

Ćwiczenie 22

Próżnia. Własności gazów

Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z układem próżniowym, pompą próżniową i pomiarem ciśnienia podczas pompowania układu. Sprawdzenie prawa Boyle'a–Mariotte'a dla powietrza w temperaturze pokojowej.

Wprowadzenie

Próżnia w potocznym rozumieniu to pusta przestrzeń po usunięciu z niej materii. Do stanu idealnej próżni możemy się tylko mniej lub bardziej zbliżyć – w próżni uzyskanej przy pomocy różnych metod eksperymentalnych zawsze pozostaje mniej lub bardziej rozrzedzony gaz, a ilościową miarą próżni jest ciśnienie tego gazu*. Mówi się, że próżnia jest tym wyższa, im niższe jest jej ciśnienie.

Próżnię tradycyjnie dzieli się na szereg zakresów. W różnych źródłach zakresy te są nieco różne, ale poszczególne „rodzaje” próżni mają swoje uzasadnienie w odmiennych metodach jej wytwarzania, pomiaru i charakterze procesów fizycznych zachodzących w układzie próżniowym. Wyróżnia się:

- próżnię niską (podciśnienie) $1000 \text{ hPa} < p < 30 \text{ hPa}$
- próżnię średnią (wstępną) $30 \text{ hPa} < p < 10^{-3} \text{ hPa}$
- próżnię wysoką $10^{-3} \text{ hPa} < p < 10^{-9} \text{ hPa}$
- próżnię ultrawysoką $10^{-9} \text{ hPa} < p < 10^{-12} \text{ hPa}$
- próżnię ekstremalnie wysoką $< 10^{-12} \text{ hPa}$

W naszym ćwiczeniu będziemy wykonywać eksperymenty w zakresie próżni niskiej i średniej. Przyrządy do mierzenia i wytwarzania próżni stosowane w ćwiczeniu opisane są w punkcie *Elementy układu próżniowego*.

Przegląd zakresów próżni

Ciśnienie atmosferyczne jest bliskie 1000 hPa. Zakres ciśnień niższych do 30 hPa nazywamy *próżnią niską* albo *podciśnieniem*. Może być wytworzone przy pomocy prostych urządzeń, takich jak np. odkurzacz (jego związek z próżnią uwidacznia angielska nazwa *vacuum cleaner*). Ciśnienie gazu w tym zakresie może być mierzone przy pomocy manometru mechanicznego. Próżnia niska znajduje szerokie zastosowanie w urządzeniach

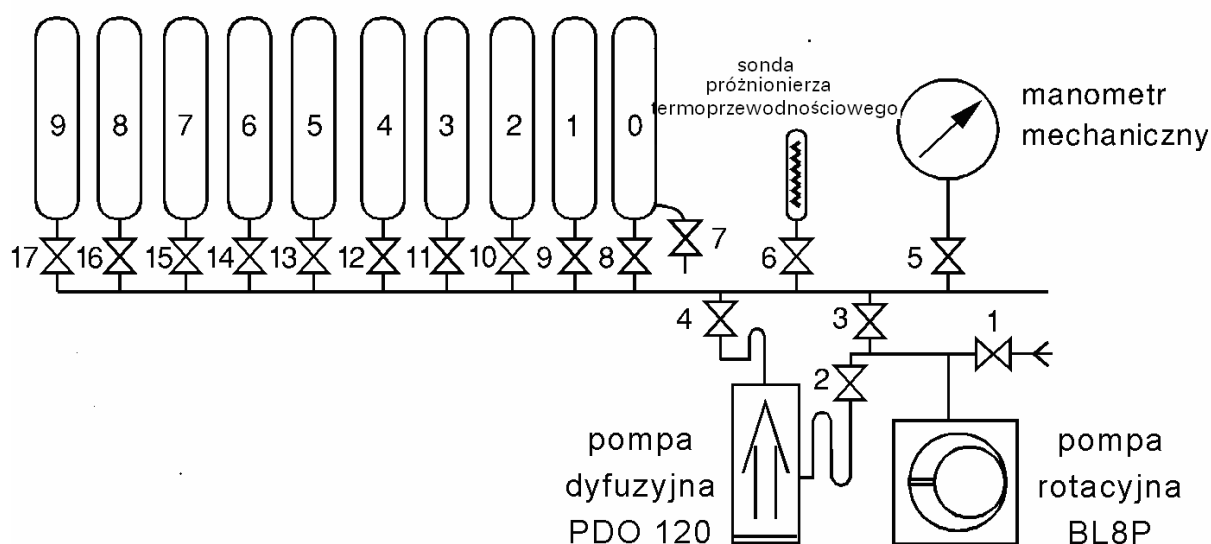
* W układzie SI jednostką ciśnienia jest paskal [Pa] określany jako siła 1 N działająca na 1 m². Mierniki ciśnienia naszych układów próżniowych wyskalowane są w następujących jednostkach:

Hektopaskal	1 hPa = 100 Pa – najczęściej używana wielokrotność paskala,
Tor	1 Tr = 1,33 hPa – jest to ciśnienie wywierane przez 1 mm słupa rtęci,
bar	1 bar = 1000 Pa,
atmosfera techniczna	1 kg/cm ² = 980,7 hPa – ciśnienie wywierane przez ciężarek o masie 1kg na powierzchnię 1 cm ² .

przemysłowych, gdyż wymusza przepływ cieczy i gazów, a nawet umożliwia manipulację przedmiotami stałymi (przy pomocy przyssawek).

Pierwszym zakresem „prawdziwej” próżni jest próżnia średnia występująca w zakresie ciśnienia do ok. 10^{-3} hPa. Typowym urządzeniem służącym do jej uzyskiwania jest mechaniczna pompa rotacyjna, zaś typowym przyrządem do jej mierzenia jest próżniomierz termoprzewodnościowy. Obydwu urządzeń będziemy używali w naszym ćwiczeniu. Próżnia średnia bywa nazywana też *próżnią wstępną* z tego powodu, że jej wytworzenie stanowi wstępny etap do wytworzenia próżni wyższych kategorii. Próżnia średnia obejmuje ponad 4 rzędy zmian ciśnienia, niemniej w tym zakresie średnia droga swobodna między zderzeniami molekuł gazu pozostaje mniejsza niż rozmiary elementów układu próżniowego. Charakter przepływu gazu pozostaje taki sam jak przy wyższych ciśnieniach.

Schemat jednego z dwóch układów próżniowych wykorzystywanych w Pracowni przedstawia rysunek 1. W skład układu wchodzi 9 zbiorników, dwa przyrządy do pomiaru próżni (manometr mechaniczny i próżniomierz termoprzewodnościowy) i dwie pompy próżniowe (rotacyjna i dyfuzyjna). Elementy te połączone są przy użyciu rurek szklanych zaopatrzonych w krany. Dla wytworzenia próżni średniej wystarczy uruchomić pompę rotacyjną.



Rys. 1. Schemat układu próżniowego

Próżnia średnia ma stosunkowo niewiele zastosowań. Nawet takie codzienne zastosowania próżni, jak termos do herbaty czy kineskop tradycyjnego telewizora, wymagają użycia *wysokiej próżni* (ciśnienie w zakresie 10^{-3} hPa ÷ 10^{-9} hPa), wytwarzanej za pomocą pracującej szeregowo pompy próżni wstępnej i odpowiedniej pompy wysokopróżniowej. W tym zakresie ciśnień droga swobodna jest z zasady większa od rozmiarów układu – molekuły częściej zderzają się ze ściankami układu niż między sobą – co zmienia jakościowo zachowanie i charakter przepływu gazu w układach wysokopróżniowych. (Granica 10^{-3} hPa między zakresem średniej i wysokiej próżni odpowiada średniej drodze swobodnej ≈ 10 cm). Wysoką próżnię można wytworzyć w naszym układzie (rys. 1), jeżeli uruchomimy, obok pompy rotacyjnej, również pompę dyfuzyjną.

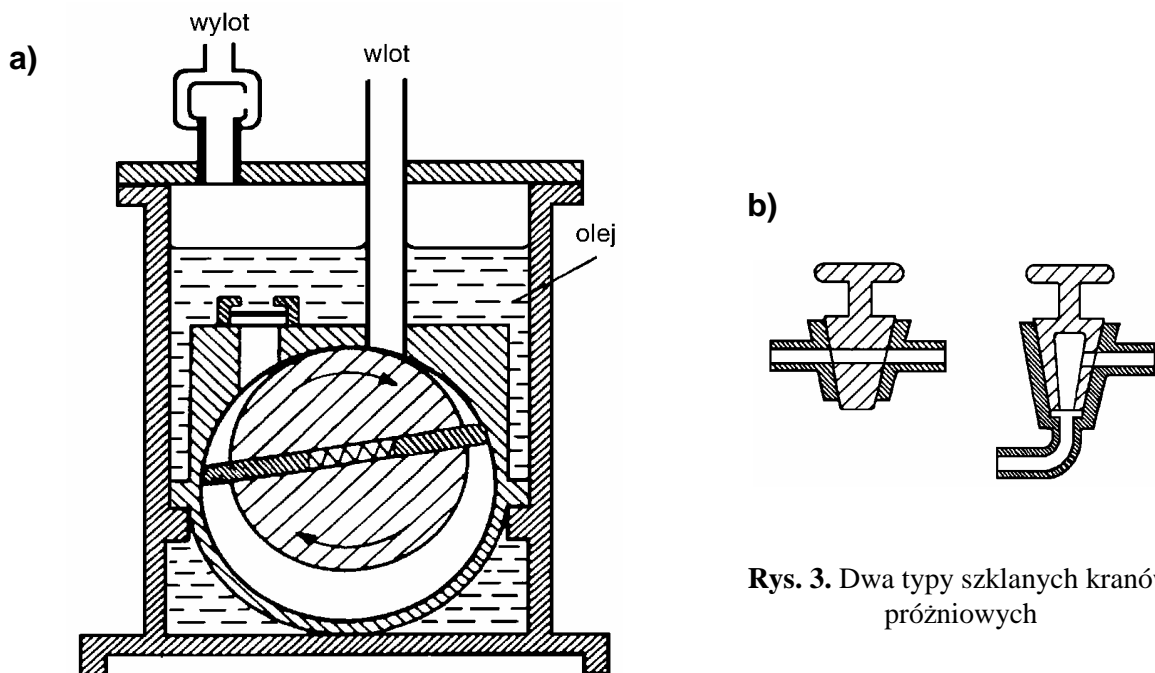
Wyróżnia się ponadto pojęcie ultrawysokiej próżni, potrzebnej w wielu urządzeniach naukowych. Próżnię w tym zakresie uzyskuje się np. w pracowniach naukowych Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w Laboratorium Fizyki Powierzchni i Nanostruktur (kierowanym przez prof. J. Koreckiego) oraz Laboratorium Fotoemisji Elektronowej ARUPS (kierowanym przez prof. A. Kołodziejczyka). W obydwu laboratoriach ultrawysoka próżnia jest niezbędna, by utrzymać czystą powierzchnię ciała stałego przez czas rzędu kilku godzin. W eksperymentach z zakresu ultrawysokiej próżni, obok użycia specjalnych pomp i próżniomierzy, niezbędną operacją jest wygrzewanie powierzchni metalowego układu próżniowego (ok. 200 °C), by usunąć zaabsorbowane na niej cząsteczki. Ultrawysoka próżnia wytwarzana jest też w akceleratorach cząstek, np. w rurze akceleratora LHC.

Niezmiernie niskie ciśnienie 10^{-12} hPa, będące umownym początkiem ekstremalnie wysokiej próżni, odpowiada liczbie cząsteczek gazu około $10^4/\text{cm}^3$. Najwyższa próżnia wytworzona w ziemskim laboratorium odpowiada liczbie $\approx 10^3$ molekuł w cm^3 . To wciąż więcej niż próżnia kosmiczna, rzędu 10 molekuł/ cm^3 w przestrzeni międzyplanetarnej i jeszcze mniej w przestrzeni międzygwiazdowej i międzygalaktycznej.

Elementy układu próżniowego

Przedstawiony na rysunku 1 szklany układ próżniowy wykonano ze szkła „pyrex”. Drugi układ próżniowy wykorzystywany w Pracowni jest podobny, różni się tylko ilością i rozmiarami zbiorników. Do wytworzenia próżni w ćwiczeniu używamy pompy rotacyjnej, do pomiaru ciśnienia – manometru mechanicznego i próżniomierza termoprzewodnościowego.

Pompa rotacyjna jest pompą próżni wstępnej. W najprostszej pompie rotacyjnej (rys. 2) wewnątrz metalowego cylindrycznego statora obraca się umocowany mimośrodowo wirnik, również cylindryczny. Na jego średnicy znajdują się dwa suwaki dociskane sprężynami tak, żeby podczas obrotu ślizgały się po wewnętrznej powierzchni statora. Suwak i powierzchnia statora są smarowane i doszczelniane olejem wprowadzanym specjalnym kanałem.



Rys. 2. Pompa rotacyjna

Rys. 3. Dwa typy szklanych kranów próżniowych

Gdy powietrze dostanie się przez wlot do przestrzeni pomiędzy statorem a wirnikiem, jego objętość powiększa się w trakcie ruchu wirnika aż do chwili, gdy drugi suwak minie ujście przewodu wylotowego, odcinając ją od zbiornika. Przy dalszym ruchu obrotowym wirnika odcięte powietrze jest wypychane przez wylot.

W pracowni używa się pompy rotacyjnej olejowej typu BL 8P o szybkości pompowania $1,9 \text{ dm}^3/\text{s}$ i ciśnieniu końcowym około $2 \cdot 10^{-4} \text{ hPa}$.

Manometr mechaniczny. W manometrze tym badane ciśnienie odkształca element mechaniczny: rurkę stalową lub membranę. Ruch tego elementu przenosi się na wskazówkę manometru. Na skali odczytuje się różnicę Δp między ciśnieniem p w układzie próżniowym i ciśnieniem atmosferycznym p_0 . Dla zakresu podciśnienia wartość Δp jest *ujemna*. Dokładność manometru można przyjąć równą najmniejszej działce skali.

Aby wyznaczyć ciśnienie bezwzględne p , należy dodatkowo odczytać ciśnienie atmosferyczne p_0 przy użyciu barometru meteorologicznego. Stąd wyliczamy

$$p = p_0 + \Delta p . \quad (1)$$

Próżniomierz termoprzewodnościowy. Głowica próżniomierza termoprzewodzącego zawiera grzejnik metalowy rozgrzewany przez przepływ prądu. Ponieważ przewodnictwo cieplne rozrzedzanego gazu maleje, więc ze spadkiem ciśnienia temperatura grzejnika rośnie. Wzrostowi temperatury towarzyszy wzrost oporności grzejnika, mierzony i przetworzony na wartość ciśnienia przez układ elektryczny próżniomierza. (Ten typ próżniomierza termoprzewodnościowego bywa też nazywany próżniomierzem oporowym lub próżniomierzem Piraniego.) Próżniomierze termoprzewodnościowe nadają się do pomiaru ciśnień w zakresie próżni wstępnej rzędu od 1 do 10^{-3} hPa .

Krany próżniowe. Dwa typy szklanych kranów próżniowych przedstawia rysunek 3 (obydwa znajdziemy w naszym układzie). Dla uszczelnienia powierzchni trących kranów zastosowano smar próżniowy „apiezon L”. Aby nie uszkodzić układu próżniowego, ruchomy kurek kranu przekręcamy powoli, podtrzymując drugą ręką nieruchomy korpus kranu.

Sprawdzanie prawa Boyle’a–Mariotte’a

Równanie stanu gazu doskonałego podaje zależność między parametrami stanu gazu: ciśnieniem p , objętością V , i temperaturą T :

$$pV = \frac{m}{\mu} RT . \quad (2)$$

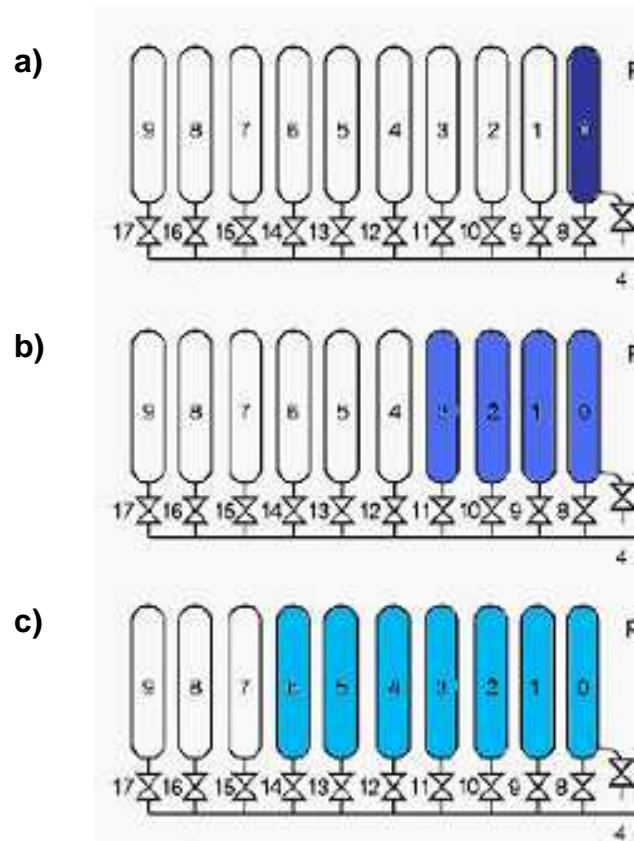
Pozostałe parametry równania (2) to masa gazu m , masa cząsteczkowa μ , oraz uniwersalna stała gazowa R .

Jeżeli masa gazu i temperatura są ustalone, z równania stanu gazu (2) wynika, że ciśnienie gazu jest odwrotnie proporcjonalne do objętości. Jest to prawo Boyle’a–Mariotte’a.

$$p = \frac{\text{const}}{V} . \quad (3)$$

Układ próżniowy ze zmienną objętością (rys. 1) pozwala na sprawdzenie tego prawa dla powietrza w temperaturze pokojowej. Określoną ilość powietrza można wyodrębnić

w zbiorniku „0” (rys. 4a), a następnie rozprężać do opróżnionych z gazu zbiorników 1 ÷ 9 (rys. 4b, c). W eksperymencie mającym na celu sprawdzenie prawa Boyle’a–Mariotte’a mamy do czynienia z zakresem próżni niskiej. Pomiar ciśnienia gazu wykonujemy manometrem mechanicznym. Zgodnie z prawem Boyle’a–Mariotte’a (3) wykres zależności $p(V)$ jest hiperbolą, natomiast zależność $p(1/V)$ – linią prostą, przechodzącą przez początek układu współrzędnych.



Rys. 4. Sprawdzenie prawa Boyle’a-Mariotte’a.