

ZADANIE C2
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, wyznaczenie objętości molowej powietrza oraz temperatury zera bezwzględne.

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 $R = 8,31446261815324 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ jest stałą gazową, a $k = 1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$ 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 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;
- bezprzewodowy czujnik ciśnienia PASCO PS-3203 o dokładności 2 kPa pracujący w zakresie 0-400 kPa;
- komputer z oprogramowaniem pozwalającym na odczyt w czasie rzeczywistym temperatury i ciśnienia z czujników;
- naczynie termiczne;
- 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.

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 komputerze program **Capestone**, włącz czujniki temperatury i ciśnienia i w panelu bocznym wybierz opcję **Hardware Setup**. Z wyświetlanych urządzeń wybierz do podłączenia czujniki jakimi dysponujesz. Po podłączeniu czujników zamknij panel **Hardware Setup** i na stronie głównej wybierz kafelki **Classic Templates**, a następnie wybierz szablon siatki 2×2 . W dwóch oknach wybierz cyfrowe odczyty z czujników (Digits), w jednym wykres (Graph), a w jednym tabelę danych (Table). W panelu Tabeli, korzystając z paska narzędzi Tabeli, dodaj jeszcze jedną kolumnę. Używając

przycisków <**Select Measurement**> zdefiniuj jakie wielkości ma prezentować dany wskaźnik. Po wybraniu odpowiednich wskazań, możesz również zmienić jednostki w jakich wartość jest odczytywana. W jednej z kolumn dodaj wartości wpisywane ręcznie (<**Select Measurement**> → **Create New** → **Run-Tracked User-Entered Data**), do ręcznego wpisywania odczytanej objętości. W panelu kontrolnym, wybierz tryb pomiaru **Keep mode**, a następnie włącz podgląd aktualnych odczytów (**Preview**). Zapisanie aktualnego odczytu nastąpi po kliknięciu przycisku **Keep Sample**. Aby zakończyć aktualny pomiar kliknij przycisk **Stop**. Przed rozpoczęciem kolejnego pomiaru wyeksportuj dane pomiarowe do pliku używając opcji **Export Data** w głównym menu. Dane może również przekopiować bezpośrednio z Tabeli. Jeśli obsługa programu jest dla Ciebie nieintuicyjna skorzystaj z dostępnej na stanowisku instrukcji obsługi programu lub poproś o pomoc asystenta.

W programie **Capstone** ustaw, aby podczas wszystkich pomiarów **temperatura była mierzona w stopniach Celsjusza**.

III.3. 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. **Nigdy nie przekraczaj tlokiem strzykawki położenia poniżej 25 ml. Może to spowodować uszkodzenie sondy temperatury znajdującej się w strzykawce.** Zanotuj początkowe wartości objętości, ciśnienia i temperatury gazu. Objętość gazu w strzykawce zmieniaj powoli, tak aby zapewniona była skuteczna wymiana ciepła z otoczeniem i temperatura gazu w strzykawce była stała podczas przemiany. Jeśli temperatura gazu się zmieniła 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, że przy dużych i małych ciśnieniach strzykawka może być nieszczelna. Wówczas pomiary powinny być przeprowadzone w miarę sprawnie, tak aby zminimalizować zmiany ciśnienia wywołane nieszczelnością. W rezultacie powinieneś zebrać kilkanaście punktów pomiarowych (odczytów objętości, ciśnienia i temperatury gazu).

Pomiary wykonaj dla kilku różnych ilości gazu w strzykawce.

III.3. Badanie przemiany izochorycznej

Naczynie termiczne ustaw stabilnie na regulowanym stoliku, tak aby w trakcie eksperymentu możliwe było swobodne wylewanie nadmiaru wody przy użyciu zamontowanego kranika i naczynia styropianowego. W naczyniu termicznym 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. Na karcie pracy zapisz ciśnienie i temperaturę gazu wewnątrz sfery. Używając odpowiedniego statywu 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 kąpieli 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).

Dla kilku innych ilości gazu wykonaj podobne pomiary zanurzając sferę w naczyniu z wodą zimną, gorącą i o jednej temperaturze pośredniej. Użyj do tego trzech różnych naczyń termicznych. **Po wyjęciu sfery z gorącej wody nie dotykaj jej powierzchni, gdyż może to grozić poparzeniem.**

IV. Analiza wyników pomiarów

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.
- W zakresie gdzie uznałeś, że model gazu doskonałego dobrze opisuje zmierzony przez Ciebie gaz, korzystając z równania gazu doskonałego wyznacz liczbę moli tego gazu.
- Dla każdej serii pomiaru, dla objętości odpowiadającej ciśnieniu atmosferycznemu, oblicz objętość molową powietrza. Wynik porównaj z przewidywaną objętością molową gazu doskonałego w warunkach normalnych.

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.
- Oblicz objętość molową powietrza, i wynik porównaj z przewidywaną objętością molową gazu doskonałego w warunkach normalnych.
- Zastosuj wybrany test statystyczny aby ocenić czy wyznaczona temperatura zera bezwzględnego wyznaczona różni się w zależności od liczby moli gazu.

Jeśli na którymś z etapów analizy danych prowadzisz dopasowanie zależności modelowej metodą najmniejszych kwadratów, **obowiązkowo** podaj postać dopasowywanej funkcji oraz określ przyjęte niepewności. Podaj uzasadnienie wyboru zmiennej niezależnej, za wyjątkiem sytuacji, w których ona jest z góry narzucona. Przeprowadź walidację modelu uwzględniającą zasadność przyjętych niepewności pomiarowych. Jako wynik dopasowania podaj estymaty dopasowywanych parametrów wraz z ich niepewnościami. W uzasadnionych przypadkach przedyskutuj istotność dopasowywanych parametrów. Do dobrej praktyki należy również w przypadku dopasowania funkcji opisanej więcej niż jednym parametrem podanie kowariancji i współczynników korelacji parametrów a także wykresu reszt z tego dopasowania oraz jego dyskusja.

Pamiętaj też, że najczęściej używana metoda najmniejszych kwadratów wymaga wyników pomiarowych, z których każdy uzyskany jest w niezależnym akcie pomiarowym. **Nie mają takiego charakteru wielkości uzyskane np. w wyniku odejmowania jednej ustalonej wartości od wszystkich wyników pomiarów, jeśli wartość odejmowana pochodzi z pomiaru.**

V. Dodatkowe uwagi odnośnie do raportu

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 Twojego raportu na części.

W raporcie **obowiązkowo** 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 bardzo 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).

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-C2.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. Oblicz objętość jaką zajmie 1 mol gazu doskonałego w warunkach normalnych.

Problem 3. 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 4. 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 izotermie?

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

Problem 5. Równanie van der Waalsa $(p - n^2 \frac{a}{V^2})(V - nb) = nRT$ 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 $b = \frac{RT_k}{8p_k}$. Naskicuj poprawkę jakie to równanie wnosi do kształtu izoterm gazu doskonałego w pobliżu punktu krytycznego.

Problem 6. W jakiej temperaturze jeden kilomol argonu będzie zajmował objętość 1 m³ jeśli jego ciśnienie wynosi 3 MPa. Załóż, że stan argonu w tych warunkach może być opisany równaniem van der Waalsa. Parametry krytyczne dla argonu: $p_k = 4,86$ MPa, $T_k = 150,8$ K.

Opracowanie: A. Drabińska, wrzesień 2020 r.