PROGRAM ROZWOJOWY
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Termodynamika 1

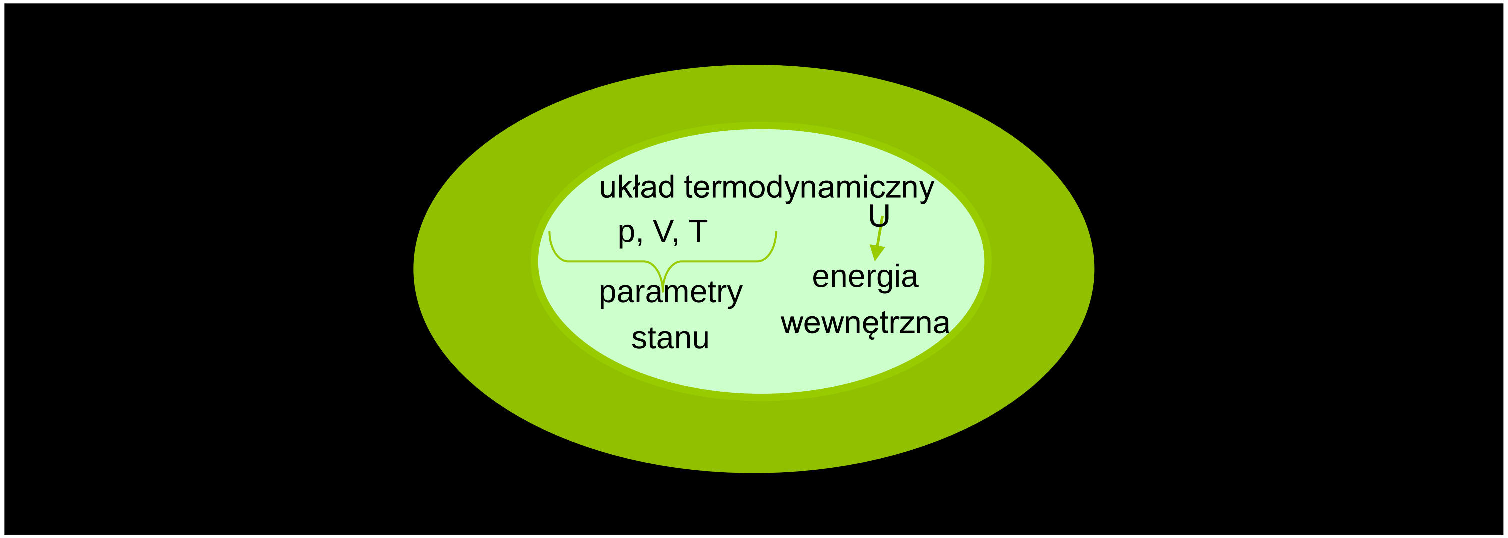
KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Układ termodynamiczny

Układ termodynamiczny – to ciało lub zbiór rozważanych ciał, w którym obok innych zjawisk (mechanicznych, elektrycznych, magnetycznych itd.) uwzględniamy zjawiska cieplne.
Stan układu – charakteryzuje własności układu, określony jest przez wartości **parametrów stanu.**
Stan równowagi – to taki stan układu, w którym parametry stanu mają stałe, określone wartości. W stanie równowagi parametry stanu układu nie zmieniają się o ile nie zmieniają się warunki zewnętrzne, w jakich znajduje się układ.
Suma energii kinetycznych i potencjalnych wszystkich cząsteczek w układzie to jego **energia wewnętrzna.**



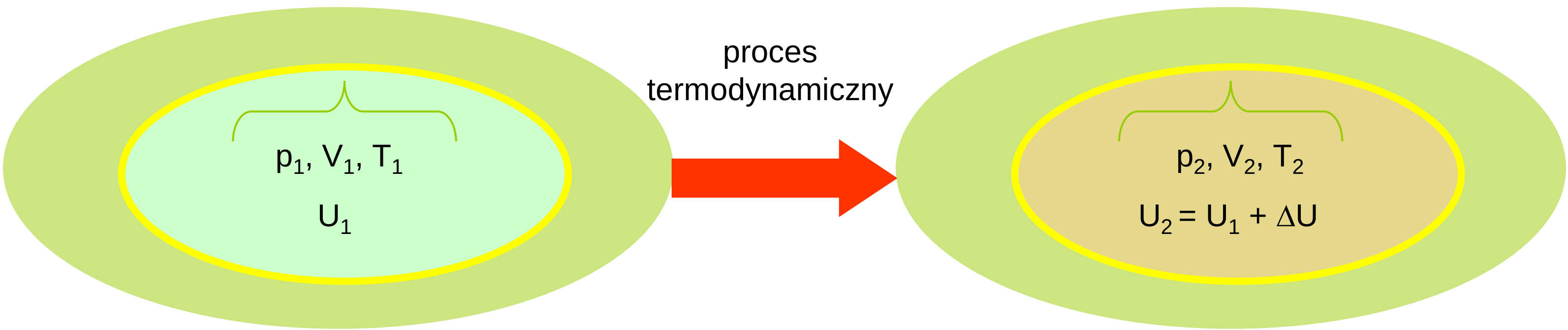
Energia całkowita układu E jest sumą energii: kinetycznej E_k, potencjalnej E_p i wewnętrznej U.

$$E = E_k + E_p + U$$

Proces termodynamiczny

Przemiana albo **proces** to przechodzenie układu z jednego stanu równowagi (stan 1) do drugiego (stan 2). Przejściu układu z jednego stanu równowagi (1) do drugiego (2) może towarzyszyć zmiana energii wewnętrznej.

$$\Delta U = U_2 - U_1$$



stan (1) stan (2)

Energię można przekazywać ciałom w różny sposób. Przekazywanie energii w postaci ciepła nazywamy dostarczaniem ciepła ciału, a w postaci pracy wykonywaniem pracy nad danym ciałem.
Ciepło i pracę mierzymy w tych samych jednostkach. W układzie SI jest to dżul – 1J.

Stany skupienia materii

Ciało stałe - cząsteczki w ciele stałym oddziałują ze sobą i pozostają w stałych położeniach względem siebie. Mogą tylko wykonywać drgania wokół położeń równowagi. Ciało stałe ma więc ustalony kształt, zachowuje sprężystość postaci.

Ciecz - cząsteczki cieczy oddziałują ze znacznie słabiej niż w ciele stałym Mogą poruszać się w dowolnym kierunku, jednak pozostają w zasięgu oddziaływań międzycząsteczkowych. Ciecz ma więc ustaloną objętość, ale nie ma stałego kształtu – przybiera kształt naczynia, w którym się znajduje.

Gaz - cząsteczki gazu są tak daleko od siebie, że nie oddziałują ze sobą poza momentami zderzeń. Gaz nie zachowuje kształtu ani objętości – wypełnia całą objętość naczynia, w którym się znajduje.

Gaz doskonały

Dla charakterystyki gazu doskonałego przyjmujemy, że

1. Gaz składa się z identycznych cząsteczek.
2. Cząsteczki poruszają się chaotycznie i podlegają prawom dynamiki Newtona.
3. Siły działają na cząsteczki tylko w momentach zderzeń.
4. Zderzenia są sprężyste, a czas ich trwania można pominąć.
5. Całkowita liczba cząsteczek jest bardzo duża.
6. Objętość cząsteczek jest zaniedbywalnie mała w porównaniu z objętością gazu.

Parametry charakteryzujące gaz to:

Temperatura *T*, która jest miarą średniej energii kinetycznej cząsteczek gazu

Ciśnienie $p = \frac{F}{S}$ (stosunek siły wywieranej na powierzchnię do tej powierzchni)

Cząsteczki gazu, zderzając się ze ścianką naczynia, działają na nią siłami. Ciśnienie gazu zależy więc od liczby zderzeń (od gęstości) i od energii kinetycznej cząsteczek (od temperatury).

Objętość *V*

Energia wewnętrzna gazu doskonałego to suma energii kinetycznych wszystkich cząsteczek

Energia wewnętrzna gazu doskonałego zależy tylko od liczby cząsteczek (masy gazu) i od temperatury (nie zależy ani od ciśnienia ani od objętości) i nie zmienia się, gdy nie zmienia się temperatura gazu.

I zasada termodynamiki

Energię wewnętrzną można zmienić na dwa sposoby:

Poprzez **ciepło**.
Jest to mikroskopowy sposób przekazu energii – jeśli dwa ciała o różnych temperaturach stykają się, cząsteczki ciał zderzają się ze sobą i następuje przekaz energii od ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze.

Poprzez **pracę**.
Jest to makroskopowy sposób przekazu energii. Przykładem może być sprężanie gazu przez przesuwanie tłoka. Siła zewnętrzna przesuwająca tłok wykonuje pracę, przez co zwiększa się energia wewnętrzna gazu.

I zasada termodynamiki wyraża prawo zachowania energii w układach termodynamicznych:

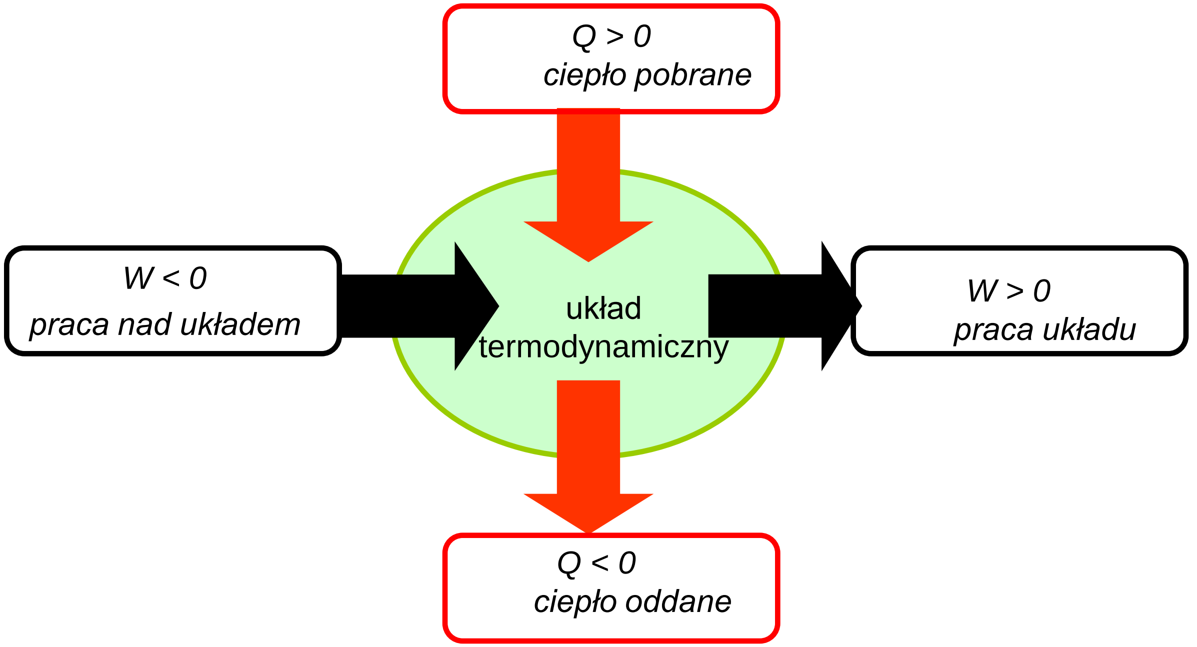
Ciepło *Q* pobrane przez układ termodynamiczny może zostać zużyte na zwiększenie jego energii wewnętrznej i na wykonanie przez układ pracy.

$$Q = \Delta U + W$$

I zasada termodynamiki

I zasadę termodynamiki można też sformułować inaczej:

Niemożliwe jest skonstruowanie silnika, który pracowałby bez pobierania energii z otoczenia. Taki hipotetyczny silnik nazwano perpetuum mobile I-go rodzaju. Niekiedy formułuje się pierwszą zasadę termodynamiki jako niemożliwość skonstruowania perpetuum mobile pierwszego rodzaju.



Bilans cieplny

W izolowanym układzie termodynamicznym ciał o różnych temperaturach obowiązuje zasada bilansu cieplnego.

ciepło pobrane przez ciało o niższej temperaturze

$$Q_{pobrane} = Q_{oddane}$$

ciepło oddane przez ciało o wyższej temperaturze

Dostarczanie ciepła ciału prowadzi do zmiany jego temperatury lub zmiany jego stanu skupienia (przemiany fazowe).

ciepło pobrane (oddane) podczas ogrzewania (ochładzania)

zmiana temperatury

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T = C \cdot n_M \cdot \Delta T$$

ciepło właściwe

masa ciała

ciepło molowe

liczba moli

$$n_M = \frac{m}{M}$$

masa ciała

masa molowa

ciepło pobrane (oddane) podczas zmiany stanu skupienia

ciepło przemiany (topnienia, parowania itd.)

$$Q = c_z \cdot m$$

masa ciała

Równanie stanu gazu doskonałego

Każdy gaz rzeczywisty (rozrzedzony, pod małym ciśnieniem) ma właściwości zbliżone do gazu doskonałego.

Stan danej masy gazu określony jest przez wartości trzech parametrów: ciśnienia *p*, objętości *V* i temperatury *T*, ujętych równaniem stanu. **Równanie stanu** (równanie Clapeyrona) gazu doskonałego ma postać:

$$\boxed{p \cdot V = n_M \cdot R \cdot T}$$

objętość

liczba moli

ciśnienie

$$n_M = \frac{m}{M}$$

masa ciała

masa molowa

$$p \cdot V = n_M \cdot R \cdot T$$

temperatura bezwzględna

$$273\,K \approx 0^0 C$$

$$0\,K \approx -273^0 C$$

uniwersalna stała gazowa

$$R = 8{,}31 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$R = k \cdot N_A$$

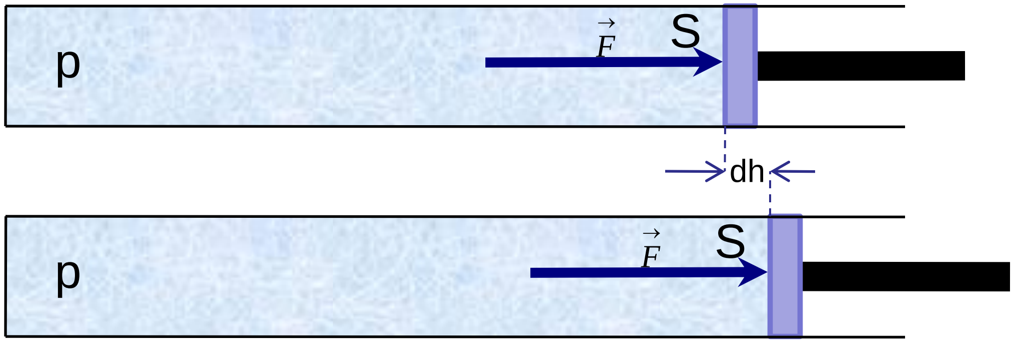
stała Boltzmanna

$$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$$

liczba Avogadro

$$N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23} \frac{1}{mol}$$

Praca w przemianach gazowych



W naczyniu z tłokiem jest gaz pod ciśnieniem p. Gaz naciska na tłok siłą

$$F = p \cdot S$$

gdzie S to powierzchnia tłoka.

Przy niewielkim przesunięciu tłoka o Δx, gaz wykonuje pracę

$$\Delta W = F \cdot \Delta x = p \cdot S \cdot \Delta x = p \cdot \Delta V$$

gdzie ΔV to niewielka zmiana objętości.

Całkowita praca W wykonana przez gaz przy zmianie objętości od V_0 do V_k jest sumą wszystkich prac ΔW wykonanych przy niewielkich zmianach objętości ΔV.

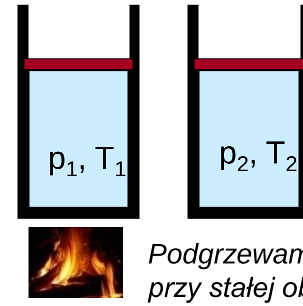
Jeśli objętość gazu rośnie to praca wykonana przez gaz W > 0.
Jeśli objętość gazu maleje to praca wykonana przez gaz W < 0.
Jeśli objętość gazu nie zmienia się to praca wykonana przez gaz W = 0.

Podstawowe przemiany cieplne

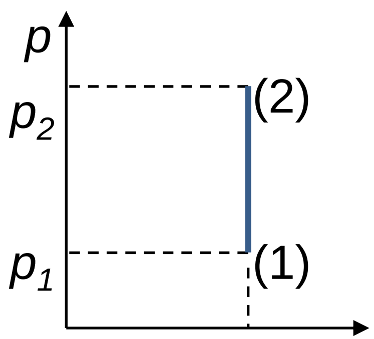
Przemiana izochoryczna – zachodzi, gdy objętość układu pozostaje stała (V = const), czyli $\Delta V = 0$.
Równanie izochory:

$$\boxed{\frac{p}{T} = const}$$

Ciśnienie jest wprost proporcjonalne do temperatury, bo ze wzrostem temperatury wzrasta średnia energia kinetyczna cząsteczek i cząsteczki z większą siłą uderzają w ścianki naczynia.



Podgrzewamy gaz przy stałej objętości



$V = const$

Wykres dla przemiany izochorycznej

W przemianie tej nie jest wykonywana praca, bo $W = p\,\Delta V = 0$, więc zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki,

$$\boxed{Q_V = \Delta U}$$

Energia wewnętrzna danej masy gazu doskonałego zależy tylko od temperatury, dlatego:

$$\boxed{\Delta U = n_M \cdot C_V \cdot \Delta T}$$

$$\boxed{\Delta U = m \cdot c_V \cdot \Delta T}$$

ciepło molowe przy stałej objętości

ciepło właściwe przy stałej objętości

$$\boxed{n_M = \frac{m}{M}}$$

masa ciała

masa molowa

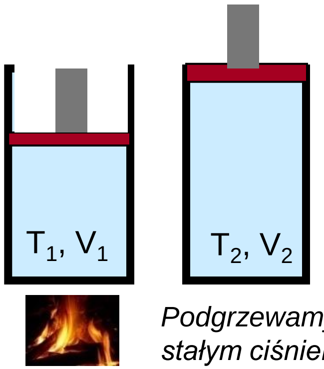
$$C_V = M \cdot c_V$$

Podstawowe przemiany cieplne

Przemiana izobaryczna – zachodzi, gdy ciśnienie w układzie pozostaje stałe (p = const), czyli $\Delta p = 0$.
Równanie izobary:

$$\frac{V}{T} = const$$

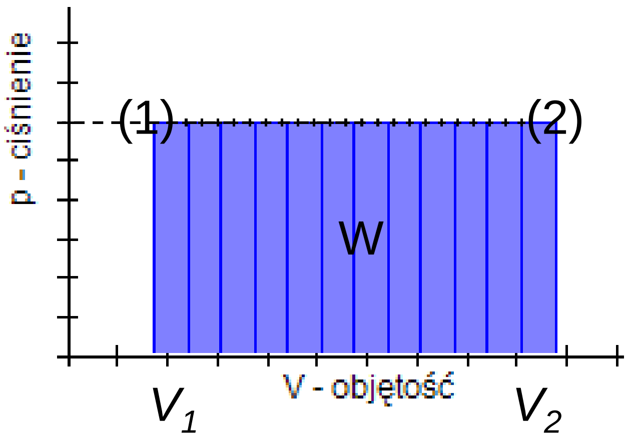
Objętość jest wprost proporcjonalna do temperatury.



Podgrzewamy gaz przy stałym ciśnieniu (tłok obciążony ciężarkiem)

W przemianie tej wykonywana jest praca

$$W = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1)$$



Praca **W** równa jest polu prostokąta o bokach:
p oraz $(V_2 - V_1)$.

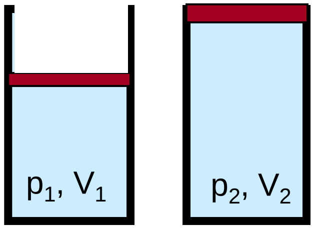
Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki

$$Q_p = \Delta U + W$$

$$n_M \cdot C_p \cdot \Delta T = n_M \cdot C_V \cdot \Delta T + p \cdot \Delta V$$

ciepło molowe przy stałym ciśnieniu

Podstawowe przemiany cieplne



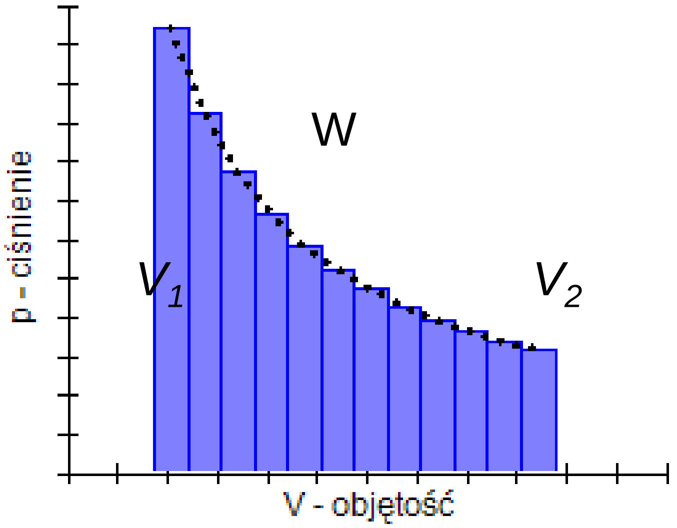
Gaz rozprężamy tak wolno, aby temperatura mogła wyrównać się z temperaturą otoczenia.

Przemiana izotermiczna – to proces, w którym temperatura układu pozostaje stała (T = const), czyli $\Delta T = 0$.

Równanie izotermy :

$$\boxed{p \cdot V = const}$$

Ciśnienie jest odwrotnie proporcjonalne do objętości, bo ze wzrostem objętości zmniejsza się gęstość gazu i cząsteczki rzadziej zderzają się ze ściankami naczynia.



Praca ***W*** jest sumą prac ΔW przy niewielkich zmianach objętości ΔV.

W przemianie tej wykonywana jest praca

$$W = n_M \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki energia wewnętrzna nie zmienia się, więc

$$Q_T = \Delta U + W = W$$

Wymianie ciepła towarzyszy wykonanie pracy

$$Q_T = W$$

Podstawowe przemiany cieplne

Przemiana adiabatyczna – to proces, w którym nie zachodzi wymiana ciepła z otoczeniem. Podczas sprężania gazu wzrasta zarówno temperatura jak i ciśnienie gazu.

Równanie adiabaty:

$$\boxed{p \cdot V^{\kappa} = const}$$

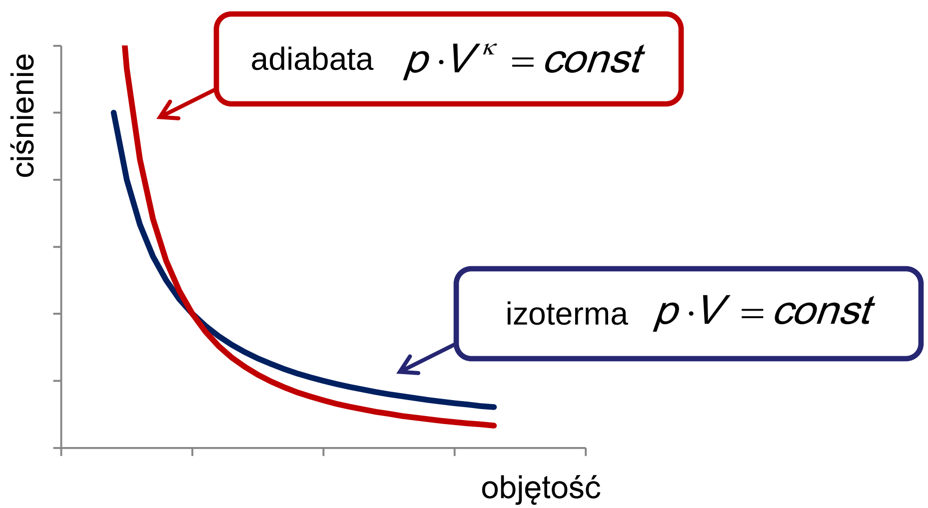
gdzie $\kappa = \dfrac{C_p}{C_V}$

C_p - ciepło molowe prze stałym ciśnieniu,
C_V - ciepło molowe prze stałej objętości.

$C_p > C_V \Rightarrow \kappa > 1$

Podczas adiabatycznego sprężania gazu ciśnienie rośnie szybciej niż w przemianie izotermicznej. Wzrost ciśnienia spowodowany jest dwoma czynnikami:

1. *Zwiększa się liczba zderzeń cząsteczek ze ściankami (tak, jak w przemianie izotermicznej)*
2. *Zwiększa się temperatura, a więc cząsteczki poruszają się średnio w większymi energiami i zwiększa się średnia siła wywierana przy zderzeniu.*



Jeśli skorzystamy z równania Clapeyrona:

$$p \cdot V^{\kappa} = pV \cdot V^{\kappa-1} = nRT \cdot V^{\kappa-1} = const$$

czyli:

$$\boxed{T \cdot V^{\kappa-1} = const}$$

Przykłady

Zadanie 1
Porcja gazu doskonałego o parametrach początkowych p_0, V_0 poddana została przemianie izotermicznej. Objętość gazu wzrosła czterokrotnie. Jak zmieniło się ciśnienie tej porcji gazu?

$$p_0V_0 = p_kV_k \qquad p_0V_0 = p_k 4V_0 \qquad p_k = \frac{1}{4}p_0$$

Zadanie 2
Połączono dwa zbiorniki zawierające ten sam gaz. Pierwszy zbiornik: objętość V_1, ciśnienie gazu p_1. Drugi zbiornik: objętość V_2, ciśnienie p_2. Oblicz ciśnienie gazu po połączeniu zbiorników z gazem.

przed połączeniem zbiorników $\quad p_1 \cdot V_1 = n_1 \cdot R \cdot T \qquad p_2 \cdot V_2 = n_2 \cdot R \cdot T$

po połączeniu zbiorników $\quad p_k(V_1 + V_2) = (n_1 + n_2)R \cdot T$

więc $\quad p_k = \dfrac{p_1V_1 + p_2V_2}{V_1 + V_2}$

Zadanie 3
Jeden mol gazu doskonałego poddano przemianie izobarycznej. Temperatura początkowa wynosiła T_0, a końcowa T_k. Stała gazowa wynosi R. Oblicz wykonaną pracę.
Dla przemiany izobarycznej

$$C_V \cdot (T_k - T_0) = C_p \cdot (T_k - T_0) - W \qquad C_p - C_V = R$$

więc $\quad W = R(T_k - T_0)$

Przykłady

Zadanie 4

O ile większe jest ciepło molowe przy stałym ciśnieniu C_p od ciepła molowego przy stałej objętości C_V?

Rozwiązanie

Ciepło molowe to ciepło potrzebne, aby 1 mol gazu ogrzać o 1K. W przemianie izobarycznej potrzeba na to więcej ciepła niż w przemianie izochorycznej, bo oprócz zwiększenia energii wewnętrznej, gaz wykonuje pracę, rozprężając się.

w przemianie izochorycznej:

$$C_V = \Delta U$$

Zmiana energii wewnętrznej 1 mola gazu przy wzroście temp. o 1 K

w przemianie izobarycznej:

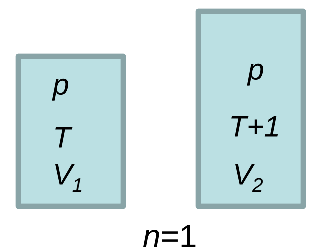
$$C_p = \Delta U + W$$

Zmiana energii wewnętrznej 1 mola gazu przy wzroście temp. o 1 K

Praca wykonana przez gaz

$$C_p - C_V = W$$

Trzeba obliczyć pracę wykonaną przez 1 mol gazu podczas izobarycznego ogrzewania o 1K.



$$W = p \cdot \Delta V = p(V_2 - V_1)$$

V_2 obliczamy z równania dla przemiany izobarycznej…

$$\frac{V_1}{T} = \frac{V_2}{T+1} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1(T+1)}{T}$$

…i wstawiamy do wzoru na pracę:

$$W = p\left(\frac{V_1(T+1)}{T} - V_1\right) = pV_1\frac{T+1-T}{T} = \frac{pV_1}{T} = R$$

Otrzymaliśmy związek między C_p i C_V (zwany równaniem Mayera)

$$\boxed{C_p - C_V = R}$$

Przykłady

Zadanie 5
Jaką objętość zajmuje jeden mol gazu doskonałego przy ciśnieniu p_0 = 101325 Pa i temperaturze $t_0 = 0^0$ C?

$$V_0 = \frac{n \cdot R \cdot T_0}{p_0} = \frac{1 \cdot 8{,}31 \cdot 273{,}15}{101325}\left[\frac{mol \cdot J}{mol \cdot K} \cdot \frac{K \cdot m^2}{N}\right] = 22{,}4 \cdot 10^{-3}\ m^3$$

Zadanie 6
Porcja gazu doskonałego o parametrach początkowych p_0, V_0, T_0 poddana została przemianie w wyniku, czego objętość wzrosła czterokrotnie, a ciśnienie zmalało dwukrotnie. Jak zmieniła się temperatura tej porcji gazu?

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_k V_k}{T_k} \qquad V_k = 4V_0 \qquad p_k = \frac{p_0}{2} \qquad \text{więc} \qquad T_k = 2T_0$$

Zadanie 7
Podgrzano gaz doskonały w zamkniętym naczyniu dostarczając ciepło *Q*. Jak zmieniła się przy tym energia wewnętrzna gazu?

Gaz podgrzano w zamkniętym naczyniu, więc objętość gazu nie zmieniła się. W procesie izochorycznym gaz nie wykonuje pracy to znaczy, że W = 0. Całe pobrane ciepło poszło na zwiększenie energii wewnętrznej.

$$\Delta U = Q$$

Przykłady

Zadanie 8

Do jednego litra wody o temperaturze 20^{0}C dolewamy jeden litr wody o temperaturze 100^{0}C. Temperatura zmieszanej wody wynosi 60^{0}C. Oblicz ile ciepła pobrała woda zimna oraz ile ciepła oddała woda gorąca.

Znane są dla wody wartości: gęstość $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$, ciepło właściwe $c_w = 4190 \frac{J}{kg \cdot K}$

Masa wody $m = \rho \cdot V$ $t_1 = 20^0 C$ $t_2 = 100^0 C$ $t_3 = 60^0 C$

$T_1 = 20^0 C + 273\,K$ $T_2 = 100^0 C + 273\,K$ $T_3 = 60^0 C + 273\,K$

Uwaga: $\Delta T[K] = \Delta t[^0 C]$

$$Q_{pobrane} = m \cdot c_w \cdot (T_3 - T_1)$$
$$Q_{oddane} = m \cdot c_w \cdot (T_2 - T_3)$$

$$Q_{pobrane} = Q_{oddane} = 167{,}6\,kJ$$

Zadanie 9

Do naczynia ze śniegiem o temperaturze 0^{0}C wlewamy 0,5 kg gorącej wody o temperaturze 100^{0}C. Oblicz masę stopionego śniegu. Ciepło właściwe wody $c_w = 4190 \frac{J}{kg \cdot K}$ i ciepło topnienia lodu (śniegu) $c_t = 334 \cdot 10^3 \frac{J}{kg}$

Ciepło potrzebne do stopienia masy m_x lodu (i śniegu) $Q = m_x \cdot c_t$

Ciepło pobrane przez śnieg $Q = m \cdot c_w \cdot (t_2 - t_1)$

Stąd $$m_x = \frac{m \cdot c_w \cdot (t_2 - t_1)}{c_t}$$ $$m_x = 0{,}63\,kg$$

Przykłady

Zadanie 10
Z dna morza na głębokości 1 km wydzielił się bąbelek gazu o promieniu 1mm . Jaki promień będzie miał bąbelek, kiedy dotrze do powierzchni wody. Temperatura wody na dnie wynosi 4°C a temperatura na powierzchni t_2 = 20°C, ciśnienie atmosferyczne wynosi p_2 = 1000 hPa, gęstość wody przyjąć 1000kg/m^3

Korzystamy z równania gazu doskonałego: $pV = nRT$

Ciśnienie na dnie: $p_1 = \rho_w gh + p_2$ Objętość bąbelka na dnie: $V_1 = \frac{4}{3}\pi r_1^3$

Równanie Clapeyrona na dnie: $(\rho_w gh + p_2)\frac{4}{3}\pi r_1^3 = nRT_1$

Równanie Clapeyrona na powierzchni: $p_2 \frac{4}{3}\pi r_2^3 = nRT_2$

Powyższe równania tworzą układ równań z dwiema niewiadomymi: n oraz r_2 . Po przekształceniu otrzymujemy:

$$r_2 = \sqrt[3]{\frac{(\rho_w gh + p_2) r_1^3 T_2}{p_2 T_1}}$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymujemy:

$$r_2 \cong 5mm$$

Należy pamiętać, żeby temperaturę wstawić w kelwinach a także o pozostałych jednostkach!

Przykłady

Zadanie 11

Pewien gaz doskonały rozpręża się izotermicznie od ciśnienia p_1 = 10 Pa i objętości V_1 = 2 m^3 do objętości V_2 = 8 m^3. Ile razy mniejsze ciśnienie miałby ten gaz, gdyby rozprężał się adiabatycznie? Dla tego gazu współczynnik κ = 3/2.

W przemianie izotermicznej: $pV = const$

czyli: $$p_1V_1 = p_2V_2 \qquad (1)$$

W przemianie adiabatycznej spełniona jest zależność:

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

czyli: $$p_1V_1^{\kappa} = p_3V_2^{\kappa} \Rightarrow p_1V_1V_1^{\kappa-1} = p_3V_2V_2^{\kappa-1} \qquad (2)$$

Z równania (1) wstawiamy p_1V_1 do równania (2):

$$p_2V_2V_1^{\kappa-1} = p_3V_2V_2^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{p_2}{p_3} = \frac{V_2^{\kappa-1}}{V_1^{\kappa-1}}$$

$$\frac{p_2}{p_3} = 2$$

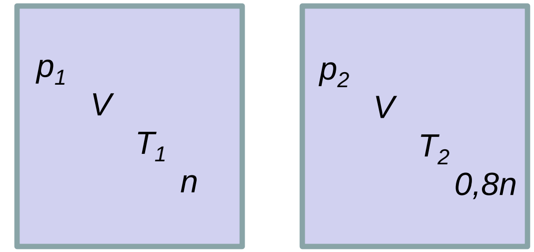
Odp.: Gdyby gaz rozprężał się adiabatycznie miałby 2 razy mniejsze ciśnienie.

Przykłady

Zadanie 12

W pojemniku znajduje się gaz doskonały o temperaturze T_1 i ciśnieniu p_1. Z pojemnika wypuszczono 20% masy gazu na skutek czego temperatura obniżyła się do T_2. Jakie było końcowe ciśnienie gazu w pojemniku?

Oznaczmy objętość pojemnika przez V i początkową liczbę moli przez n.
Równanie Clapeyrona w stanie początkowym:



Stan początkowy   Stan końcowy

$$\frac{p_1 V}{T_1} = nR \qquad (1)$$

Równanie Clapeyrona w stanie końcowym:

$$\frac{p_2 V}{T_2} = 0{,}8nR \qquad (2)$$

Liczba moli zmniejszyła się o 20% i wynosi teraz 0,8 początkowej liczby moli n

Dzielimy stronami równanie (2) przez (1): $\frac{p_2 V T_1}{T_2 p_1 V} = 0{,}8 \rightarrow p_2 = \frac{0{,}8 p_1 T_2}{T_1}$

Odp. Ciśnienie końcowe wynosi $p_2 = \frac{0{,}8 p_1 T_2}{T_1}$

Zadania do samodzielnego rozwiązania.

1. Ogrzano powietrze w balonie w wyniku czego jego objętość oraz ciśnienie zwiększyły się półtora raza. Oblicz zmianę temperatury powietrza, jeśli temperatura początkowa wynosiła -3^{0}C.

   Odp.: Temperatura końcowa wynosi 334,5^{0}C

2. Pewna masa gazu zajmuje objętość V_1 przy temperaturze T_1. Oblicz temperaturę T_2 połowy tej masy gazu przy objętości V_2 i przy tym samym ciśnieniu.

   Odp.: $T_2 = \frac{2V_2T_1}{V_1}$

3. Gęstość azotu przy temperaturze T wynosi ρ. Jakie ciśnienie p wywiera azot na ścianki naczynia?

   Odp.: $p = \frac{\rho RT}{\mu}, \quad \mu = 28g$

4. Oblicz, ile śniegu o temperaturze 0^{0}C może stopić jeden kilogram pary wodnej o temperaturze 100^{0}C.

   Ciepło topnienia lodu $c_t = 334 \cdot 10^3 \frac{J}{kg}$ Ciepło skraplania pary $c_s = 2260 \cdot 10^3 \cdot \frac{J}{kg}$

   Ciepło właściwe wody $c_w = 4190 \frac{J}{kg \cdot K}$

   Odp.: 8 kg

5. Jaką pracę trzeba wykonać aby stopić przez tarcie 1kg lodu o temperaturze 0^{0}C?

   Ciepło topnienia lodu $c_t = 334 \cdot 10^3 \frac{J}{kg}$

6. W zbiorniku znajduje się sprężony gaz doskonały o temperaturze t_1 i ciśnieniu $p_1 = 4{,}4 \cdot 10^5$ N/m^2. Zbiornik ma zawór bezpieczeństwa otwierający się przy ciśnieniu $p_2 = 5 \cdot 10^5$ N/m^2. Wzrost temperatury do wartości $t_2 = 27^0C$ spowodował, że ze zbiornika wyszło x=0,01 masy gazu. Obliczyć temperaturę początkową t_1.

   Odp.: t_1=-13^0C

7. Aby zrobić koktajl czekoladowy należy zmieszać 0,6 kg lodów czekoladowych oraz 0,3 kg mleka. Jaką temperaturę powinno mieć mleko, aby koktajl w 1/3 składał się z lodu a w 2/3 z cieczy? Temperatura początkowa lodów wynosi 0°C, przyjąć ciepło topnienia lodów $c_t = 334 \cdot 10^3 \ \frac{J}{kg}$, ciepło właściwe mleka $c_m = 4000 \ \frac{J}{kg \cdot K}$

Odp.: t = 83,5°C

8. Podgrzano gaz, znajdujący się w naczyniu zamkniętym ruchomym tłokiem, w wyniku czego jego objętość wzrosła trzykrotnie przy stałym ciśnieniu. Jak zmieniła się temperatura gazu?

Odp.: $T_2 = 3\ T_1$

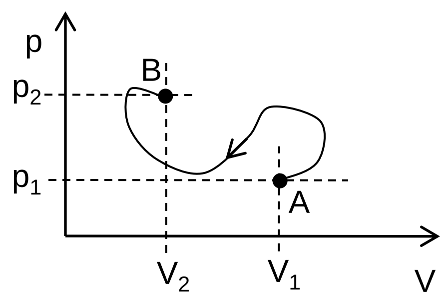
9. W wyniku przemiany izobarycznej gaz doskonały o temperaturze początkowej T_1 i objętości $V_1 = 3\ m^3$ zwiększył swoją objętość do $V_2 = 24\ m^3$. Jak zmieniła się temperatura tego gazu? Jak zmieniłaby się temperatura gazu gdyby zmiana objętości nastąpiła w wyniku przemiany adiabatycznej? Współczynnik $\kappa = 4/3$.

Odp.: $T_2 = 8T_1$, $T_3 = ½\ T_1$

10. Chłodnym rankiem (temperatura T_0 =10°C) w dniu wyścigu kolarz pompuje koła od roweru. Do jakiego ciśnienia powinien je napompować aby w czasie wyścigu, kiedy temperatura wzrośnie do T = 25°C ciśnienie w oponach wynosiło p = 400 kPa?

Odp.: $p_0 = 380\ kPa$

11. Na wykresie p(V) przedstawiono przemianę gazową. Jaką temperaturę ma gaz w punkcie B jeśli w punkcie A temperatura wynosi T_A?



Odp.: $T_B = \frac{T_A p_2 V_2}{p_1 V_1}$