

ZADANIE C₉ – C₁₂

BADANIE PRZEMIAN GAZOWYCH, WYZNACZANIE TEMPERATURY ZERA BEZWZGLĘDNEGO

I. Cel ćwiczenia

W ćwiczeniu będą badane przemiany termodynamiczne (izotermiczna i izochoryczna) powietrza. Celem ćwiczenia jest zbadanie w jakich warunkach gaz ten może być przybliżony modelem gazu doskonałego oraz wyznaczenie temperatury zera bezwzględnego.

II. Podstawy teoretyczne

Gaz doskonały jest to abstrakcyjny, matematyczny model fizyczny gazu, spełniający następujące warunki:

- brak oddziaływań międzycząsteczkowych z wyjątkiem odpychania w momencie zderzeń cząsteczek,
- znikomą objętość cząsteczek w stosunku do objętości gazu,
- doskonale sprężyste zderzenia między cząsteczkami gazu,
- ciągły, chaotyczny ruch cząsteczek gazu.

Gaz taki w mechanice klasycznej opisuje równanie Clapeyrona (równanie stanu gazu doskonałego):

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

gdzie p , V , T , n i N oznaczają odpowiednio ciśnienie, objętość, temperaturę, liczbę moli oraz liczbę cząstek gazu, natomiast $R = 8,31446261815324 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ jest stałą gazową, a $k = 1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ jest stałą Boltzmanna.

Gaz doskonały to model, słuszny w pełni jedynie dla bardzo rozrzedzonych gazów. W rzeczywistych gazach wzrost ciśnienia powoduje, że zmniejszają się odległości między cząsteczkami oraz pojawiają się oddziaływania międzycząsteczkowe. Oddziaływania te odgrywają coraz większą rolę gdy maleje temperatura gazu zbliżając się do temperatury skraplania. Z drugiej strony, w bardzo wysokich temperaturach zderzenia przestają być sprężyste. Miarą odchylenia zachowania gazu rzeczywistego od gazu idealnego jest współczynnik ściśliwości:

$$Z = \frac{pV}{nRT}, \quad (2)$$

który dla gazu doskonałego z definicji jest równy jeden.

W praktyce model gazu doskonałego może być stosowany do niemalże wszystkich gazów w warunkach zbliżonych do normalnych. W niższych temperaturach czy wyższych ciśnieniach nie jest to już dobre przybliżenie gazów doskonałych. W wysokich ciśnieniach objętość gazu rzeczywistego jest często znacznie większa niż gazu doskonałego, natomiast w niskich temperaturach ciśnienie gazu rzeczywistego jest często znacznie niższe niż gazu doskonałego. Również w przypadku większości ciężkich gazów (np. pary wodnej) model ten nie może być stosowany.

Stan równowagi termodynamicznej trwa niezmiennie, chyba że zostanie przerwany przez impuls energetyczny, który zapoczątkowuje proces termodynamiczny. Proces termodynamiczny, zwany też przemianą termodynamiczną to każda, dowolna zmiana stanu termodynamicznego układu fizycznego. Procesy termodynamiczne klasyfikuje się ze względu na stałość określonych wartości funkcji stanu początkowego i końcowego przemiany. I tak najczęściej dyskutowane przemiany termodynamiczne to:

- przemiana izobaryczna (stałe ciśnienie $p = \text{const.}$)
- przemiana izotermiczna (stała temperatura $T = \text{const.}$)
- przemiana izochoryczna (stała objętość $V = \text{const.}$)
- przemiana izentalpowa (stała entalpia $H = \text{const.}$)
- przemiana adiabatyczna (brak wymiany ciepła z otoczeniem $\Delta Q = 0$)
- przemiana izentropowa - adiabatyczna odwracalna (brak wymiany ciepła z otoczeniem $\Delta Q = 0$, stała entropia $S = \text{const.}$)

- przemiana politropowa ($pV^n = \text{const.}$, gdzie $n \in \mathbb{R}$ jest wykładnikiem politropy)

Jeśli proces termodynamiczny przebiega odpowiednio powoli i płynnie, możliwe jest przybliżenie jego przebiegu ciągłą ścieżką równowagowych stanów termodynamicznych i opisanie go funkcją procesu. Jednak w ogólności to stan początkowy i końcowy są definiującymi elementami procesu. Rzeczywisty przebieg procesu nie jest głównym problemem i dlatego często jest ignorowany. Ogólnie rzecz biorąc, podczas faktycznego przebiegu procesu termodynamicznego układ przechodzi przez stany fizyczne, które nie są opisywane jako stany termodynamiczne, ponieważ są one dalekie od wewnętrznej równowagi termodynamicznej. Ze względu na to, że wszystkie układy niepozostające w równowadze termodynamicznej stale ulegają jakimś zmianom, ustalenie początku i końca procesów termodynamicznych jest również czysto umowne i zależy od sytuacji.

III. Wykonanie pomiarów

III.1. Wyposażenie

Masz do dyspozycji:


- strzykawkę o pojemności 60 ml z zamontowanym wewnątrz termistorem o dokładności $0,5^{\circ}\text{C}$ i zakresie -35 do 135°C ;
- sferę miedzianą o promieniu 2 cali z zamontowanym wewnątrz termistorem o dokładności $0,5^{\circ}\text{C}$ i zakresie -35 do 135°C ;
- bezprzewodowy czujnik odczytu temperatury PASCO PS-3222 o rozdzielczości $0,01^{\circ}\text{C}$;
- bezprzewodowy czujnik ciśnienia PASCO PS-3203 o dokładności 2 kPa i rozdzielczości 0,1 kPa pracujący w zakresie 0-400 kPa;
- tablet z oprogramowaniem pozwalającym na odczyt w czasie rzeczywistym temperatury i ciśnienia z czujników;
- naczynie styropianowe;
- wodę i lód;
- czajnik elektryczny do zagotowania wody.

III.2. Planowanie pomiarów

Pamiętaj, że każdą przemianę definiuje stan początkowy i końcowy, który powinien być stanem stacjonarnym. Dlatego przed każdym odczytem parametrów gazu staraj się osiągnąć stan stacjonarny, tzn. taki stan w którym parametry gazu się nie zmieniają. Czasem może być to praktycznie niemożliwe, wówczas musisz przynajmniej doprowadzić do sytuacji w której parametry gazu zmieniają bardzo powoli.

W przypadku przemiany izotermicznej nigdy nie przekraczaj tłokiem strzykawki położenia poniżej 25 ml. Może to spowodować uszkodzenie sondy temperatury znajdującej się w strzykawce.

W przypadku przemiany izochorycznej po wyjęciu sfery z gorącej wody nie dotykaj jej powierzchni, gdyż może to grozić poparzeniem.

Do odczytu ciśnienia i temperatury gazu będziesz używał bezprzewodowych czujników PS-3222 i PS-3203 firmy PASCO. Zwróć uwagę na numery czujników którymi dysponujesz tak aby podczas pomiaru połączyć się z nimi, a nie na przykład z czujnikami kolegów czy koleżanek pracującymi na innych stanowiskach. Są to numery w formacie xxx-xxx widoczne na każdym z czujników obok ikony . Jeśli czujnik sygnalizuje rozładowaną baterię w przypadku czujnika ciśnienia podłącz go do ładowarki, a w przypadku czujnika temperatury poproś asystenta o wymianę baterii.

Uruchom na tablecie program SparkVue i w menu wybierz **Eksperymenty...** a następnie z dostępnych eksperymentów wybierz eksperyment **C9 – Przemiany gazowe** znajdujący się w folderze PTP. W oknie programu Sparkvue powinny być jednocześnie widoczne cyfrowe odczyty sondy temperatury i czujnika ciśnienia oraz wykres przedstawiający odczyt ciśnienia i temperatury w funkcji czasu. Włącz czujniki temperatury i ciśnienia, a w menu czujników Bluetooth programu Sparkvue ustaw połączenie z posiadanymi czujnikami. Przed rozpoczęciem pomiarów sprawdź czy potrafisz swobodnie posługiwać się interfejsem programu, w tym uruchomić i zakończyć pomiar z automatycznym odczytem ciśnienia i temperatury z wybraną częstotliwością. Jeśli obsługa programu jest dla Ciebie nieintuicyjna skorzystaj z dostępnej na stanowisku instrukcji obsługi programu.

III.3. Badanie przemiany izochorycznej

W naczyniu styropianowym przygotuj wodę o jak najniższej możliwej temperaturze. W tym celu wymieszaj wodę o temperaturze pokojowej z lodem, po schłodzeniu się wody wyjmij z niej resztki lodu. Do badania przemiany izochorycznej użyj miedzianej sfery z zamontowaną sondą temperatury oraz możliwością podłączenia czujnika ciśnienia. Podłącz do sfery czujnik temperatury oraz czujnik ciśnienia. W programie Sparkvue ustaw aby **temperatura była mierzona w stopniach Celsjusza**. Na karcie pracy zapisz ciśnienie i temperaturę gazu wewnątrz sfery. Zanurz sferę do naczynia z zimną wodą, dopilnuj aby cała sfera była zanurzona w wodzie. Poczekaj do ustabilizowania się temperatury. Zapisz ciśnienie i temperaturę gazu. Nie wyciągając sfery z wody dolewaj do naczynia gorącej wody, tak aby stopniowo zwiększać temperaturę kąpeli wodnej. W trakcie zbieraj kolejne punkty pomiarowe aż osiągniesz temperaturę 80-90°C. Przy dolewaniu wody uważaj aby nie lać jej bezpośrednio na sferę, gdyż spowoduje to jej lokalne nagrzanie i wydłuży czas potrzebny do ustabilizowania się temperatury. W przypadku gdy wody w naczyniu będzie za dużo wylej jej nadmiar pilnując jednak aby w każdym momencie w naczyniu było tyle wody aby sfera była przynajmniej częściowo zanurzona. W rezultacie powinieneś zebrać kilkanaście punktów pomiarowych (par odczytów ciśnienia i temperatury gazu).

Pomiary wykonaj dla kilku różnych ilości gazu.

III.4. Badanie przemiany izotermicznej

Do badania przemiany izotermicznej użyj strzykawki z zamontowaną sondą temperatury oraz możliwością podłączenia czujnika ciśnienia. Przy odłączonym czujniku ciśnienia ustaw strzykawkę w wybranym położeniu początkowym i podłącz czujnik ciśnienia. Zanotuj początkowe wartości objętości, ciśnienia i temperatury gazu. Powoli zmieniaj objętość gazu w strzykawce. Po każdorazowej zmianie objętości poczekaj aż gaz dojdzie do równowagi termicznej i jego temperatura powróci do wartości początkowej. Dla każdego położenia tłoka zapisz objętość, ciśnienie i temperaturę gazu. Zwróć uwagę, czy przy dużych i małych ciśnieniach strzykawka jest na tyle szczelna, że ilość zamkniętego w niej gazu się nie zmienia. W rezultacie powinieneś zebrać kilkanaście punktów pomiarowych (odczytów objętości, ciśnienia i temperatury gazu).

Pomiary wykonaj dla kilku różnych ilości gazu w strzykawce.

IV. Analiza wyników pomiarów

W przypadku przemiany izochorycznej głównym zadaniem jakie jest postawione podczas analizy danych pomiarowych jest wyznaczenie temperatury zera bezwzględnego. Aby to zrobić:

- Oszacuj, który z parametrów: ciśnienie czy temperaturę mierzysz dokładniej i odpowiednio dokonaj wyboru zmiennej zależnej i niezależnej.
- Na jednym wykresie przedstaw zależność ciśnienia od temperatury odczytanej w stopniach Celsjusza (lub temperatury od ciśnienia, w zależności którą zmienną uznasz za zmierzoną dokładniej) dla różnej liczby moli gazu zamkniętego w sferze.
- W zakresie gdzie gaz może być opisany modelem gazu doskonałego wykonaj dopasowanie tej zależności zgodne z równaniem gazu doskonałego.
- Z każdego dopasowania wyznacz liczbę moli gazu oraz temperaturę zera bezwzględnego. Zastosuj wybrany test statystyczny aby ocenić czy wyznaczona temperatura zera bezwzględnego wyznaczona różni się w zależności od liczby moli gazu.

W przypadku przemiany izotermicznej głównym zadaniem jakie jest postawione podczas analizy wyników pomiarów jest odpowiedź na pytanie, czy badany gaz może być opisany modelem gazu doskonałego lub ewentualnie w jakim zakresie ciśnień ten model dobrze opisuje dane pomiarowe. Aby to ocenić:

- dla każdego punktu pomiarowego (stanu gazu dla którego zmierzyłeś jego objętość, temperaturę i ciśnienie) oblicz wielkość pV/T oraz jego niepewność. Pamiętaj aby temperaturę wyrażać w Kelwinach.

- Na jednym wykresie przedstaw zależność pV/T od ciśnienia dla różnej liczby moli gazu i oszacuj w jakim zakresie można przyjąć, że badany gaz można traktować jak gaz doskonały. Pamiętaj przy tym, że objętość którą zapisywałeś odpowiada objętości gazu zamkniętego w strzykawce, natomiast rzeczywista objętość gazu jest większa ze względu na pewną objętość gazu w rurkach łączących strzykawkę z czujnikiem ciśnienia.
- W zakresie gdzie uznałeś, że model gazu doskonałego dobrze opisuje zmierzony przez Ciebie gaz, korzystając z równania gazu doskonałego wyznacz liczbę moli tego gazu. Spróbuj także oszacować objętość gazu znajdującego się w rurkach połączeniowych.

Zgodnie ze specyfikacją użytych czujników dokładność pomiaru ciśnienia wynosi $\Delta_p = 2 \text{ kPa}$, natomiast dokładność pomiaru temperatury wynosi $\Delta_T = 0,5 \text{ K} = 0,5^\circ\text{C}$.

V. Dodatkowe uwagi odnośnie do raportu

Jeśli na którymś z etapów analizy prowadzisz dopasowanie modelowej zależności do danych metodą najmniejszych kwadratów, **obowiązkowo** podaj jawną formę wielkości minimalizowanej, jako że postać ta jednoznacznie definiuje, który z wariantów metody wybierasz, a więc jaką postać przybierają wzory na oceny nieznanych współczynników modelowej zależności oraz ich niepewności standardowe i nie musisz cytować stosownych wzorów dla tych obiektów.

W raporcie zamieść wszystkie surowe wyniki pomiarów tak, aby sięgając jedynie do raportu i bez potrzeby odwoływania się do protokołu z doświadczenia można było wykonać pełną i niezależną analizę Twoich danych. Pamiętaj, że w niektórych przypadkach uzasadnione jest przeniesienie tych danych do Suplementu. W przypadku dużej liczby danych pomiarowych (np. zebranych komputerowo) dopuszczalne jest umieszczenie danych nie w formie tabel, ale w formie wykresów. Wówczas oryginalne dane należy dołączyć do raportu w formie cyfrowej (np. w wiadomości email do prowadzącego).

Nim przygotujesz raport, zaznajom się z uwagami zawartymi w [wymaganiach dotyczących raportu](#) zamieszczonymi na stronie pracowni. Absolutnie zalecane jest także świadome przyjrzenie się redakcji tekstu, a także tabel, rysunków i wzorów, sposobów ich numerowania, tytułowania i opisywania w dowolnym, ale wydanym przez uznane wydawnictwo, akademickim podręczniku do fizyki, jak również zajrzenie do kilku publikacji w różnych czasopismach naukowych, co może ułatwić podjęcie decyzji co do podziału Twego raportu na części.

VI. Literatura uzupełniająca

- D. Halliday, R. Resnick, *Fizyka*, t. I, II, Warszawa 2001. § 49.1 – 49.3;
- instrukcja programu SparkVue <http://pracownie1.fuw.edu.pl/techpom/pliki/SparkVue-C9.pdf>
- A. Zięba, *Analiza danych w naukach ścisłych i technice*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.

Pytania i zadania definiujące wymagania do ćwiczenia

Problem 1. Obliczyć masę cząstek helu zamkniętego w balonie o pojemności 5 l w temperaturze 22°C , zakładając, że gaz ten może być traktowany jako gaz doskonały. Ciśnienie gazu w balonie wynosi 1,1 atm.

Problem 2. W strzykawce wypełnionej gazem objętość gazu została nagle zmniejszona o połowę. Ciśnienie gazu w takim przypadku zwiększy się więcej czy mniej niż dwukrotnie. Dlaczego? Jak zmieni się ono po dłuższej chwili czasu.

Problem 3. Gaz doskonały, którego początkowe ciśnienie wynosi 3 jednostki ciśnienia, zajmuje objętość równą 4 jednostkom objętości. W tabeli podano wartości ciśnienia i objętości gazu (w tych samych jednostkach) na zakończenie pięciu różnych procesów. Dla którego z procesów punkty odpowiadające stanowi początkowemu i końcowemu leżą na tej samej izoterme?

p	12	6	5	4	1
V	1	2	7	3	12

Problem 4. Równanie van der Waalsa $\left(p - n^2 \frac{a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$ jest równaniem stanu gazu będącym rozszerzeniem równania stanu gazu idealnego uwzględniającym objętość cząsteczek gazu b oraz oddziaływanie wzajemne cząsteczek gazu a/V^2 (cząsteczki gazu przyciągają się, w wyniku czego rzeczywiste ciśnienie gazu na ścianki naczynia jest mniejsze niż w przypadku, gdyby tego oddziaływania nie było). Parametry a i b są związane z parametrami punktu krytycznego gazu poprzez zależności: $a = \frac{27R^2T_k^2}{64p_k}$ oraz $b = \frac{RT_k}{8p_k}$. Naszkicuj poprawkę jakie to równanie wnosi do kształtu izoterm gazu doskonałego w pobliżu punktu krytycznego.

Problem 5. W jakiej temperaturze jeden kilomol argonu będzie zajmował objętość 1 m^3 jeśli jego ciśnienie wynosi 3 MPa . Załóż, że stan argonu w tych warunkach może być opisany równaniem van der Waalsa. Parametry krytyczne dla argonu: $p_k = 4,86 \text{ MPa}$, $T_k = 150,8 \text{ K}$.

Opracowanie: A. Drabińska, wrzesień 2020 r.