



TERMODYNAMIKA

Wprowadzenie

Termodynamika

Termodynamika – nauka o energii, dział fizyki zajmujący się badaniem energetycznych efektów wszelkich przemian fizycznych i chemicznych, które wpływają na zmiany energii analizowanych układów.

Termodynamika klasyczna, nazywana też fenomenologiczną, zajmuje się makroskopowymi, równowagowymi zjawiskami termodynamicznymi w oparciu o pewne aksjomaty poparte doświadczeniami.

aeolipila Herona (140 p.n.e.)

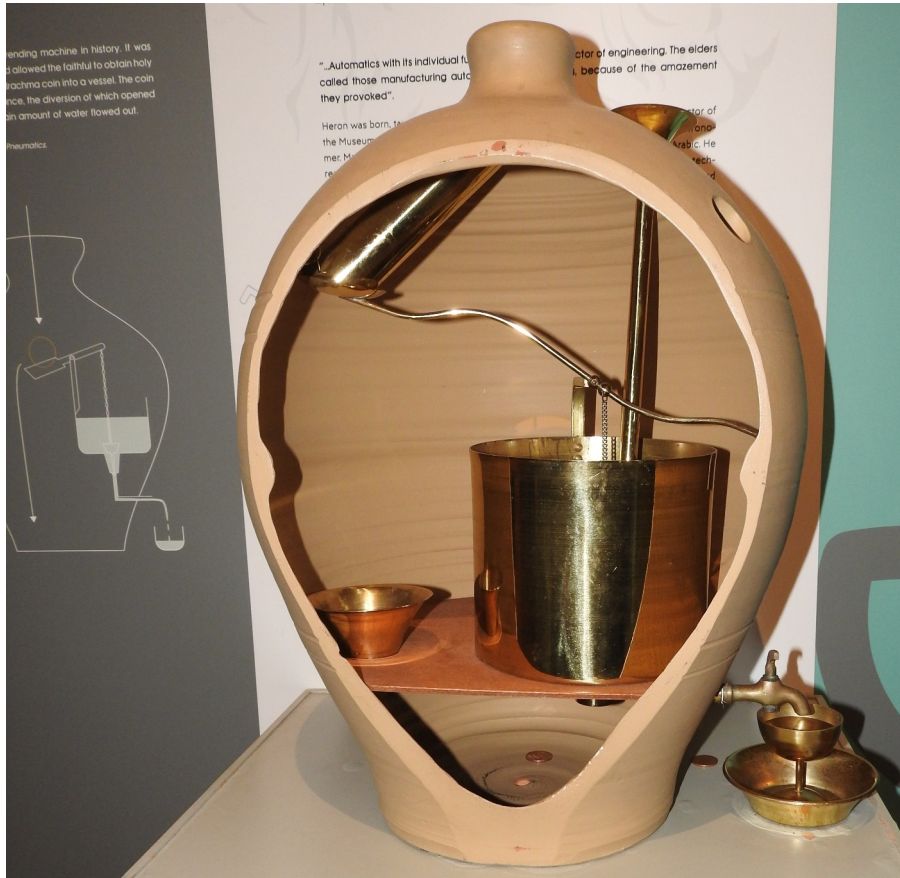


Termodynamika



współczesna replika bani Herona

Termodynamika



przykłady starożytnej techniki
- automaty do wydawania napojów



Termodynamika

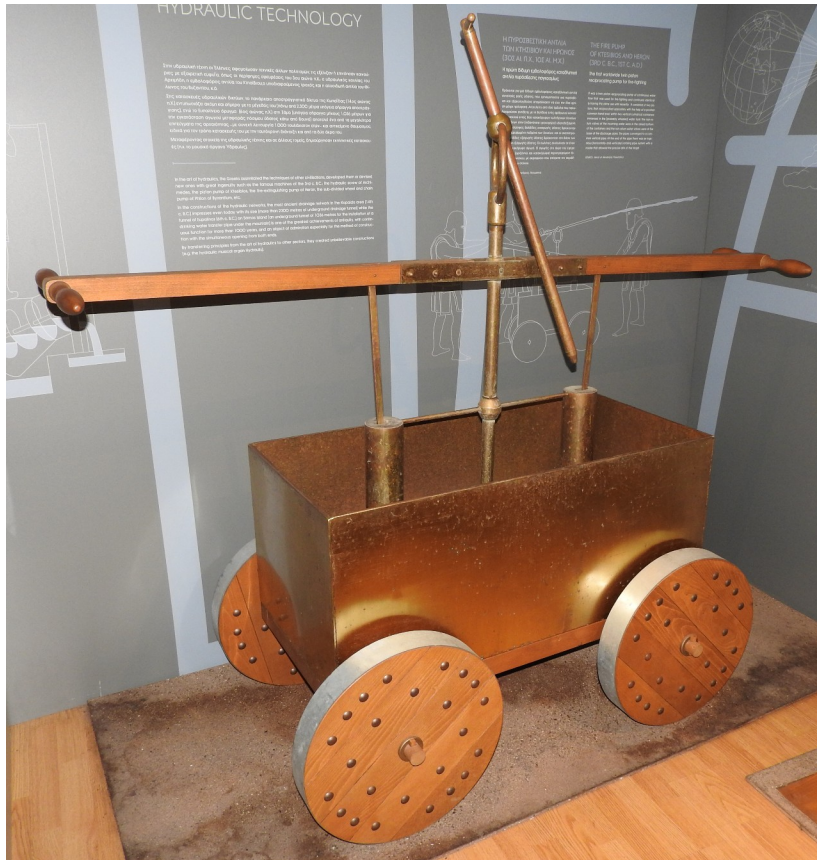


przykłady starożytnej
techniki – „minutnik”

przykłady starożytnej
techniki – alarm do drzwi



Termodynamika



przykłady starożytnej
techniki – pompa strażacka



przykłady starożytnej
techniki – śruba Archimedes
(wynałazek z Babilonii)

Termodynamika

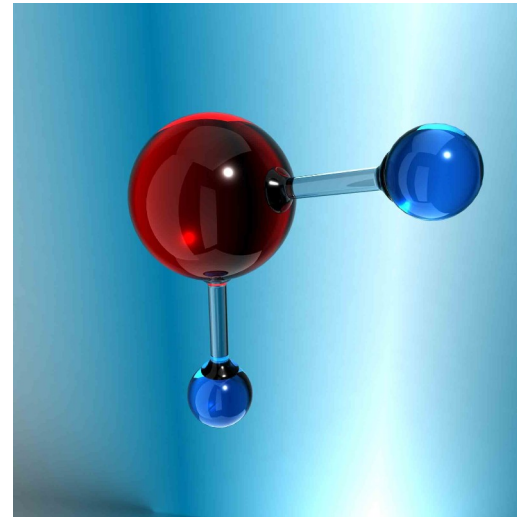


przykłady starożytnej techniki – system zdalnej komunikacji (jeden z kilku)

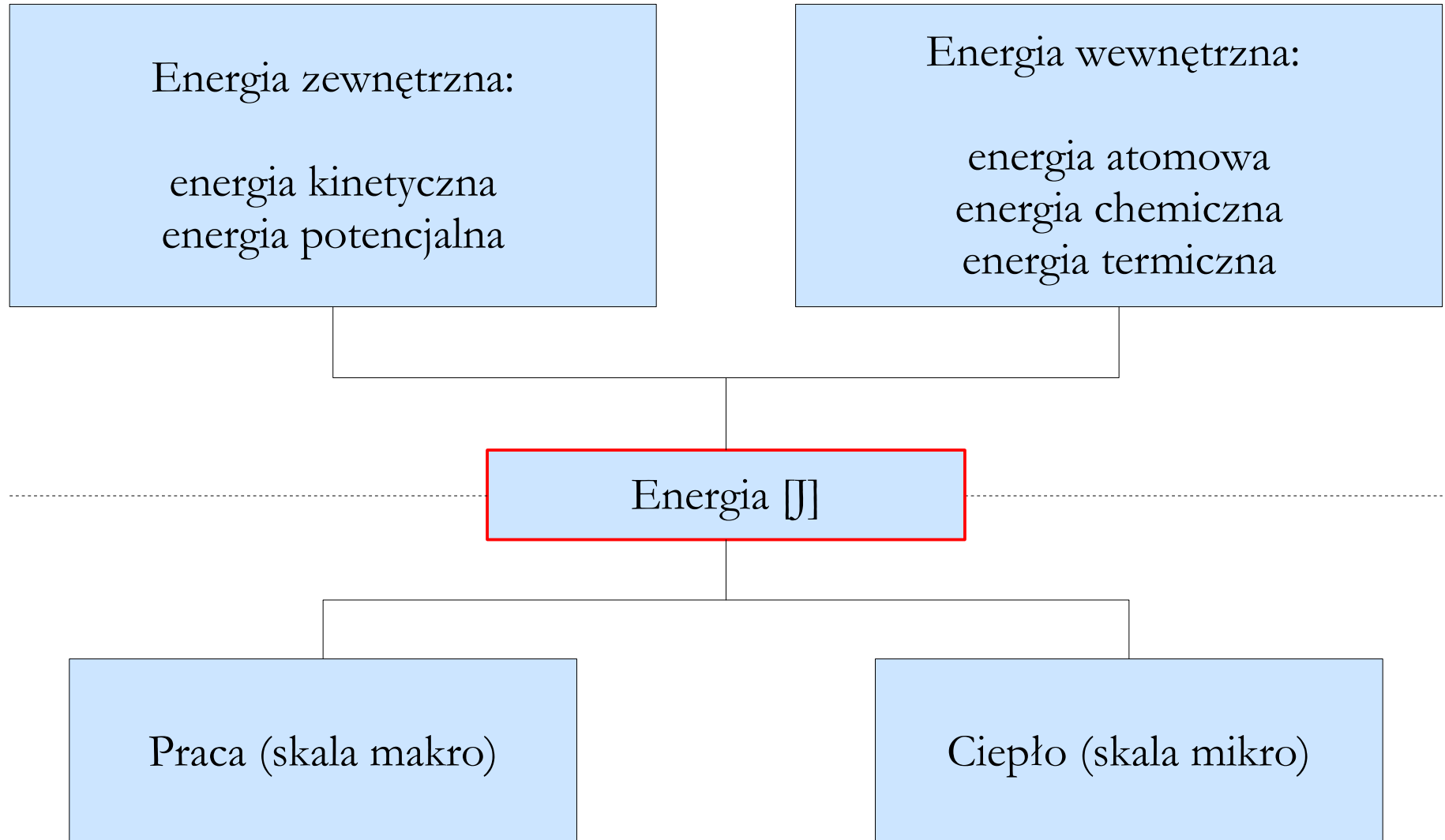
Skale obserwacji i analizy zjawisk

Ujęcie makroskopowe (skala makro) – obserwacja lub analiza materii bez wnikania w jej strukturę atomową lub cząsteczkową; operuje parametrami globalnymi, uśrednionymi w przestrzeni i czasie.

Ujęcie mikroskopowe (skala mikro) – obserwacja lub analiza materii na poziomie atomowym lub cząsteczkowym; operuje parametrami lokalnymi, odnoszącymi się do najmniejszych składników tej materii.

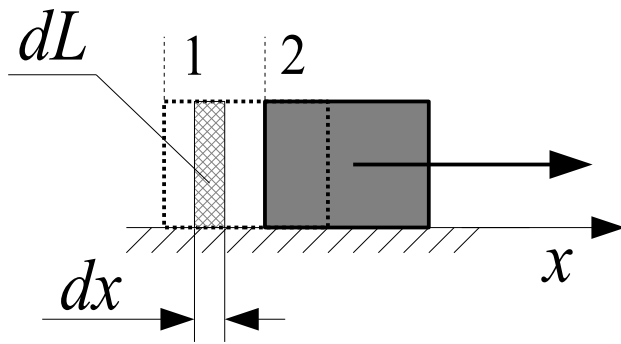


Rodzaje energii



Jednostka energii

Dżul – jednostka pracy, energii oraz ciepła w układzie SI, oznaczana symbolem [J]. Jeden dżul to praca wykonana przez siłę o wartości 1 [N] przy przesunięciu punktu przyłożenia siły o 1 [m] w kierunku równoległym do kierunku działania siły.



Praca = siła \times przesunięcie

$$dL = F \cdot dx$$

$$[N \cdot m] = [J]$$

$$L_{1-2} = \int_{x_1}^{x_2} F dx$$

UWAGA: taką samą jednostkę [Nm] posiada moment siły – niutonometr. Problem wynika stąd, że praca definiowana jest jako **iloczyn skalarny siły i przemieszczenia**, natomiast moment siły to **iloczyn wektorowy siły i ramienia**. Nie należy mylić tych jednostek.

Jednostka energii

Kaloria – dawniej: ilość ciepła potrzebna do podgrzania, pod ciśnieniem 1 atmosfery, 1 [g] czystej chemicznie wody o 1 [°C] od temperatury 14.5 do 15.5 [°C].

$$1 \text{ [cal]} = 4.1855 \text{ [J]}$$

W 1929 roku wprowadzono kalorię międzynarodową (obecnie używany w fizyce przelicznik):

$$1 \text{ [cal]} = 4.1868 \text{ [J]}$$

UWAGA: w dietetyce wartości kaloryczne produktów żywnościowych są często podawane nie w kaloriach, ale w kilokaloriach, mino, że w nazwie przedrostek „kilo” nie występuje.

Grupy ludności	Ogółem [kcal]
Dzieci 1-3 lat	1300
Dzieci 4-6 lat	1700
Dzieci 7-9 lat	2100
Chłopcy 10-12 lat	2600
Dziewczeta 10-12 lat	2300
Młodzież męska 13-15 lat	3000-3300
Młodzież męska 16-20 lat	3200-3700
Młodzież żeńska 13-15 lat	2600-2800
Młodzież żeńska 16-20 lat	2500-2700
Mężczyźni 21-64 lat praca lekka	2400-2600
Mężczyźni 21-64 lat praca umiarkowana	2800-3200
Mężczyźni 21-64 lat praca ciężka	3500-4000
Mężczyźni 21-64 lat praca bardzo ciężka	4000-4500
Kobiety 21-59 lat praca lekka	2100-2300
Kobiety 21-59 lat praca umiarkowana	2400-2800
Kobiety 21-59 lat praca ciężka	2900-3200
Kobiety ciężarne (II połowa ciąży)	2800
Kobiety karmiące	3400
Mężczyźni 65-75 lat	2300
Mężczyźni powyżej 75 lat	2100
Kobiety 60-75 lat	2200
Kobiety powyżej 75 lat	2000

Jednostka mocy

Wat – jednostka mocy lub strumienia energii w układzie SI (jednostka pochodna układu SI), oznaczana symbolem [W].

$$[W] = \left[\frac{J}{s} \right] = \left[\frac{N \cdot m}{s} \right] = \left[\frac{\frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot m}{s} \right] = \left[\frac{kg \cdot m^2}{s^3} \right]$$



Ciepło potrzebne do zagotowania wody [J] = moc czajnika [W] × czas [s]

$$[J] = [W \cdot s]$$

Sposoby wymiany energii

Sposoby doprowadzania i wyprowadzania energii:

- praca (np. pompka)
- ciepło (np. grill)
- energia niesiona ze strugą substancji (np. grzejnik)
- prąd elektryczny (np. czajnik elektryczny)



Energia potencjalna

Energia potencjalna¹ – energia równa pracy, jaką należy wykonać, aby podnieść ciało z poziomu zerowego (względem przyjętego układu współrzędnych) na określoną wysokość.

$$E_p = m \cdot g \cdot z$$

Energia potencjalna całkowita E_p [J]

Energia potencjalna jednostkowa $e_p = \frac{E_p}{m}$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$



¹⁾ Mowa tu tylko o energii potencjalnej grawitacyjnej.

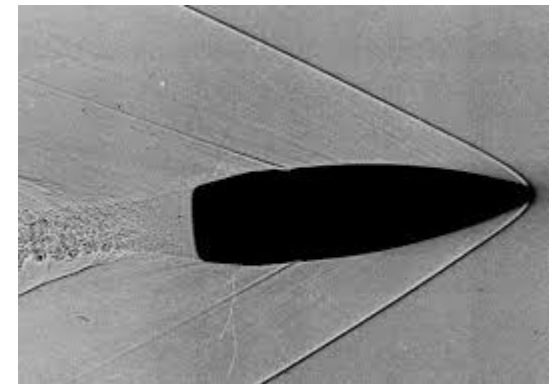
Energia kinetyczna

Energia kinetyczna – energia równa pracy jaką należy wykonać, by ciało o niezerowej masie nadać określoną prędkość liniową lub kątową (względem przyjętego układu odniesienia).

$$E_k = \frac{m \cdot c^2}{2} \quad E_k = \frac{I \cdot \omega^2}{2}$$

Energia kinetyczna całkowita E_k [J]

Energia kinetyczna jednostkowa $e_k = \frac{E_k}{m}$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$

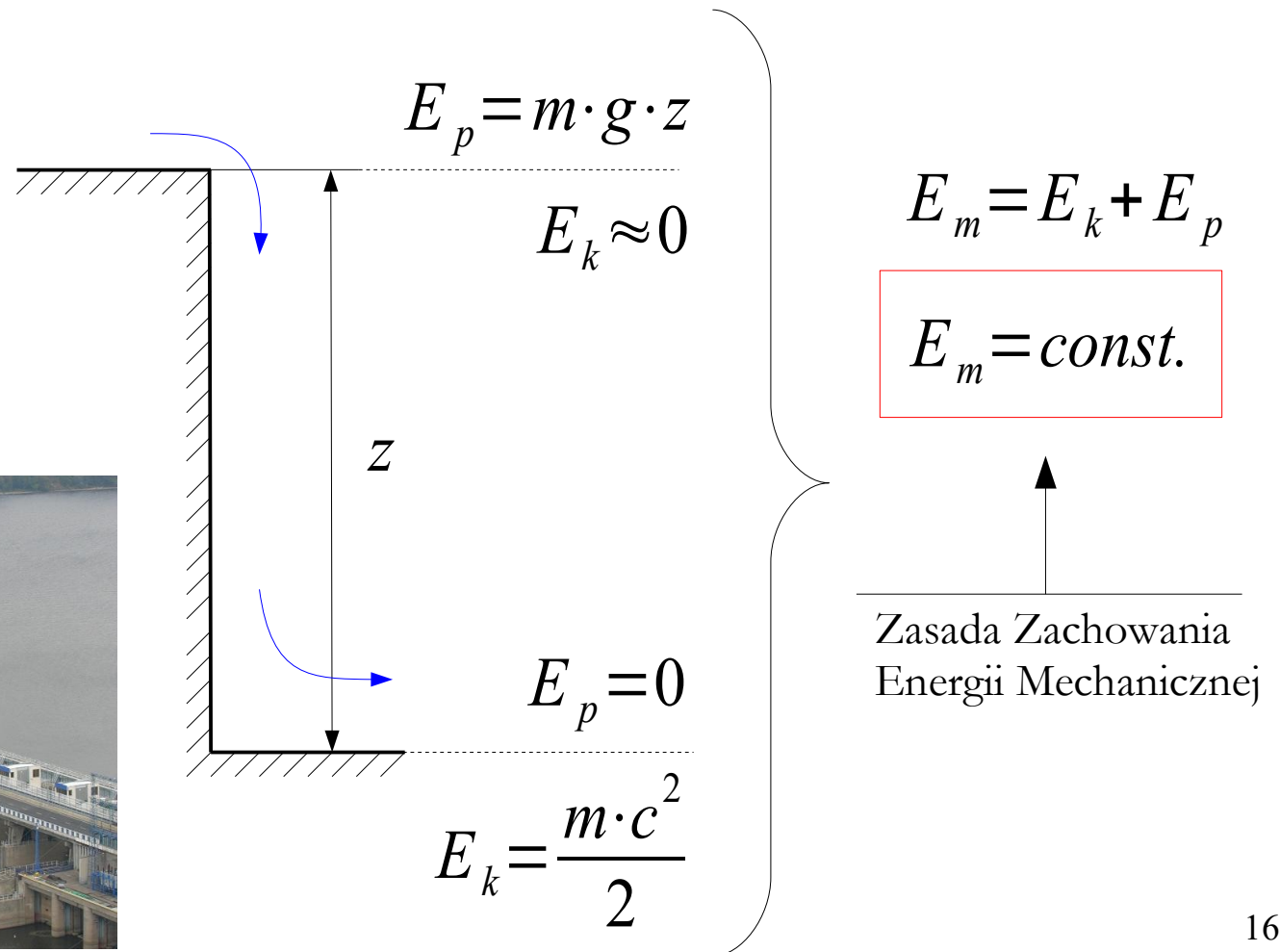


Stosuje się tu symbol c (a nie klasyczny v), ze względu na dalszy konflikt z oznaczeniem objętości właściwej

Energia mechaniczna

Energia mechaniczna – suma energii kinetycznej i potencjalnej.

zaporą wodną we Włocławku



Energia wewnętrzna

Energia wewnętrzna – całkowita energia układu będącą sumą energii kinetycznych (ruchu postępowego, obrotowego oraz drgań) wszystkich cząsteczek, z których zbudowane jest ciało, i energii potencjalnych związanych z wzajemnego oddziaływania tych cząsteczek. Do energii wewnętrznej nie wlicza się energii kinetycznej układu jako całości oraz jego energii potencjalnej w polu sił.

Istnienie energii wewnętrznej wynika z I Zasady Termodynamiki.

Energia wewnętrzna całkowita U [J]

Energia wewnętrzna jednostkowa $u = \frac{U}{m}$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$

Energia termiczna (cieplna)

Energia termiczna (cieplna) – część energii wewnętrznej, która jest związana z chaotycznym ruchem cząsteczek układu. Miarą energii termicznej jest temperatura. Składowe energii termicznej cząstki wieloatomowej: energia ruchu postępowego, obrotowego oraz energia drgań wewnętrznych (zmiana odległości między atomami w cząsteczce).

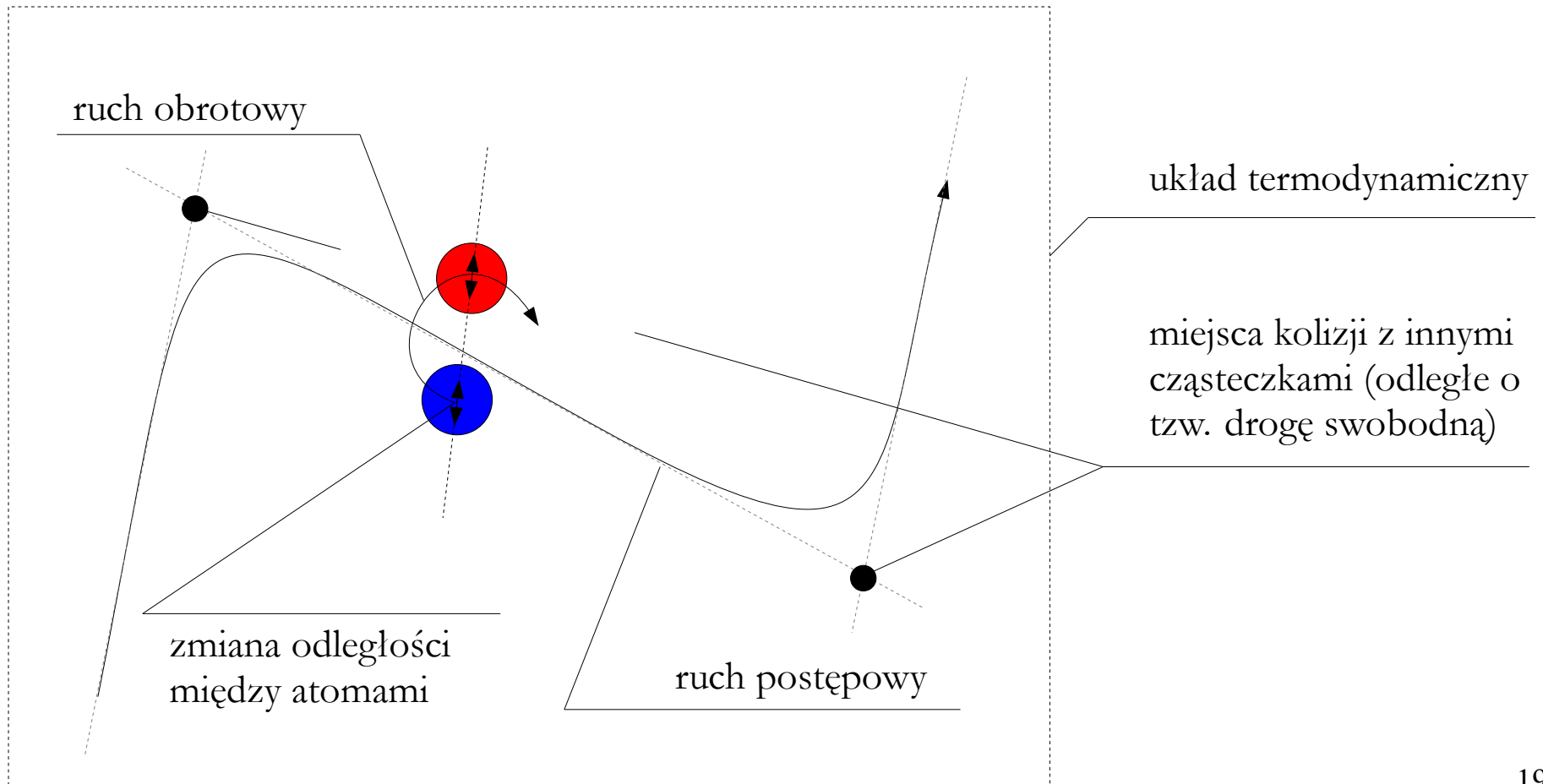


przykładowy obraz w termowizji

shutterstock.com • 361516628

Energia termiczna (cieplna)

Schemat ruchów cząsteczki gazu dwuatomowego (np. H_2 , O_2 , N_2)



Praca

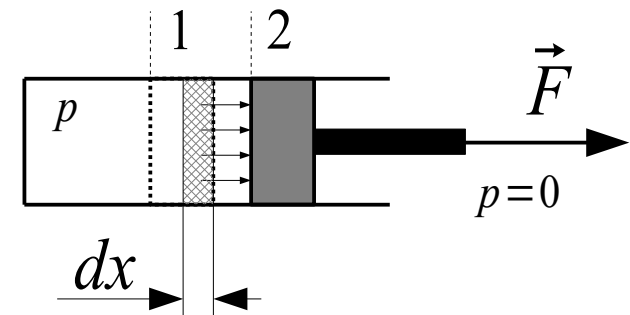
Praca – jedna z form przekazywania energii, w której kluczową rolę (w termodynamice) odgrywają zmiany objętości; w fizyce wielkość skalarna definiowana jako iloczyn skalarny wektora siły i wektora przemieszczenia.

Praca całkowita L $[J]$

Praca jednostkowa $l = \frac{L}{m}$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$

Praca powoduje **makroskopowe** zmiany w układzie termodynamicznym i w jego otoczeniu.

Zmiana objętości jest warunkiem zamiany ciepła na pracę – dlatego też w termodynamice najważniejsza jest praca zmiany objętości.



Ciepło

Ciepło – jedna z form przekazywania energii, w której kluczową rolę odgrywają zmiany energii wewnętrznej.

Sens słowa „ciepło” zależy od kontekstu – może to być:

- sposób przekazywania energii
- miara energii termicznej ciała
- miara energii potrzebnej do przemiany fazowej

Ciepło nie powoduje **makroskopowych** zmian w układzie termodynamicznym i w jego otoczeniu.

Ciepło całkowite Q $[J]$

Ciepło jednostkowe $q = \frac{Q}{m}$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$



Entalpia

Entalpia – suma energii wewnętrznej i pracy wtłoczenia.

$$H = U + p \cdot V$$

Entalpia całkowita H $[J]$

Entalpia właściwa $h = \frac{H}{m}$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$

$$h = u + p \cdot v$$



Energia strugi

Energia strugi – energia poruszającej się masy płynu, będąca sumą energii mechanicznej i entalpii strugi, odniesiona do czasu.

$$E_r = E_m + H$$

$$E_r = E_k + E_p + U + p \cdot V$$

$$E_r = m \cdot \left(\frac{c^2}{2} + g \cdot z + u + \frac{p}{\rho} \right) \quad [J] \quad / : t$$

$$\dot{E}_r = \dot{m} \cdot \left(\frac{c^2}{2} + g \cdot z + u + \frac{p}{\rho} \right) \quad \left[\frac{J}{s} \right] = [W]$$

$$E_k = \frac{m \cdot c^2}{2}$$

$$E_p = m \cdot g \cdot z$$

$$U = m \cdot u$$

$$p \cdot V = m \cdot p \cdot v = m \cdot \frac{p}{\rho}$$

Energia strugi a równanie Bernoulliego

$$\dot{E}_r = \dot{m} \cdot \left(\frac{c^2}{2} + g \cdot z + u + \frac{p}{\rho} \right)$$

← zmiana kolejności członów

$$\dot{E}_r = \dot{m} \cdot \left(\frac{c^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g \cdot z + u \right)$$

$$\dot{E}_r = \dot{m} \cdot g \cdot \left(\frac{c^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\rho \cdot g} + z + \frac{u}{g} \right)$$

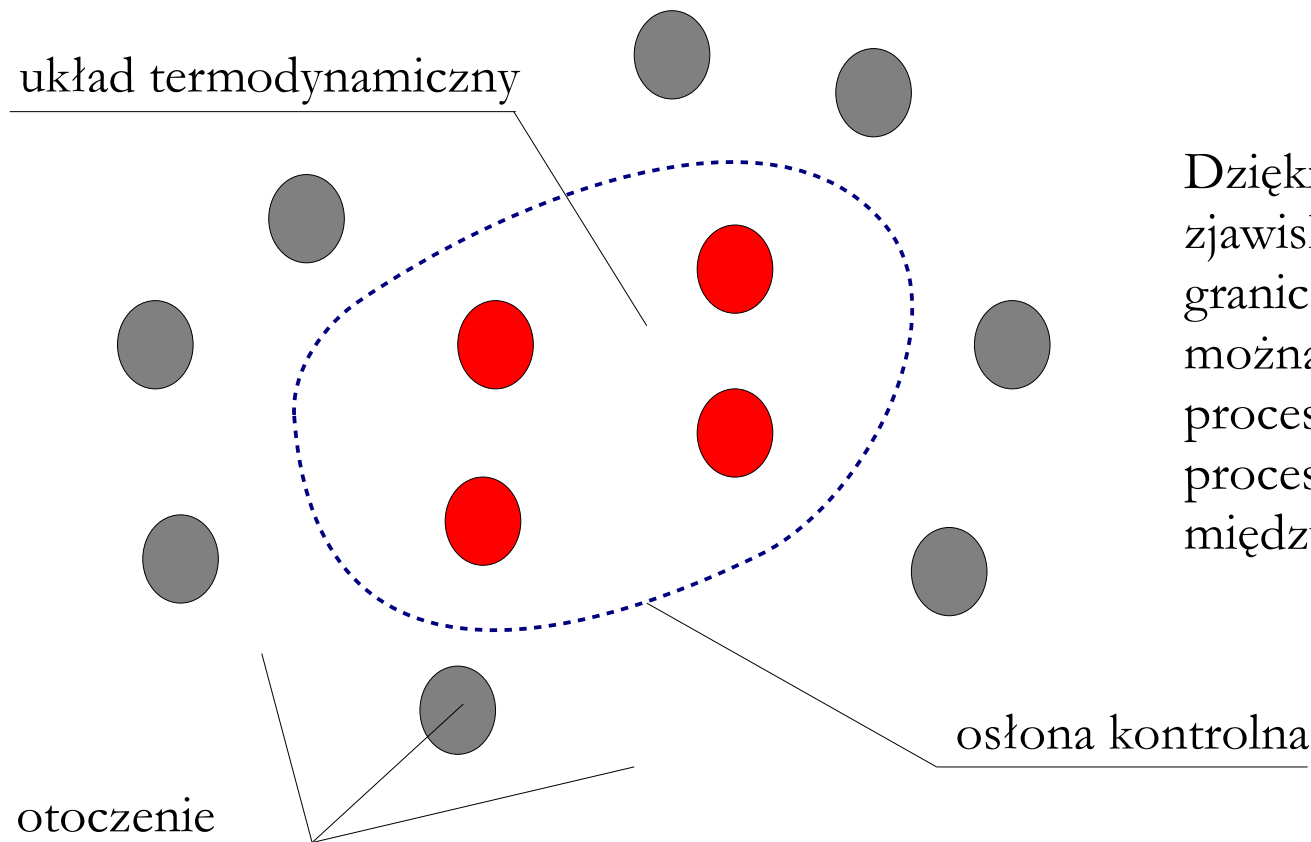
[H]

$$\dot{E}_r = \dot{m} \cdot g \cdot H$$

Równanie Bernoulliego – wzór na wysokość rozporządzalną energii strugi, ale z pominięciem energii wewnętrznej (w klasycznej Mechanice Płynów nie ma zmian temperatury, a więc energia wewnętrzna jest stała i nie ma sensu brania jej pod uwagę w równaniach bilansowych).

Układ termodynamiczny

Układ termodynamiczny – dowolnie wybrana część wszechświata, której zachowanie analizowane jest na podstawie zasad termodynamiki



Dzięki ograniczeniu danego zjawiska do układu (poprzez granicę widoczną lub myślową) można osobno rozpatrywać procesy wewnątrz układu jak i procesy wymiany energii między układem a otoczeniem.

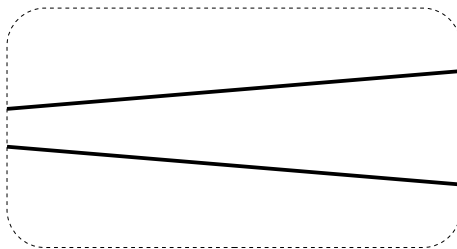
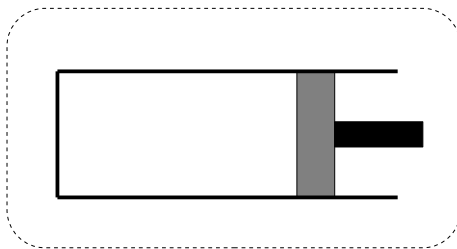
Układ termodynamiczny

Układy termodynamiczne mogą być:

- otwarte – wymiana z otoczeniem masy i energii
- zamknięte – wymiana z otoczeniem tylko energii
- izolowane – bez wymiany masy i energii



Zapytać o przykłady układów termodynamicznych!



Ścianki i ograniczenia mogą być:

- **ruchome** lub **nieruchome**
- **szttywne** lub **elastyczne**
- **adiabatyczne** (bez wymiany ciepła z otoczeniem) lub **diatermiczne** (możliwa wymiana ciepła z otoczeniem)
- **nieprzepuszczalne, półprzepuszczalne** (w przypadku mieszanin płynów, jeden płyn może przemieszczać się przez ściankę) lub **przepuszczalne**

Układ termodynamiczny – skale



Model suszenia ziarna



Bilans cieplny budynku



Analiza zmian klimatycznych

Czynnik termodynamiczny

Czynnik termodynamiczny – substancja biorąca udział w procesie termodynamicznym zachodzącym w układzie termodynamicznym. Czynnikiem termodynamicznym może być ciecz lub gaz.

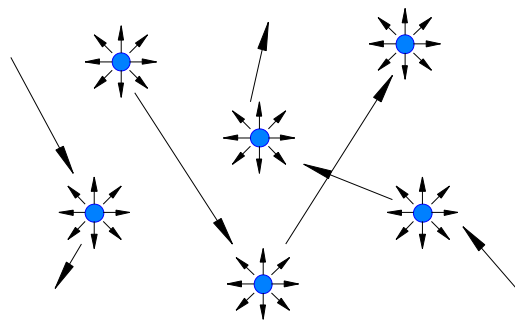
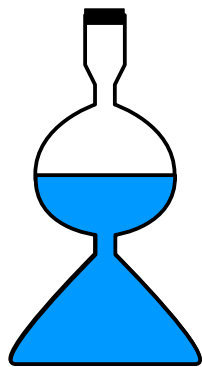
Płyn – substancja nie posiadająca zdolności do samodzielnego i trwałego zachowania kształtu. Rozróżnia się trzy stany płynne: ciecz, gaz i plazmę.

Gaz – stan skupienia materii, w którym ciało fizyczne łatwo zmienia kształt i zajmuje całą dostępną mu przestrzeń.

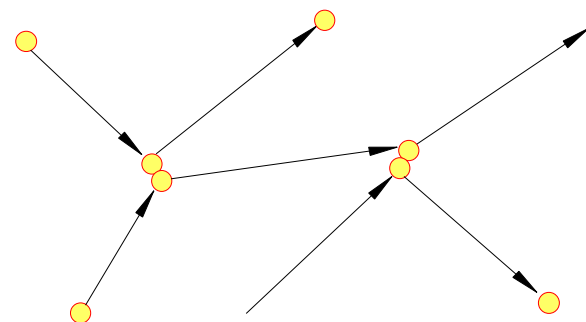
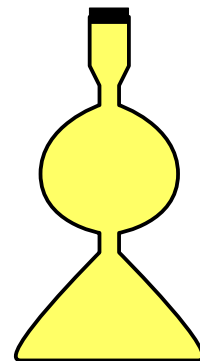
Ciecz – stan skupienia, w którym ciało fizyczne trudno zmienia objętość, a łatwo zmienia kształt. Wskutek tego ciecz zawsze przyjmuje kształt naczynia, w którym się znajduje, ale w przeciwieństwie do gazu nie rozszerza się, aby wypełnić je całe. Powierzchnia styku cieczy z gazem lub próżnią nazywa się powierzchnią swobodną cieczy.

Ciecze

W przypadku cieczy, cząsteczki materii ulegają dwójakiego rodzaju ruchom: ruchom drgającym dookoła pewnego położenia średniego oraz ruchom przeskoku z jednego miejsca „pobytu” na inne. Czas jaki upływa pomiędzy przybyciem cząstki materii na jakieś miejsce a jej kolejnym przeskokiem nazywa się czasem „życia osiadłego” τ_0 . Podczas przeskoku cząstka przemieszcza się o odległość l_0 .



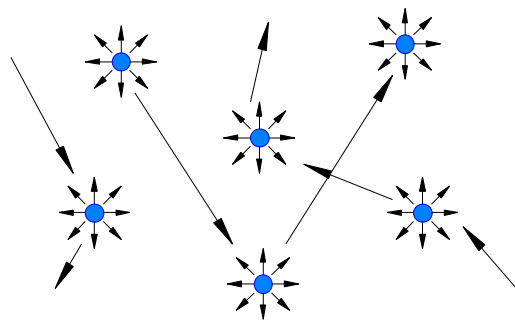
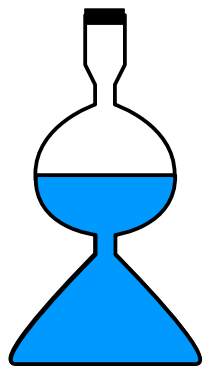
ciecz



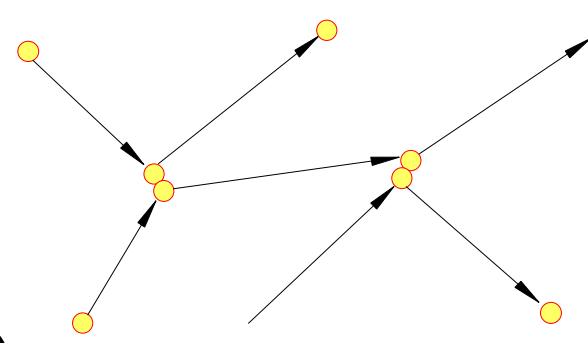
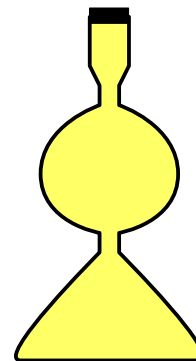
gaz

Gazy

W przypadku gazów cząstki materii poruszają się ruchem chaotycznym, bez możliwości spoczynku w jednym miejscu (czas „życia osiadłego” równy zeru). Taki rodzaj ruchu doprowadza do częstych zderzeń między molekułami, które następnie wędrują swobodnie, aż do następnego zderzenia. Średnia odległość między miejscami kolejnych zderzeń określana jest jako „droga swobodna” l_0 . Podkreślić należy, że średnia droga swobodna w gazach jest znacznie większa niż średnia droga przeskoku w cieczech.



ciecz



gaz

Gaz czy para?

Gaz jest pojęciem ogólnym określającym pewne własności substancji (jej stan skupienia).

Para jest pojęciem wskazującym, że czynnik o którym mowa znajduje się w stanie gazowym. Słowo „para” wymaga zatem podania informacji uzupełniającej o jaki to czynnik chodzi, np. para wodna (nasycona lub nienasycona), para benzyny, para rtęci itp.

Użycie słów gaz i para zależy od kontekstu.

Para w znaczeniu technicznym jest to gaz znajdujący się w warunkach bliskich przemianie fazowej (gdy niewielka zmiana parametrów może spowodować skroplenie).



Parametry termodynamiczne

Parametry termodynamiczne – wielkości fizyczne opisujące stan układu termodynamicznego, zależne jedynie od stanu początkowego i końcowego, a niezależne od drogi przemiany.

Parametry intensywne – niezależne od ilości materii w układzie:

- temperatura
- ciśnienie
- gęstość
- objętość właściwa

Parametry ekstensywne – zależne od ilości materii w układzie:

- masa
- objętość

Warunki termodynamiczne

Parametry termodynamiczne odnosi się zazwyczaj do pewnych warunków referencyjnych (odniesienia), np. warunków normalnych lub warunków standardowych.

Warunki standardowe – ściśle określona temperatura i ciśnienie otoczenia (parametry standardowe), które stanowią rodzaj punktu odniesienia do rozmaitych obliczeń fizykochemicznych. Wartości parametrów standardowych wynoszą odpowiednio **25** [°C] oraz **100 000** [Pa] (**1** [bar]).

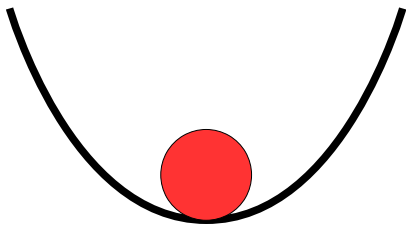
Warunki normalne – ściśle określona temperatura i ciśnienie otoczenia (parametry normalne), które stanowią rodzaj punktu odniesienia do rozmaitych obliczeń fizykochemicznych, najczęściej obliczeń dotyczących przemian zachodzących w fazie gazowej. Wartości parametrów normalnych wynoszą **0** [°C] oraz **101325** [Pa] (**1** [atm]).

Równowaga termodynamiczna

Równowaga termodynamiczna – stan, w którym makroskopowe parametry układu (p , V , T , ...) są stałe w czasie.

Na równowagę termodynamiczną składają się:

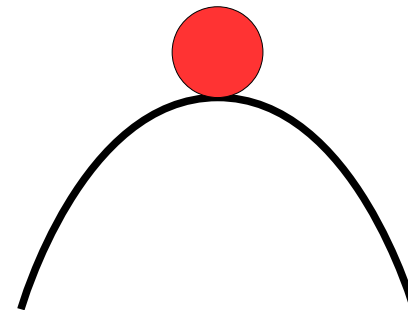
- równowaga chemiczna (brak reakcji chemicznych),
- mechaniczna (nie występują niezrównoważone siły),
- termiczna (nie występuje przepływ energii).



równowaga trwała



równowaga obojętna



równowaga chwiejna

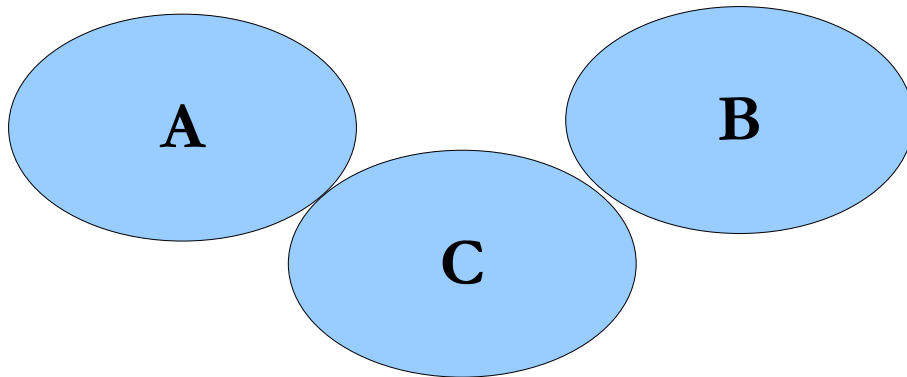
Równowaga termodynamiczna



Jedna z teorii głosi,
że gdy wszystkie parametry wszechświata osiągną równowagę nastąpi tzw. śmierć termiczna.

Zerowa Zasada Termodynamiki

Jeżeli dwa ciała znajdują się w równowadze termicznej z ciałem trzecim (A z C oraz B z C), to są również w równowadze między sobą (A z B).



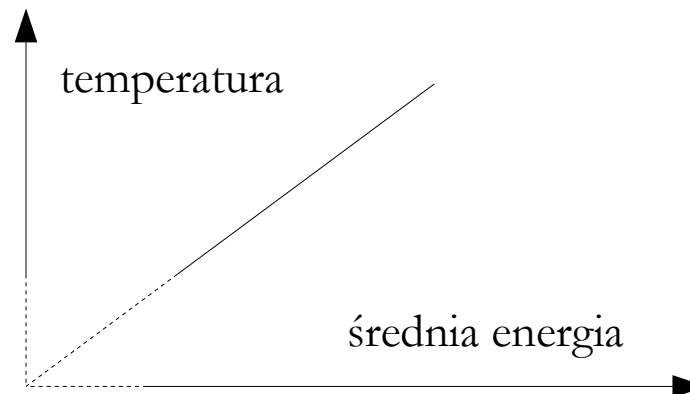
Z Zerowej Zasady Termodynamiki wynika, że ciało w równowadze termodynamicznej ma wszędzie tę samą temperaturę

Temperatura

Temperatura – miara średniej energii kinetycznej ruchu atomów lub cząsteczek. Ruch ten może być postępowy i drgający w przypadku atomów lub dodatkowo obrotowy oraz wynikający z drgań wewnętrznych (zmiana odległości między atomami w cząsteczce) w przypadku cząsteczek.

Stan, w którym energia kinetyczna cząsteczek przyjmuje najmniejszą możliwą wartość nazywa się zerem bezwzględnym. Ciało o temperaturze zera bezwzględnego nie posiada zdolności do przekazania ciepła innym ciałom.

Czy energia termiczna
(i jej miara) może być zerowa?



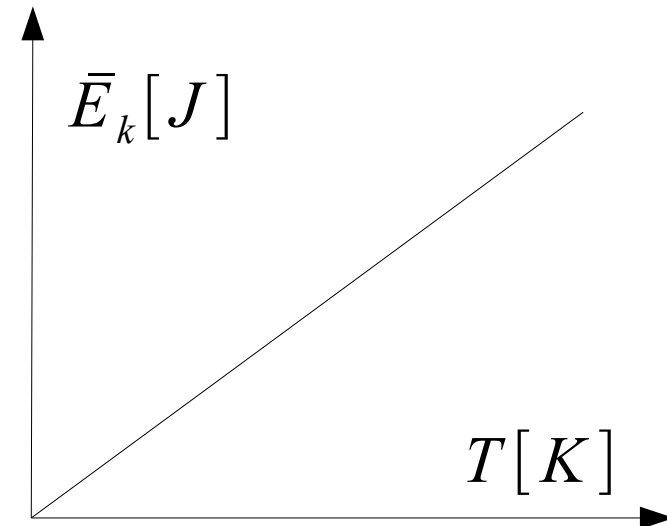
Temperatura

W pewnym uproszczeniu (wg tzw. kinetycznej teorii gazów) można przyjąć, że średnia energia kinetyczna cząstek oraz temperatura bezwzględna są do siebie proporcjonalne. Oznacza to, że w temperaturze zera absolutnego zanika wszelki ruch cząstek.

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$$

gdzie tzw. stała Boltzmannna

$$k = 1.3806 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right]$$



Temperatura

Skala temperatury – skala pozwalająca mierzyć i porównywać temperatury dowolnych układów termodynamicznych.

Względne skale temperatur – skale, w których podziałka skali oraz położenie punktu zerowego uzależnia się od konkretnych i łatwych do zaobserwowania zjawisk fizycznych. Przykładem może być skala Celsjusza lub skala Fahrenheita.

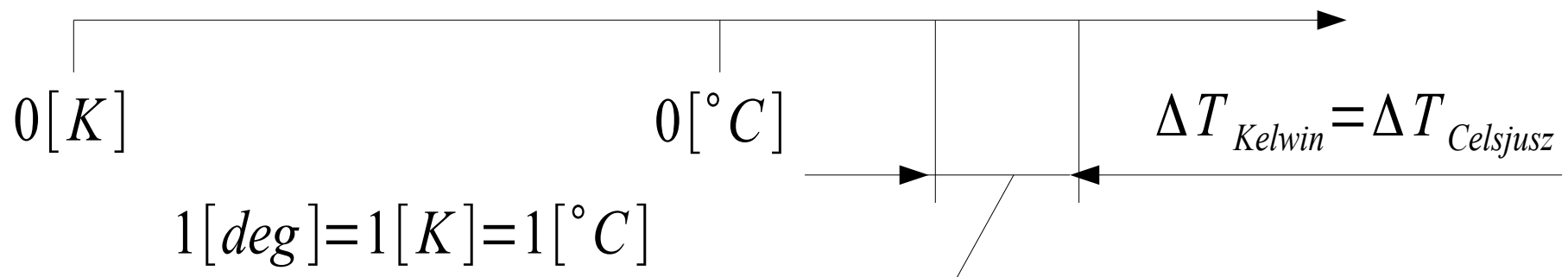
Bezwzględne skale temperatur – skale, w których punkt zerowy pokrywa się z tzw. zerem bezwzględnym. Podziałka skali może być przyjmowana dowolnie, a skala taka nie jest związana bezpośrednio z żadnym konkretnym czynnikiem termodynamicznym. Przykładem może być skala Kelwina lub skala Rankine'a.

Temperatura

Skala Kelvina – bezwzględna skala termometryczna, w której zero równe jest zeru bezwzględnemu a jednostka równa jest stopniowi skali Celsjusza.

Skala Celsjusza – względna skala termometryczna, w której stopień skali zdefiniowany jest jako jedna setna różnicy temperatur topnienia lodu i wrzenia wody przy ciśnieniu normalnym.

$$T_{\text{Kelvin}} = 273.15 + T_{\text{Celsjusz}}$$



Temperatura

Skala Rankine'a – bezwzględna skala termometryczna, w której zero równe jest zeru bezwzględnemu a jednostka równa jest stopniowi skali Fahrenheita.

$$T_{Kelvin} = \frac{5}{9} \cdot (T_{Rankine})$$

Skala Fahrenheita – względna skala termometryczna, w której zero stopni odpowiada najniższej temperaturze zanotowanej w Gdańsku, rodzinnym mieście Fahrenheita, w zimie 1708-1709, zaś sto stopni odpowiada średniej temperaturze ciała ludzkiego.

$$T_{Kelvin} = \frac{5}{9} \cdot (T_{Fahrenheit} - 32) + 273.15$$

Temperatura

Porównanie wybranych skal temperatur

Zjawisko	Kelvin	Celsjusz	Fahrenheit	Rankine	Delisle	Newton	Réaumur	Rømer
Zero absolutne	0	- 273.15	- 459.67	0	559.725	- 90.14	- 218.52	- 135.90
Zero Fahrenheita	255.37	- 17.78	0	459.67	176.67	- 5.87	- 14.22	- 1.83
Zamarzanie wody	273.15	0	32	491.67	150	0	0	7.5
Średnia temperatura ciała człowieka	310.0	36.6	98.2	557.9	94.5	12.21	29.6	26.925
Wrzenie wody	373.15	100	212	671.67	0	33	80	60
Topnienie tytanu	1941	1668	3034	3494	-2352	550	1334	883
Temperatura efektywna powierzchni Słońca	5800	5526	9980	10440	- 8140	1823	4421	2909

Temperatura

Ciekawostka: częstotliwość dźwięku wydawanego przez świerszcze zależy od temperatury.

THE CRICKET AS A THERMOMETER.

BY A. E. DOLBEAR.

One may express this relation between temperature and chirp rate thus.

Let T . stand for temperature and N , the rate per minute.

$$T.=50+\frac{N-40}{4}$$

For example. What is the temperature when the concert of crickets is 100 per minute?

$$T.=50+\frac{100-40}{4}=65^{\circ}.$$

Pomiary temperatury



Stanowisko do wyznaczania charakterystyki dynamicznej termometru.

Stanowisko do pomiarów temperatury wybranymi metodami kontaktowymi.



Pomiary temperatury



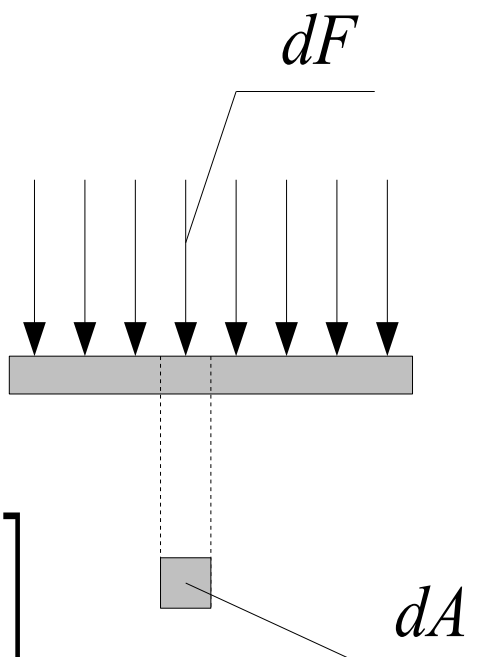
Stanowisko do pomiarów temperatury metodami bezkontaktowymi.

Ciśnienie

Ciśnienie – wielkość skalarna określona jako granica stosunku nieskończenie małej siły powierzchniowej ΔF do elementu powierzchni ΔA , na który ona działa:

$$p = \lim_{A \rightarrow A_{gr}} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA}$$

$$[Pa] = \left[\frac{N}{m^2} \right] = \left[\frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot \frac{1}{m^2} \right]$$



Inne jednostki:

[bar]

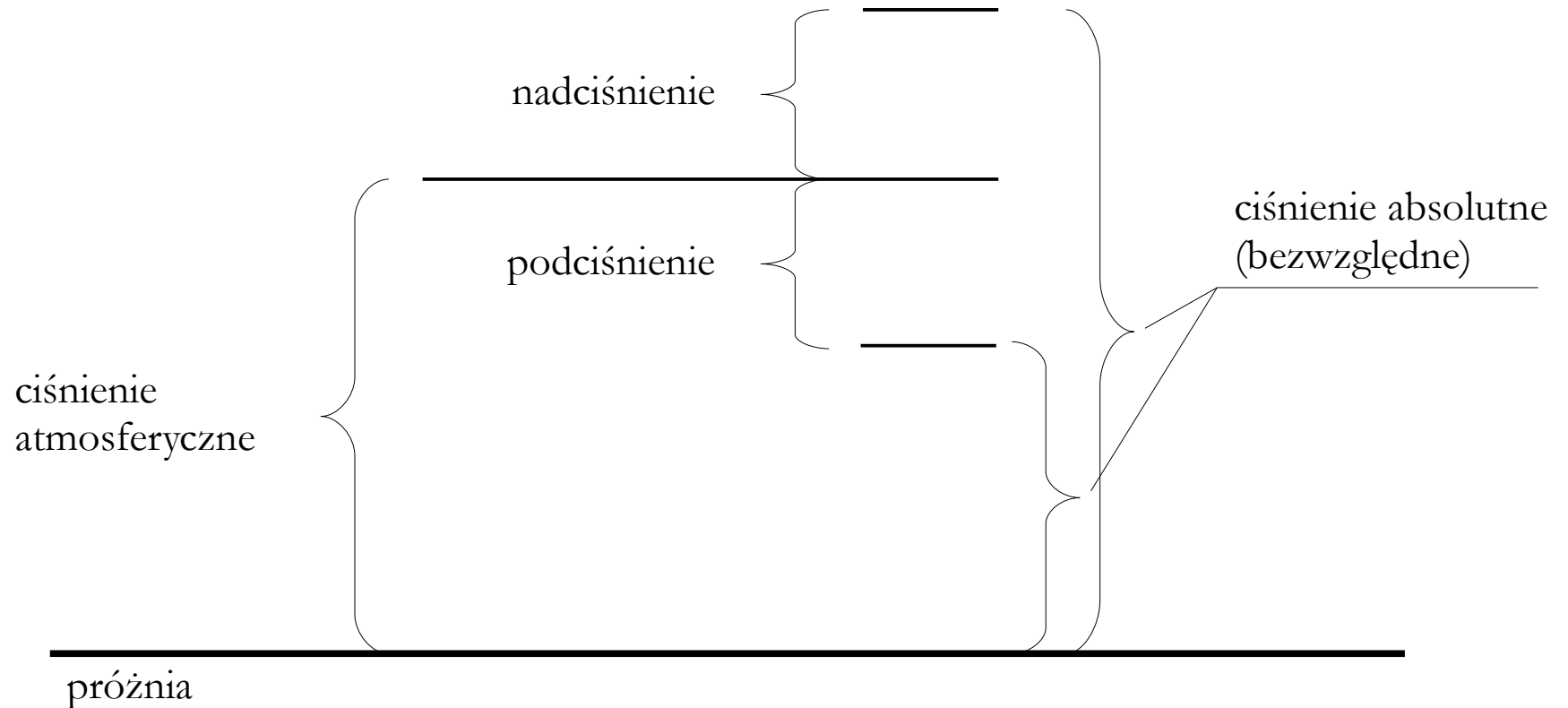
[mm_{H_2O}]

[mm_{Hg}] = [Tor]

[at]

[atm]

Ciśnienie



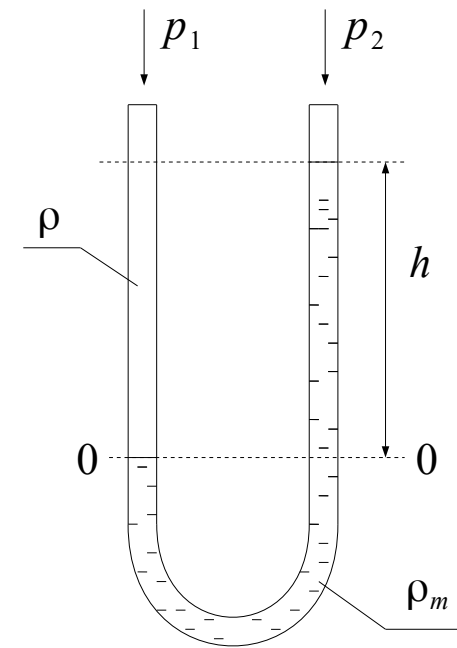
Ciśnienie absolutne, nadciśnienie i podciśnienie

Ciśnienie

Ciśnienie manometryczne –
ciśnienie mierzone względem
określonego ciśnienia odniesienia
(najczęściej ciśnienia atmosferycznego).

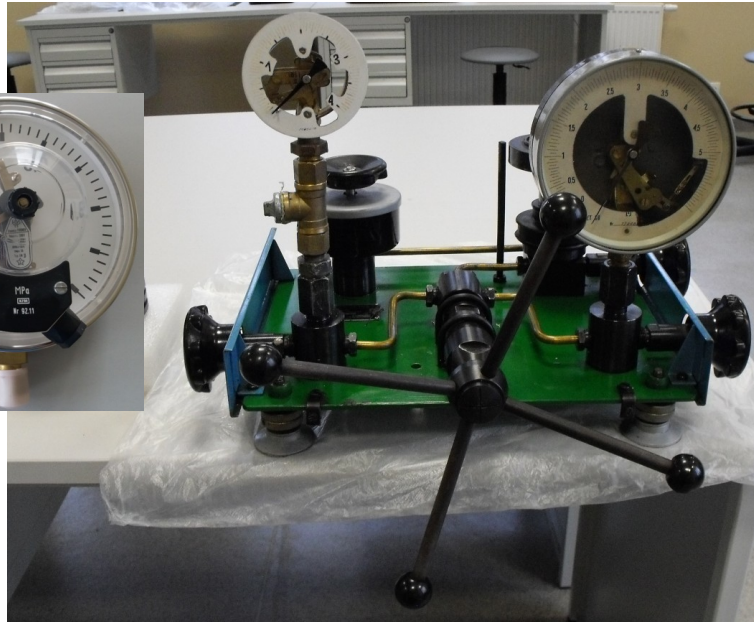


Jeśli w butli jest 0.7 ciśnienia
atmosferycznego, to jakie jest
podciśnienie?



U-rurka
(najprostszy manometr)

Pomiary ciśnienia



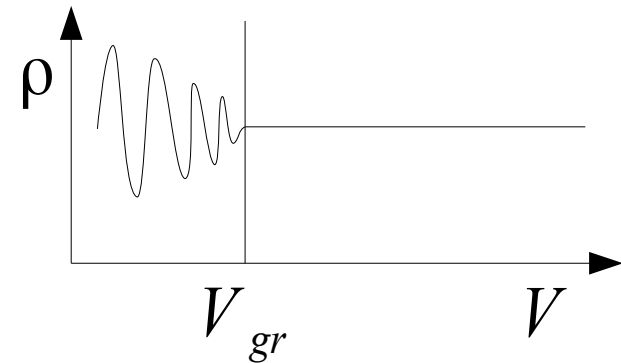
Stanowisko do pomiaru ciśnień statycznych płynów.



Gęstość

Gęstość – wielkość skalarna określona jako granica stosunku nieskończenie małej masy Δm do elementarnej objętości ΔV :

$$\rho = \lim_{V \rightarrow V_{gr}} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \equiv \frac{m}{V} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$



Gęstość:

ile kilogramów danej substancji znajduje się w 1 m^3 ?

płyn nieściśliwy: ciecz pod małym ciśnieniem, gaz przy małej prędkości

płyn ściśliwy: ciecz pod dużym ciśnieniem, gaz przy dużej prędkości

Gęstość

Ciała stałe	Gęstość	Ciecze	Gęstość	Gazy	Gęstość
-	[kg/m ³]	-	[kg/m ³]	-	[kg/m ³]
Aluminium	2 720	Aceton	792	Azot	1.25
Brąz	8 800 – 8 900	Alkohol etylowy	789.3	Butan	2.703
Krzem	2 329.6	Alkohol metylowy	792.8	Dwutlenek azotu	2.05
Kwarc	2 500 – 2 800	Benzyna	680 – 720	Dwutlenek siarki	2.83
Miedź (elektrolityczna)	8 933	Gliceryna	1 260	Dwutlenek węgla	1.96
Mosiądz	8 400 – 8 700	Nafta	820	Etan	1.32
Ołów	11 300 – 11 400	Olej maszynowy	900 – 920	Hel	0.178
Srebro	10 500	Olej parafinowy	870 – 880	Metan	0.71
Stal	7500 – 7900	Terpentyna	870	Powietrze	1.2
Staliwo	7 840	Ropa naftowa	810 – 850	Propan	2.019
Szkło zwykłe	2 400 – 2 800	Rtęć	13 596	Tlen	1.43
Złoto	19 282	Woda	998.29	Tlenek węgla	1.25
Żelazo czyste (α)	7 875	Woda morska	1 025	Wodór	0.08989

Pomiary gęstości

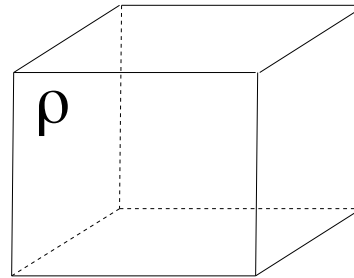


Stanowisko do wyznaczania gęstości płynów.

Objętość właściwa

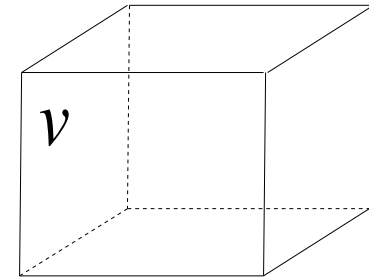
Objętość właściwa – odwrotność gęstości

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$



$1 [m^3]$

Ile tu wejdzie kilogramów?



$1 [kg]$

Ile to zajmuje miejsca?

Objętość właściwa:

jaka musi być objętość, aby zmieścił się w niej 1 kg danej substancji?

Lepkość

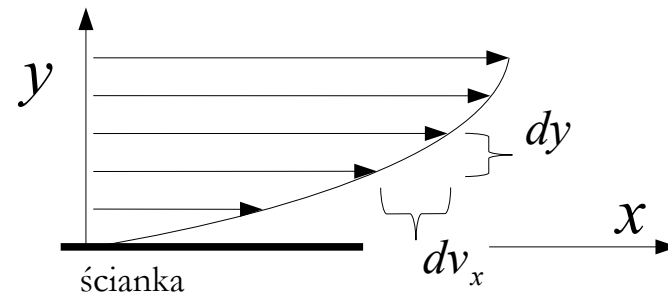
Lepkość – zdolność płynu do przenoszenia naprężeń stycznych.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [Pa \cdot s]$$

τ - naprężenia styczne $[Pa]$

$\dot{\gamma}$ - prędkość ścinania $\left[\frac{1}{s} \right]$

μ - współczynnik lepkości dynamicznej $[Pa \cdot s]$

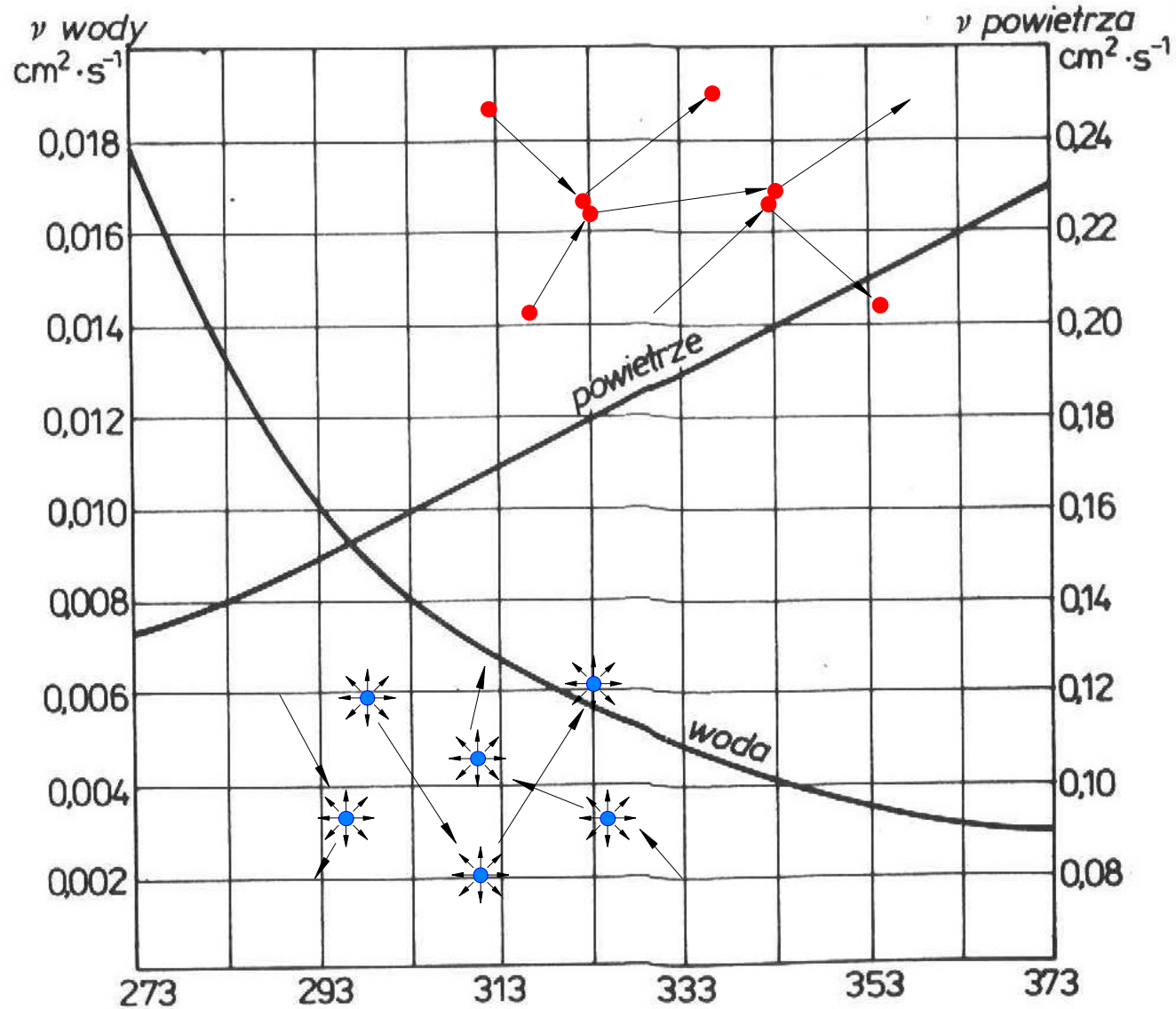


$$\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dy}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

- kinematyczny współczynnik lepkości

Lepkość



Współczynnik lepkości dynamicznej w funkcji temperatury

Lepkość



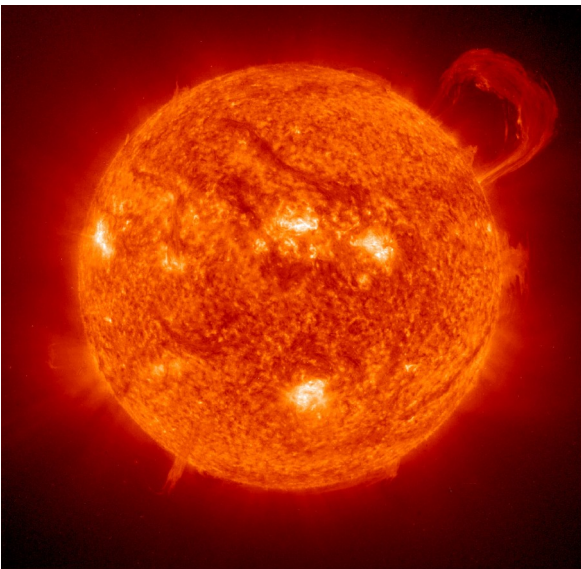
Przykłady zachowania się płynów o różnych lepkościach.

Pomiary lepkości

Stanowisko do wyznaczania lepkości płynów.



Parametry właściwe



Parametr właściwy (lub jednostkowy) – parametr odniesiony do jednostki masy lub objętości danej substancji.

Oczywiste jest, że więcej energii (E) uzyska się ze stu ton węgla niż z jednego grama wodoru, ale wodór generalnie jest lepszym paliwem niż węgiel – wniosek ten nasuwa się wyraźnie po porównaniu jednostkowych wartości energii (e).

Średnia wartość opałowa węgla wynosi 25 [MJ/kg], wodoru zaś 120 [MJ/kg].

Podsumowanie

Zagadnienia (dotyczy pełnego kursu):

Pojęcie termodynamiki, skale obserwacji i analizy zjawisk, rodzaje energii, dżul, wat, sposoby wymiany energii, energia potencjalna, energia kinetyczna, energia mechaniczna, Zasada Zachowania Energii Mechanicznej, energia wewnętrzna, energia termiczna, praca, ciepło, entalpia, energia strugi, energia strugi a równanie Bernoulliego, układ termodynamiczny, czynnik termodynamiczny, ciecze i gazy, parametry termodynamiczne, warunki termodynamiczne, równowaga termodynamiczna, Zerowa Zasada Termodynamiki, temperatura, względne i bezwzględne skale temperatury, ciśnienie, gęstość, objętość właściwa, lepkość, parametry właściwe.

UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN
The Faculty of Technical Sciences
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)



Dziękuję za uwagę

Wojciech Sobieski

Olsztyn, 2013-2022