wypuszczaniu powietrza z balonu. Pozwoli to na dobranie odpowiedniego momentu zamknięcia wlotu rurki w trakcie przeprowadzania ćwiczenia. Również zebrać informacje o zakresie wartości danych – ciśnieniach jakie mogą występować (w tym maksymalnej dla pompowania), czasu realizacji pojedynczego doświadczenia – co umożliwi zaplanowanie całego eksperymentu z seriami pomiarów dla różnych wartości ciśnieni powietrza w napompowanym powietrzem balonie.

1. Otworzyć przelot rurki połączonej z pompką poprzez odpowiedni obrót kurka zaworu „2” lub odkręcenie/zakręcenie wężyka na wentylu znajdującym się w korku (dalej w skrócie, ustawić wlot zaworu „2”). Otworzyć wlot do balonu zdejmując korek „3” z rurki wlotowej.

Uwaga: Postępować ostrożnie aby nie poluzować mocowań rurki i wentyla w korku zamykającym balon.

2. Dla manometru: ustawić odpowiednią jednostkę; wyzerować wskazanie wyniku pomiaru w obu kanałach i pominąć wpływ ciśnienia otoczenia na wynik pomiaru – należy wcisnąć przycisk ZERO i to przed każdym pomiarem. Spowoduje to wyzerowanie obydwu wskazań ciśnienia. Za pomocą przycisku P2 lub P1-P2 można wybrać czy jako druga prezentowana wartość pomiaru ma być wyświetlana wielkość ciśnienia P2 czy różnica ciśnieni P1-P2.
 3. Zamknąć korkiem „3” rurkę wlotową do balonu. Za pomocą pompki wtłoczyć do zbiornika „4” powietrze zwiększając ciśnienie gazu w balonie do wartości podanych przez prowadzącego lub nie większych niż 20 hPa. **Pompować powoli, aby nie rozgrzewać gazu!** Po zakończeniu pompowania – odciąć połączenie z pompką odpowiednio ustawiając wlot zaworu „2”.
 4. Dokonać pomiaru ciśnienia w zależności od czasu celem wyznaczenia krzywej spadku ciśnienia. Odczyt dokonać co ok. 15 s przez ok. 5 min lub do czasu jednoznacznego stwierdzenia stałości ciśnienia lub jego spadku do wartości bliskiej p_0 .
 5. Powtórzyć czynność z p. 1 - 3. Zanotować wartość p_1 lub Δp_1 .
 6. Wyjąć korek „3” z rurki wlotowej do balonu (możliwie jak najkrócej – na ok. 2 s tak aby nastąpiło wyrównanie ciśnienia powietrza w zbiorniku z otoczeniem), odczytywać ciśnienie, jeśli spadnie do równego otoczeniu zamknąć wlot rurki korkiem.
 7. Śledzić wzrost ciśnienia w balonie. (Odczekać ok. 3 minuty do ponownego wyrównania się temperatury gazu z temperaturą otoczenia). Zapisać wartość maksymalną ciśnienia Δp_2 .
 8. Powtórzyć czynności z p. 1-3 i 6-7 dla co najmniej siedmiu różnych wartości Δp_1 rozłożonych równomiernie np. co ok. 2 hPa.
 9. Powtórzyć czynności z p. 4 ustalając ciśnienie p_1 nieco powyżej wartości maksymalnej.
- Po pomiarach zestawić w należyтым porządku przyrządy.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego. 1 – pompa; 2 – zawór lub wentyl z zakrętką na wężyku łączącym z pompką; 3 – korek zamykający rurkę wlotową do balonu (zbiornika), 4 – balon (zbiornik), duża butla szklana (balon); 5 – obudowa butli; 6 – manometr cyfrowy.

4. OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

A. Wyznaczenie wartości pomiarowych. Obliczenie niepewności pomiaru.

1. Wykreślić krzywą spadku ciśnienia w butli. Wyznaczyć wartości poprawek dla zmierzonych wartości Δp_1 i Δp_2 . (Poprawki można to też wyznaczyć z zapisu w tabeli i korzystając z interpolacji.) Obliczyć niepewność standardową pomiaru ciśnienia, uwzględnić niepewność graniczną manometru.
2. Dla każdej wyznaczonej pary wartości Δp_1 i Δp_2 uwzględnić wartość poprawki spadku ciśnienia w butli. Przyjąć dla nich, dla uproszczenia zapisu, oznaczenia p i p' . Wówczas we wzorach (8b) i (10a) należy podstawić: $\Delta p_1 \rightarrow p$ i $\Delta p_2 \rightarrow p'$. Wówczas (10a) jest postaci

$$\kappa = \frac{p}{p - p'}. \quad (10b)$$

3. Obliczyć wartość średnią κ i jej niepewność jako odchylenie standardowe średniej.
4. Obliczyć niepewność złożoną dla zmierzonych par wartości p i p' – korzystając z prawa propagacji niepewności, np. ze wzoru dla metody elementarnej (patrz D1), dostajemy

$$u(\kappa) = \kappa^2 \frac{p'}{p} \sqrt{\left(\frac{u(p)}{p}\right)^2 + \left(\frac{u(p')}{p'}\right)^2}. \quad (11)$$

5. Obliczyć niepewność rozszerzoną przyjmując współczynnik rozszerzenia jako wartość współczynników rozkładu t -Studenta dla prawdopodobieństwa objęcia (poziomie ufności) $1 - \alpha = 0,90$.
6. Wykonać wykres zależności $p' = f(p)$. Uwzględnić krzyżyki niepewności. Z (10b) mamy

$$p' = Ap \quad \text{gdzie} \quad A = 1 - \frac{1}{\kappa}. \quad (12)$$

7. Wyznaczyć wartość κ na podstawie wartości A (współczynnik kierunkowy prostej)

$$\kappa = \frac{1}{1 - A}. \quad (13)$$

8. Wyznaczyć liczbę stopni swobody i dla badanego w butli gazu:

$$i = \frac{2}{\kappa - 1}, \quad \left(\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i + 2}{i} \right). \quad (14)$$

9. Oszacować niepewność pomiaru dla wartości średniej κ . Możemy obliczyć korzystając ze wzorów (D1-2) i (D1-3) lub poniższego

$$u(\bar{\kappa}) = \frac{1}{(1 - A)^2} u(A), \quad (15)$$

gdzie $u(A)$ – odchylenie standardowe współczynnika kierunkowego A , patrz wzór (D1-5).

B. Zestawić wyniki i niepewności pomiaru.

5. Dokonać dyskusji wyników, zapisać wnioski i uwagi dotyczące doświadczenia.

1. Zinterpretować otrzymane wyniki, uzyskane wartości: κ – z (8), (10) i na podstawie (13); i – z (14); porównać z danymi tablicowymi i teoretycznymi.
2. Przeanalizować źródła ewentualnych rozbieżności, wpływ na nie niepewności pomiaru.
3. Uzasadnić (z wyników dośw.), czy powietrze można traktować jako modelowy gaz dwuatomowy.
4. Zapisać wnioski i uwagi dotyczące przebiegu i realizacji doświadczenia.

6. LITERATURA

1. Wyznaczanie stosunku ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego przy stałej objętości metodą Clementa i Desormes'a. Zadanie doświadczalne XXXI olimpiady fizycznej st. wstępny: www.olimpiada.fizyka.szc.pl/pdf/31OF1D2_roz757.pdf (dostęp – kwiecień 2017).
2. Magiera A. (red.): I Pracownia fizyczna. Wyd. IV, IF UJ 2014, s. 96 – 102, www.1pf.if.uj.edu.pl/documents/5046939/5227638/skrypt.pdf (dostęp kwiecień 2017)
3. Zawadzki A., Hofmokr H.: *Laboratorium fizyczne*. Wyd. II (lub inne), PWN, Warszawa 1964, p. 3.12.
4. *Instrukcja manometru* CHY 886, http://dydaktyka.fizyka.szc.pl/pdf/pdf_277.pdf

Dodatek 1

1. Niepewność pomiaru

Niepewność całkowita wielkości x mierzonej bezpośrednio:

$$u(x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + \frac{(\Delta_d x)^2}{3} + \frac{(\Delta_t x)^2}{3} + u_e^2(x)} \quad (\text{D1-1})$$

gdzie pierwszy składnik pod pierwiastkiem – niepewność standardowa średniej; $\Delta_d x$ – niepewność wzorcowania (niepewność wynikająca z dokładności przyrządu); $\Delta_t x$ – niepewności wyników zaczerpniętych z literatury, tablic lub kalkulatora; $u_e(x)$ – niepewność standardowa eksperymentatora.

Złożoną niepewność standardową $u(y)$ – niepewność dla funkcji kilku zmiennych $y = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_N)$ oblicza się korzystając z **prawa przenoszenia niepewności** pomiarów. Obliczanie niepewności $u(y)$ można dokonać bez odwoływania się do rachunku różniczkowego korzystając z metody elementarnej – wzoru numerycznego wskazanego w *Przewodniku GUM*¹ poprzez obliczanie udziałów niepewności

$$u_i(y) = \frac{1}{2} \left| f(x_1, \dots, x_i + u(x_i), \dots, x_N) - f(x_1, \dots, x_i - u(x_i), \dots, x_N) \right| \quad (\text{D1-2})$$

$u_i(y)$ – zmiana wartości funkcji f spowodowana zmianą x_i o $+u(x_i)$ i o $-u(x_i)$.

$u(y)$ obliczamy jako sumę geometryczną udziałów $u_i(y)$:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (\text{D1-3})$$

2. Porównywanie wyników

Chcąc porównać otrzymane wyniki z innym wynikiem, np. tablicowym x^T , korzystamy z przedziałowego **kryterium zgodności wyników pomiarów**, czyli sprawdzamy czy dla naszych wyników spełniona jest nierówność:

$$\left| \bar{x} - x^T \right| \leq u(\bar{x}) + u(x^T). \quad (\text{D1-4})$$

Jeżeli powyższa nierówność nie zachodzi, należy zastąpić niepewność u przez **niepewność rozszerzoną U** , gdzie $U(x) = k u(x)$ a współczynnik k , w naszym przypadku należy przyjąć 2. Jeśli i wówczas ta nierówność nie jest spełniona to znaczy, że wyniki nie są zgodne.

Niepewność rozszerzona (*expanded uncertainty*) – zdefiniowana przez „wielkość określającą przedział wokół wyniku pomiaru, taki że można oczekiwać, iż obejmie on dużą część wartości, które w uzasadniony sposób można przyporządkować wielkości mierzonej.”

¹ *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO, Switzerland 1993, 1995; (dokument wydany w imieniu BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OML). Fundamentalny dokument zbiorowego autora – zespołu międzynarodowych organizacji naukowo-technicznych – dla ustanowienia procedury wyrażania niepewności pomiaru, jest wydany przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO) Publikacja jest udostępniona online: www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf

Obie niepewności są powiązane zależnością $U = ku$, gdzie k – współczynnik rozszerzenia. Współczynnik rozszerzenia k zależy od liczby pomiarów oraz poziomu ufności (określany jest często mianem *współczynnika Studenta-Fishera* $t_{n,\alpha}$), w większości przypadków przyjmujemy $k = 2$.

3. Regresja liniowa – klasyczna (metoda najmniejszych kwadratów)²

Jeżeli pomiędzy dwiema wielkościami fizycznymi występuje zależność liniowa to regresja liniowa jest prostą metodą wyznaczenia parametrów najlepiej dopasowanej prostej. Parametry prostej określonej równaniem $y = mx + b$ wyznaczamy przy użyciu ogólnie dostępnych (dość złożonych) wzorów. Znając współczynniki m i b regresji liniowej oraz współczynnik korelacji (Pearsona) r można, korzystając z poniższych wzorów, obliczyć niepewności pomiaru (odchylenia standardowe) typu A (statystyczne)

$$u_A(m) = |m| \sqrt{\frac{1/r^2 - 1}{n - 2}}, \quad u_A(b) = u_A(m) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (D1-5)$$

Wartości współczynników charakteryzujących prostą dla regresji liniowej szybko otrzymamy korzystając z funkcji wbudowanych w arkuszu kalkulacyjnym.

Współczynnik korelacji liniowej Pearsona r – bezwymiarowy wskaźnik z przedziału $[-1, 1]$ określający stopień liniowej zależności dwóch zestawów danych. Składnia w Excelu: =PEARSON(tablica1;tablica2).

Współczynniki regresji liniowej, składnia w Excelu:

m : =NACHYLENIE(znane_y;znane_x); b : =ODCIĘTA(znane_y;znane_x)

Uwaga: zwrócić uwagę, że na pierwszym miejscu jest „y” a na drugim „x”.

Wartości: m i b , $u_A(m)$ i $u_A(b)$ oraz r^2 i $u(r)$ otrzymamy korzystając z bardziej wszechstronnej funkcji tablicowej REGLINP, która zwraca tablicę wartości. Składnia: =REGLINP(znane_y;znane_x;stała;statystyka).

Stała – argument opcjonalny; domyślna wartość PRAWDA oznacza normalne liczenie wartości współczynnika b ; wartość FAŁSZ wymusza stałą $b = 0$ (wartość m jest dopasowana do danych tak, aby spełnić równanie $y = mx$).

Statystyka – argument opcjonalny. Jeżeli dla wyświetlenia wartości funkcji oznaczymy obszar „2 kolumny na 2 wiersze (3 wiersze)” i wartością jest:

– PRAWDA, to funkcja w kolejnych wierszach zwraca kolejno: m i b , $u_A(m)$ i $u_A(b)$ – przy zaznaczeniu obszaru z 2 wierszami (oraz r^2 i $u(r)$ przy zaznaczeniu obszaru z 3 wierszami).

– FAŁSZ lub argument został pominięty, to funkcja zwraca jedynie wartości współczynników m i b .

Aby użyć funkcję REGLINP trzeba: (i) zaznaczyć obszar w którym ma się znaleźć wynik; (ii) wpisać nazwę funkcji; (iii) zatwierdzić jej wprowadzanie kombinacją klawiszy *Ctrl+Shift+Enter*.

Na temat wszystkich statystyk, generowanych przez funkcję REGLINP można przeczytać w Pomocy.

Uwaga. W arkuszu kalkulacyjnym jest wykorzystana tzw. normalna metoda najmniejszych kwadratów, pojawia się pytanie na ile ta metoda, w porównaniu do prostej regresji ortogonalnej z rys. odrębnego, jest z nią zgodna.

Dodatek 2. Uzupełnienie: Podstawowe pojęcia i wielkości termodynamiczne³

Parametry termodynamiczne – wielkości fizyczne charakteryzujące układ termodynamiczny, których zmiana jest istotna w danym zjawisku termodynamicznym. Parametry termodynamiczne nazywane są również parametrami stanu układu termodynamicznego lub wielkościami termodynamicznymi.

Przemiana termodynamiczna lub **proces termodynamiczny** – przejście układu z jednego stanu równowagi termodynamicznej (stanu początkowego) do drugiego stanu równowagi termodynamicznej (stanu końcowego).

Energia wewnętrzna, U – całkowita energia układu będąca sumą wszystkich rodzajów energii wszystkich cząsteczek danego ciała lub układu ciał, które zależą od stanu wewnętrznego a nie zewnętrznego. Do energii wewnętrznej nie wlicza się energii kinetycznej układu jako całości oraz jego energii potencjalnej w polu sił. Ponieważ wartość energii wewnętrznej jest trudna do ustalenia ze względu na jej złożony charakter, w opisie procesów termodynamicznych operuje się najczęściej zmianami energii wewnętrznej, a nie jej całkowitą wartością. Podejście takie umożliwia pominięcie tych rodzajów energii, które nie zmieniają się w rozpatrywanym układzie termodynamicznym.

Uwaga! Proces przekazywania ciału energii wewnętrznej przez pracę pozwala w sposób ilościowy zdefiniować zmianę energii wewnętrznej: $\Delta U = W$, gdzie W jest pracą wykonaną przez ciało lub nad ciałem.

Sposoby zmiany energii wewnętrznej ciała:

- przez pracę (*na sposób pracy*),
- przez cieplny przepływ energii (*na sposób ciepła*).

Ciepło – termin (jego sens zależy od kontekstu), który jest używany dwojako:

- a) proces; bardziej poprawnie zamiast „ciepło”, powinniśmy mówić – cieplny przepływ (lub przekaz) energii a skróto – przepływ ciepła;
- b) wielkość fizyczna Q charakteryzująca proces cieplnego przepływu energii równa ilości przekazanej energii.

² np. P. Bilski i in., *Materiały do ćwiczeń ze wstępu do pracowni fizycznej. Normy ISO i matematyka w laboratorium*. Wyd. Naukowe UAM; 2014; A. Zięba: *Analiza danych w naukach ścisłych i technice*. PWN. Warszawa, 2014.

³ Skorzystano: T. Molenda, J. Stelmach: *Fizyka – prościej, jaśniej*. Interbook, Szczecin 2003 (lub inne wydanie).

Uwagi:

Ciepło może być rozumiane jako ilość energii potrzebna do zmiany stanu skupienia ciała (jest to tzw. ciepło utajone).

„Ciepło” jest nazwą historyczną, którą często i błędnie utożsamia się z energią wewnętrzną ciała, mówiąc „ciało posiada ciepło”.

Błędem, i to poważnym, jest mówienie „energia cieplna”. Ciepło nie jest formą energii. Od strony matematycznej nie jest funkcją stanu i nie można potraktować jako przyrostu ΔQ czy różniczki funkcji dQ , jest tzw. formą Pfaffa.

Ciepło (cieplny przepływ energii), Q – ta część energii wewnętrznej ΔU , którą ciało o temperaturze wyższej przekazuje ciału o temperaturze niższej bez wykonywania pracy W

$$Q = \Delta U, \quad \text{gdy} \quad W = 0.$$

Uwaga: mikroskopowo – ciepło może być rozumiane jako ta część energii wewnętrznej, która przekazywana jest między cząsteczkami i/lub atomami podczas zderzeń.

I zasada termodynamiki. Zmiana energii wewnętrznej ΔU ciała lub układu ciał równa jest przekazanej energii w wyniku wykonanej pracy W i cieplnego przepływu energii Q

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

Uwaga 1. Ciepło dostarczone ciału i pracę wykonaną nad ciałem przez siły zewnętrzne przyjmujemy za dodatnie. Ciepło oddane przez ciało i pracę przez nie wykonaną kosztem własnej energii wewnętrznej przyjmujemy za ujemne.

Uwaga 2. W zapisie infinitezimalnym zamiast ΔU mamy różniczkę dU , natomiast przed Q i W wstawiamy symbol „przekreślone d ” co oznacza formę Pfaffa.

Ciepło molowe, c_m – stosunek ilości ciepła Q pobranego przez ciało do iloczynu liczności materii n ciała i przyrostu jego temperatury ΔT wywołanego pobraniem tego ciepła Q

$$c_m = \frac{Q}{n\Delta T}.$$

Ciepłem molowym posługujemy się głównie w przypadku gazów. Ponieważ gazy charakteryzują się dużą ściśliwością istotny jest sposób przepływu ciepła. Z tego względu posługujemy się

ciepło molowe przy stałej objętości: $c_v = Q_v/(n\Delta T)$ (dla przemiany izochorycznej),

ciepło molowe przy stałym ciśnieniu: $c_p = Q_p/(n\Delta T)$ (dla przemiany izobarycznej).

Pojemność cieplna, C – stosunek ilości ciepła Q dostarczonego ciału (układowi) do zmiany jego temperatury ΔT :

$C = Q/\Delta T$. Pojemność cieplna C ciała o masie m jest równa $C = mc$, gdzie c jest *ciepłem właściwym*.

Równanie stanu gazu doskonałego (równanie Clapeyrona) – równanie opisujące stan gazu doskonałego, które wiąże ze sobą podstawowe parametry gazu – ciśnienie p , objętość V , temperaturę T i licznosc materii n

$$pV = nRT,$$

gdzie $R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ – uniwersalna stała gazowa.

Przemiana adiabatyczna – przemiana termodynamiczna która przebiega bez wymiany ciepła między układem a otoczeniem.

Równanie przemiany adiabatycznej (równanie Poissona) – równanie opisujące zależność między objętością V gazu doskonałego a jego ciśnieniem p w przemianie adiabatycznej

$$pV^\kappa = \text{const},$$

gdzie $\kappa = c_p/c_v$ (iloraz ciepła molowego gazu przy stałym ciśnieniu do jego ciepła molowego przy stałej objętości).

Uwaga! Wykresem przemiany adiabatycznej w układzie współrzędnych p i V jest adiabata.

Liczba stopni swobody, i – najmniejsza liczba współrzędnych, które należy podać, aby całkowicie określić położenie ciała w przestrzeni. Dla cząsteczki jednoatomowej swobodnie poruszającej się $i = 3$, dla dwuatomowej $i = 5$, dla wieloatomowej $i = 6$. Trzy stopnie swobody związane są z ruchem postępowym, pozostałe – z obrotami w przestrzeni wokół środka masy.

Zasada ekwipartycji energii. Na każdy stopień swobody przypada średnio taka sama energia kinetyczna równa $kT/2$, gdzie $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$ – stała Boltzmanna (na niej opiera się nowa definicja jednostki temperatury układu SI).

Równanie (wzór) Mayera – związek między c_p i c_v : $c_p - c_v = R$.

Gaz doskonały – przydatne wzory:

Energia wewnętrzna: $U = (i/2)NkT$ lub $U = (i/2)nRT$ lub $U = nc_vT$, gdzie N – liczba cząsteczek gazu

Przemiana izotermiczna: $T = \text{const}$, $pV = \text{const}$, $\Delta U = 0$, $Q = -W$

Przemiana izochoryczna: $V = \text{const}$, $p/T = \text{const}$, $\Delta U = Q = nc_v\Delta T$, $W = 0$

Przemiana izobaryczna: $p = \text{const}$, $V/T = \text{const}$, $\Delta U = nc_v\Delta T$, $Q = nc_p\Delta T$, $W = -p\Delta V$

Przemiana adiabatyczna: $Q = 0$, $pV^\kappa = \text{const}$ ($\kappa = c_p/c_v$), $\Delta U = nc_v\Delta T$, $W = \Delta U$