



# TERMODYNAMIKA

## Pierwsza Zasada Termodynamiki

# Zasada Zachowania Energii

---

Wybrane sformułowania Zasady Zachowania Energii:

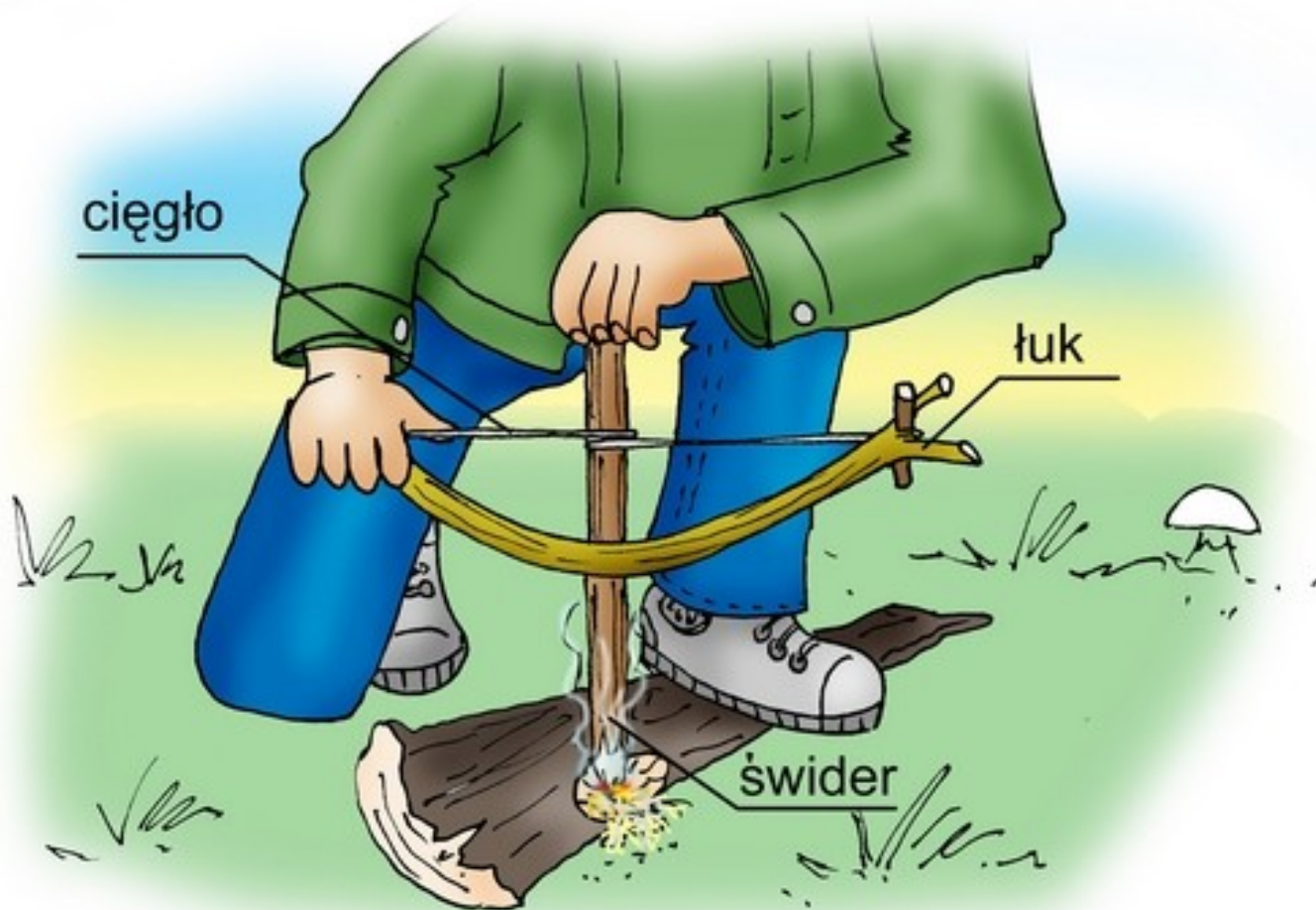
- W dowolnym procesie całkowita energia układu izolowanego jest stała.
- Całkowita energia izolowanego układu jest taka sama przed, jak i po wystąpieniu przemian w tym układzie.
- Zmiana energii układu izolowanego możliwa jest tylko poprzez dostarczenie jej z zewnątrz, lub w wyniku wyemitowania jej poza układ.
- Energia nie ginie, ani nie powstaje samorzutnie.


$$E = const.$$

izolowany  
układ termodynamiczny

# Zasada Zachowania Energii

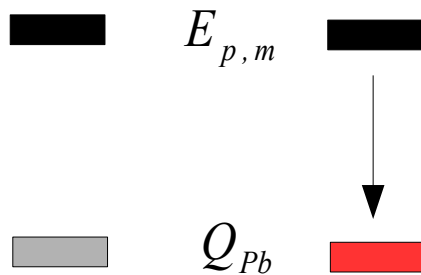
---



Świder ogniowy – zamiana energii mechanicznej na ciepłą

# Zasada Zachowania Energii

Jaka masa ołowiu o temperaturze 15 [°C] może zostać podgrzana do temperatury topnienia 327 [°C] przez uderzenie młota o masie 250 [kg] spadającego z wysokości 2 [m], jeżeli cała energia spadającego ciała przekształci się w energię cieplną ołowiu? Przyjąć ciepło właściwe ołowiu równe 130 [J/(kg·K)].



$$E_{p,m} = m_m \cdot g \cdot h_m$$

$$Q_{Pb} = m_{Pb} \cdot c_{Pb} \cdot \Delta T_{Pb}$$

$$m_{Pb} = \frac{m_m \cdot g \cdot h_m}{c_{Pb} \cdot \Delta T_{Pb}} = \frac{250 \cdot 9.81 \cdot 2}{130 \cdot (327 - 15)} = \frac{4905}{40560} = 0.121 \text{ [kg]}$$

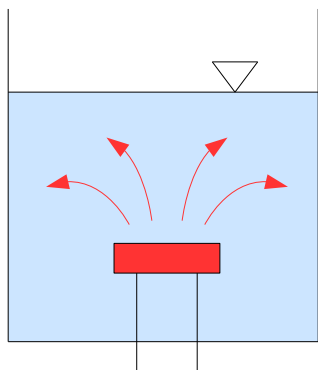
$$E_{p,m} = Q_{Pb}$$

W tym zadaniu bilansujemy energię potencjalną i energię termiczną, przy założeniu, że nie następuje żadne rozpraszanie energii.

# Zasada Zachowania Energii

---

Jaki jest najkrótszy czas, po którym 2 [kg] wody o temperaturze 10 [°C] zostanie podgrzane grzałką elektryczną o mocy 500 [W] do temperatury 100 [°C]?



$$Q_{el} = Q_{H_2O}$$

$$Q_{el} = N_{el} \cdot t$$

$$Q_{H_2O} = m_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta T$$

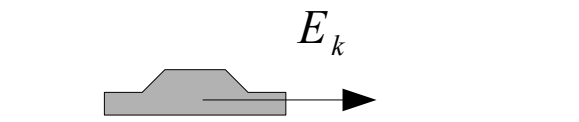
$$t = \frac{m_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta T}{N_{el}} = \frac{2 \cdot 4186 \cdot (100 - 10)}{500} = 1506.96 \text{ [s]}$$

W tym zadaniu bilansujemy energię elektryczną i energię termiczną, przy założeniu, że nie następuje żadne rozpraszanie energii.

# Zasada Zachowania Energii

---

Samochód o masie 900 [kg] jadący z prędkością 60 [km/h] zostaje zahamowany. Obliczyć ilość ciepła tarcia wydzieloną kosztem pracy na elementach hamujących, biorąc pod uwagę wyłącznie energię ruchu postępowego pojazdu.



$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{900 \cdot 16.67^2}{2} = 125000 \text{ [J]}$$



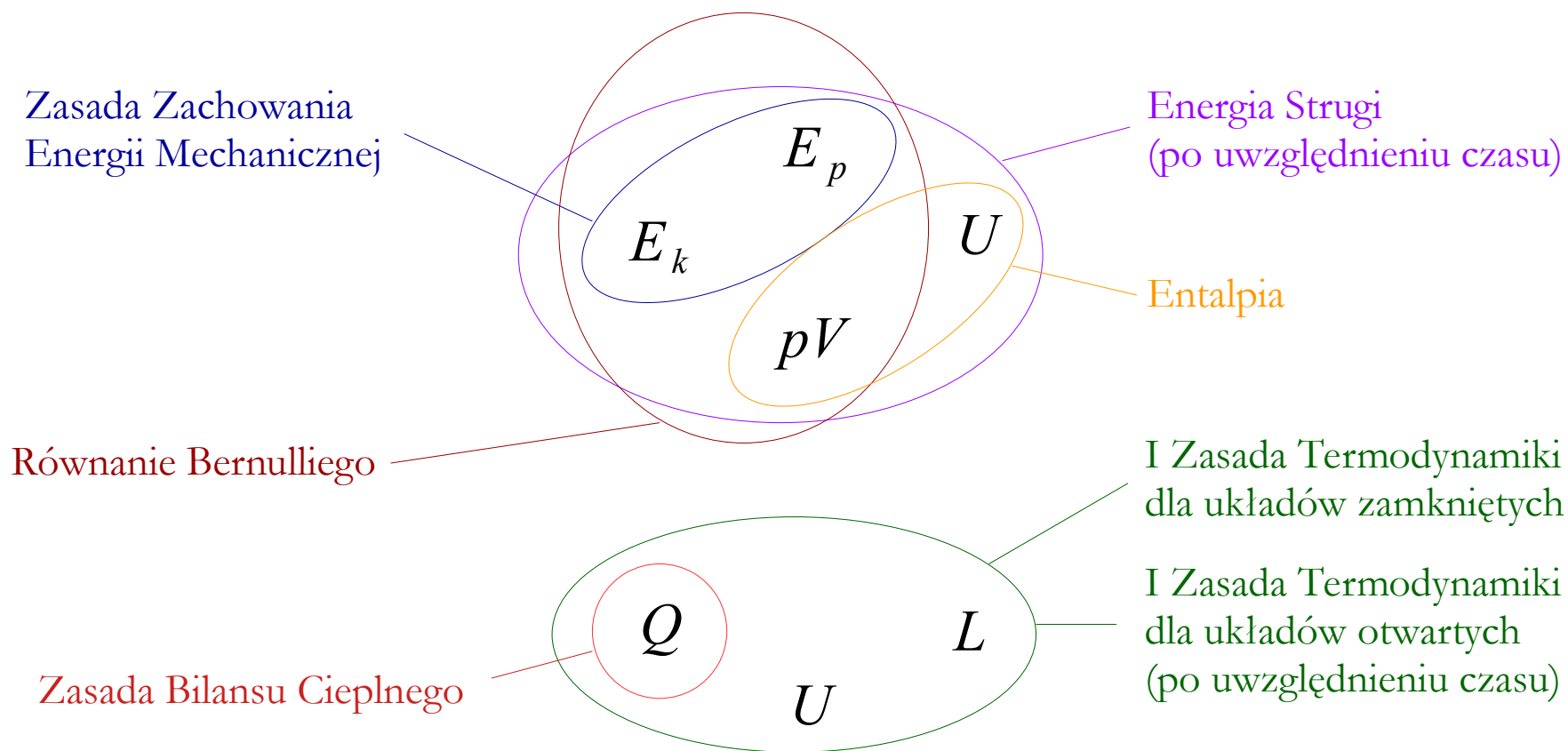
$$Q_{\text{tarcia}} = 125000 \text{ [J]}$$

$$E_k = Q_{\text{tarcia}}$$

W tym zadaniu bilansujemy energię kinetyczną i energię termiczną.

# Zasada Zachowania Energii

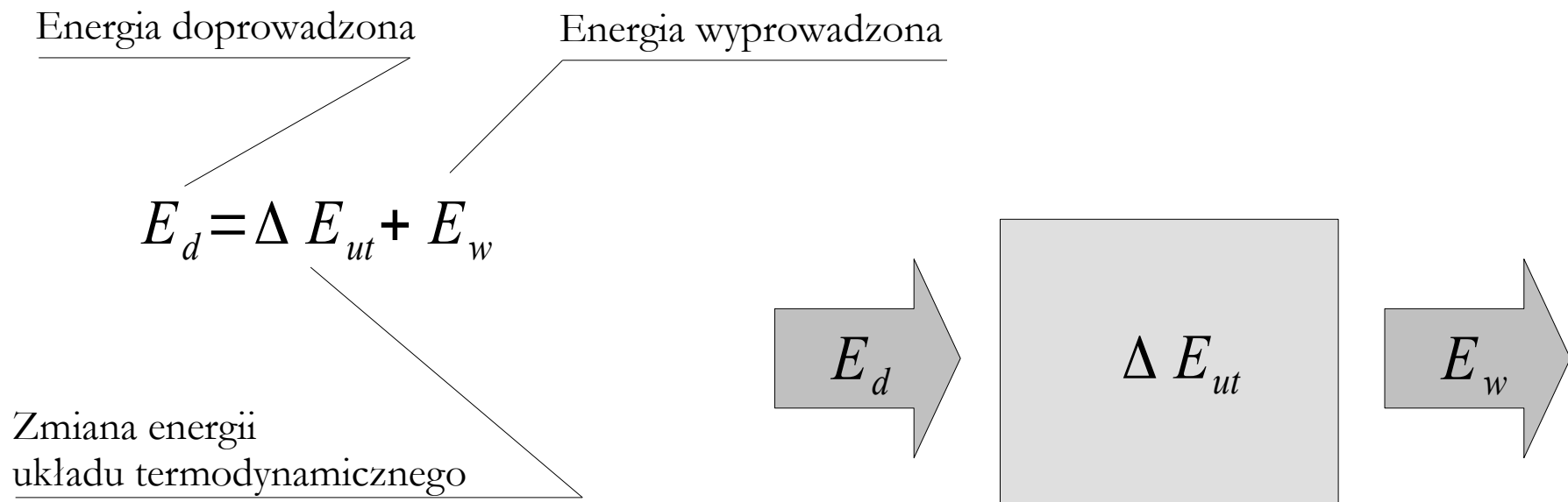
Zasada Zachowania Energii może przyjmować różne formy szczególne, zależnie od tego, jakie rodzaje energii uwzględnia się w bilansie.



# ZZE w Termodynamice

---

W termodynamice najczęściej stosuje się Zasadę Zachowania Energii wg następującego sformułowania: energia doprowadzona do układu może zmienić energię tego układu lub też może zostać wyemitowana dalej (na zewnątrz układu).

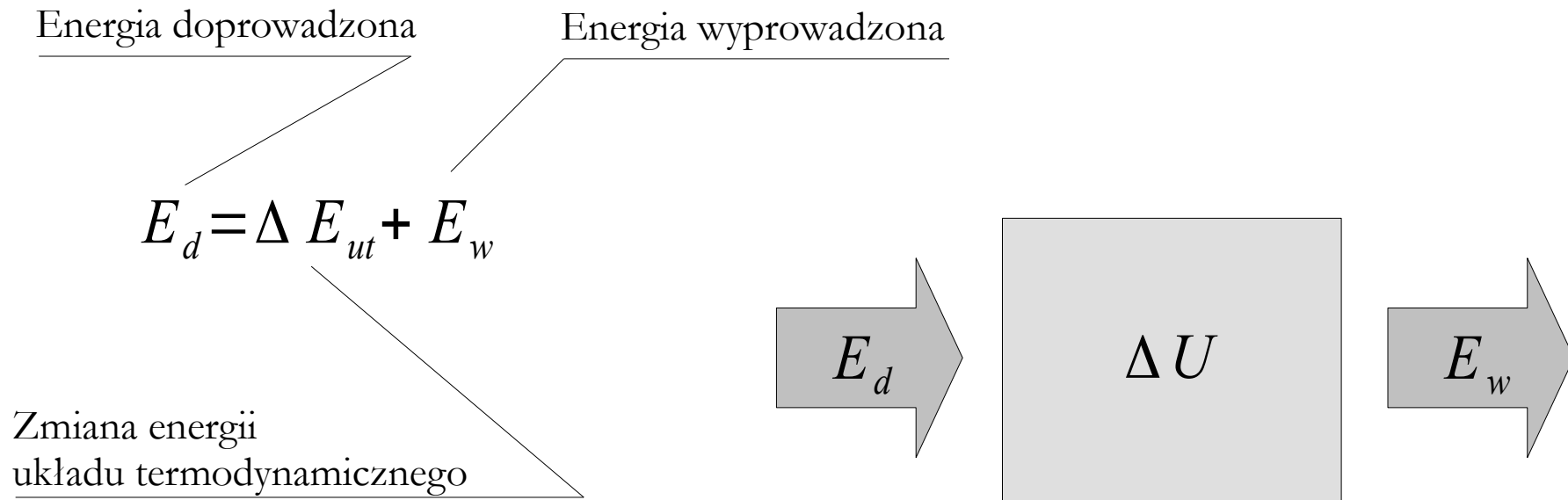




# ZZE w Termodynamice

---

Obserwacje wskazują, że bardzo często energia doprowadzona nie równa się energii wyprowadzonej – oznacza to, że układ posiada zdolność do magazynowania lub przechowywania energii. Energię tak zgromadzoną nazywa się energią wewnętrzną.



# Stan ustalony

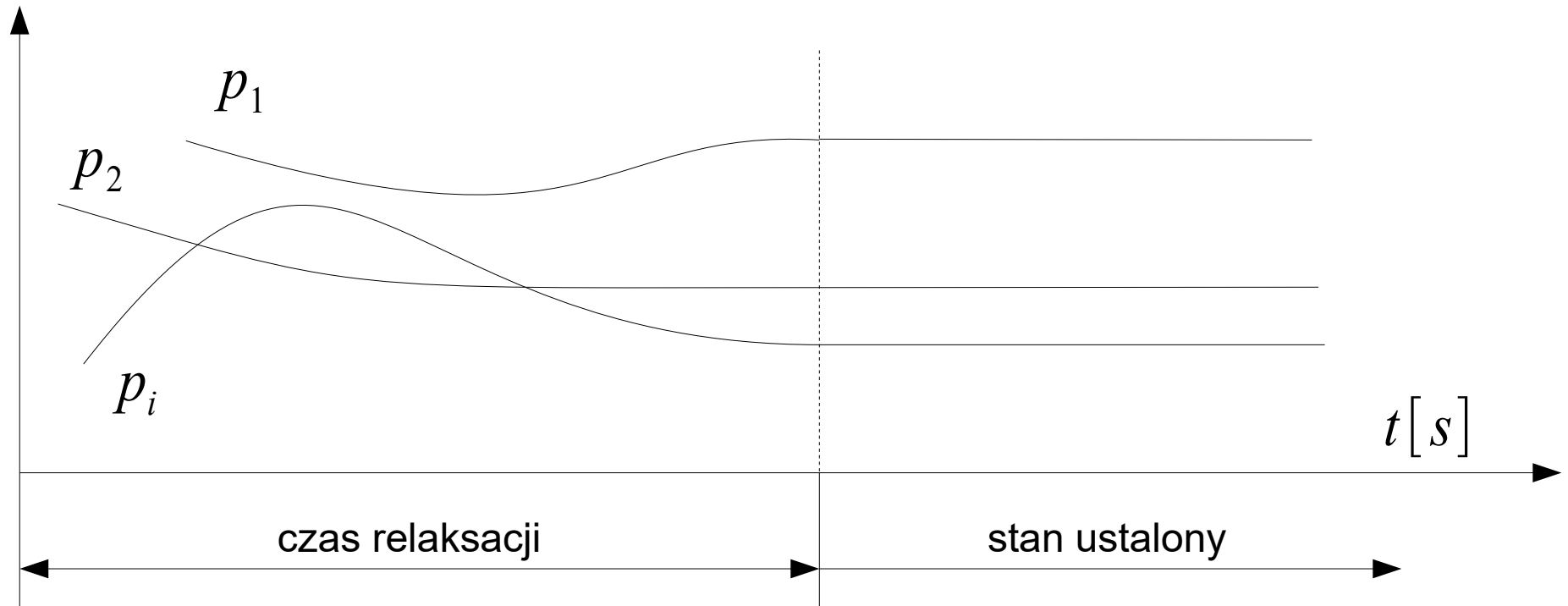
Pierwsza Zasada Termodynamiki zajmuje się bilansowaniem energii w stanie ustalonym, czyli takim w którym poszczególne energie wchodzące w stan bilansu nie zmieniają się w czasie.

Zimna turbina parowa musi być nagrzewana powoli (ze względu na odkształcenia termiczne) – stan ustalony osiąga się najwcześniej po kilkunastu godzinach. Temperatura pary w turbinie wynosi przeważnie około  $560^{\circ}\text{C}$ .

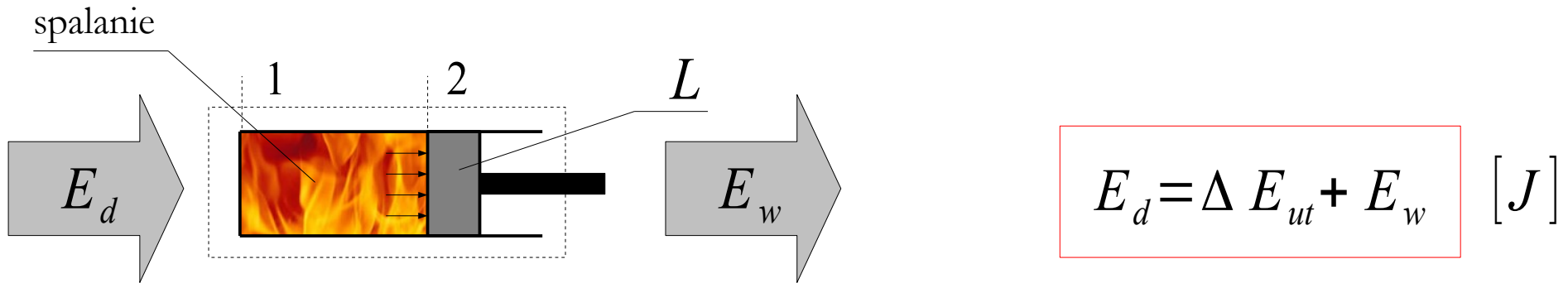


# Czas relaksacji

Stan ustalony układu termodynamicznego osiąga się po tzw. czasie relaksacji – jest to czas, po którym wszystkie parametry stanu przyjmą wartości stałe.



# ZZE dla układu zamkniętego (1 postać)



$E_d = Q$  ← doprowadzone ciepło (ciepło spalania)

$\Delta E_{ut} = \Delta U$  ← w stanie ustalonym (np. w rozgrzanym silniku) nie zmienia się temperatura tłoka i cylindra, a przyrost energii układu równa się tylko przyrostowi energii wewnętrznej czynnika

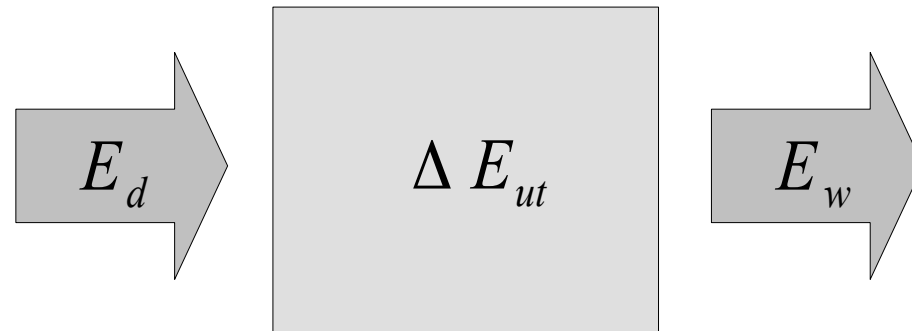
$E_w = L$  ← energia wyprowadzona = praca

$Q = \Delta U + L$

ZZE dla układu zamkniętego, dla którego bilansuje się tylko energię wewnętrzną, ciepło i pracę (absolutną), nosi nazwę Pierwszej Zasady Termodynamiki.

# Konwencja znaków przepływu energii

---



Konwencja „fizyków”:

$$Q_d > 0 \quad Q_w < 0$$

$$L_d > 0 \quad L_w < 0$$

Konwencja „techników”:

$$Q_d > 0 \quad Q_w < 0$$

$$L_d < 0 \quad L_w > 0$$

praca ekspansji jest dodatnia

# Zapalniczka tłokowa

---

Dla silnika spalinowego:

$$Q = \Delta U + L$$

Powyższy zapis często spotyka się w literaturze, ale jest on nieco mylący, bo sugeruje konkretną sytuację: dostarczanie ciepła i wykonywanie pracy.

W zasadzie powinno się raczej używać innego zapisu:

$$\Delta U = Q + L$$

lub:

$$Q + \Delta U + L = 0$$



Dla porównania, dla zapalniczki bardziej sensowny jest zapis:

$$L = \Delta U + Q$$

# ZZE dla układu zamkniętego (2 postać)

$$Q = \Delta U + L$$

← postać wyjściowa I ZT

$$dq = du + dl$$

← zapis różniczkowy

$$dl = p \cdot dv \quad \text{- różniczkowa postać pracy}$$

$$dq = du + p \cdot dv \quad \text{- różniczkowa postać I Zasady Termodynamiki (wariant 1)}$$

$$d(p \cdot v) = p \cdot dv + v \cdot dp \quad \text{funkcja złożona}$$

$$p \cdot dv = d(p \cdot v) - v \cdot dp$$

$$dq = du + d(p \cdot v) - v \cdot dp = d(u + p \cdot v) - v \cdot dp \quad \leftarrow h = u + p \cdot v$$

$$dq = dh - v \cdot dp \quad \text{- różniczkowa postać I Zasady Termodynamiki (wariant 2)}$$

$$dq = dh + dl_t$$

→

$$Q = \Delta H + L_t$$

- druga postać IZT

# Perpetuum mobile pierwszego rodzaju

---

Założenie – do układu nie dostarcza się ciepła, wówczas

$$\begin{array}{ccc} Q = \Delta U + L & & L = -\Delta U \\ & \searrow & \nearrow \\ & Q = 0 & \end{array}$$

Z uzyskanego wzoru wynika, że bez dostarczania ciepła, praca może być wykonana jedynie kosztem energii wewnętrznej – a ponieważ zasoby energii wewnętrznej są ograniczone, to nie można zbudować maszyny, która wykonywałaby w sposób ciągły pracę bez dostarczania energii z zewnątrz – tłumaczy to, dlaczego nie można zbudować perpetuum mobile pierwszego rodzaju.



# Perpetuum mobile pierwszego rodzaju

---

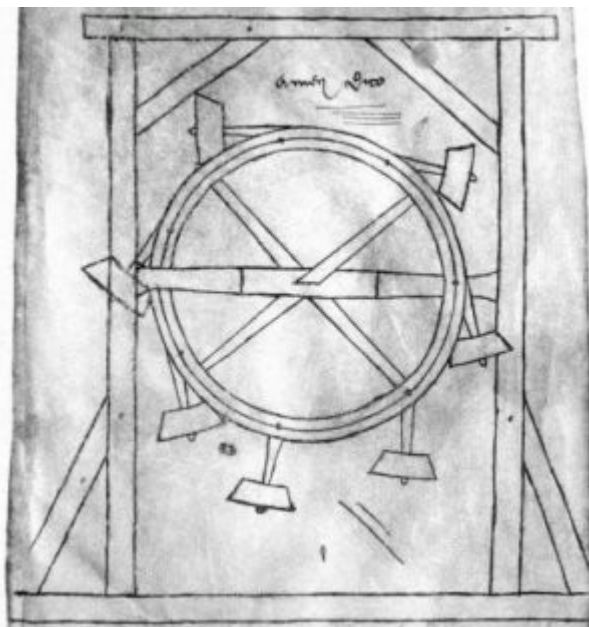
**Perpetuum mobile pierwszego rodzaju** – maszyna wykonująca pracę w sposób ciągły bez dostarczania energii.

Próby zbudowania perpetuum mobile podejmowane były już w XIII wieku, a szczególne zainteresowanie tą koncepcją przypadło na wiek XVI i XVII. Prace podejmowane przed XIX wiekiem mogą być uznane za próby rozwoju koncepcji naukowych, które nie zostały potwierdzone.

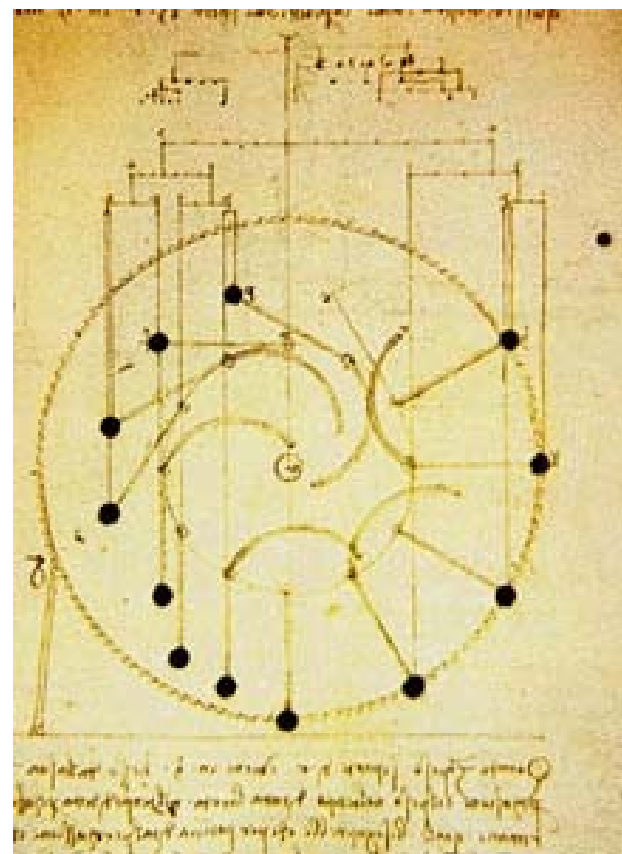
Według dzisiejszej wiedzy konstrukcje tego typu są niemożliwe i podejmowane obecnie próby są uznawane za pseudonaukę.

# Perpetuum mobile pierwszego rodzaju

---



Szkic perpetuum mobile Villarda de Honnecourta z XIII wieku



Projekt perpetuum mobile Leonardo da Vinci

# Wolna energia

---

**Wolna energia** (ang. free energy) - ogólne określenie na pseudonaukowe teorie dotyczące bardzo taniego lub bezpłatnego pozyskiwania energii.

„Free energy” traktuje się również jako pewien ruch (również w środowisku naukowym), którego celem jest poszukiwanie nowych, nieodkrytych i potencjalnie bardzo tanich w eksploatacji źródeł energii, jak np. energia próżni. Z założenia takie metody wytwarzania energii mają być szeroko dostępne, bez ograniczeń licencyjnych czy monopolii (stąd określenie „wolna”).

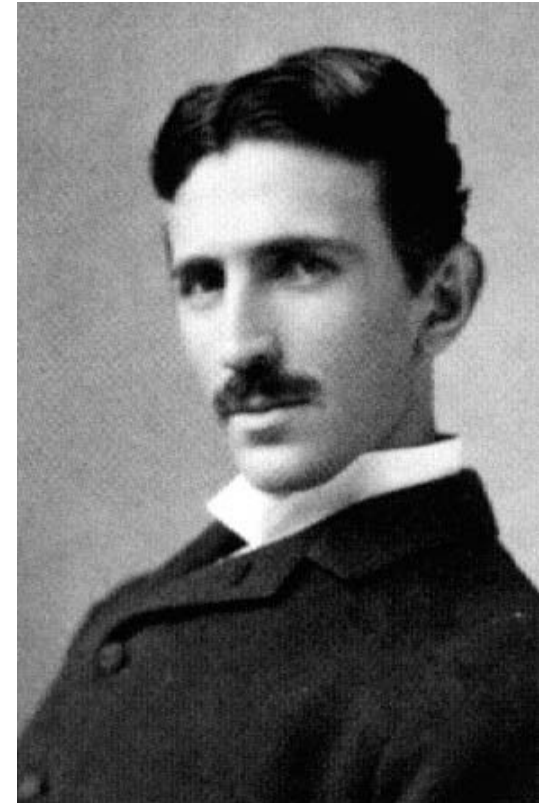
Prawdopodobnie ruch bierze swoje początki w działalności Nikoła Tesli, uważającego, że energia powinna być dostępna każdemu bez żadnych ograniczeń.

# Nikola Tesla

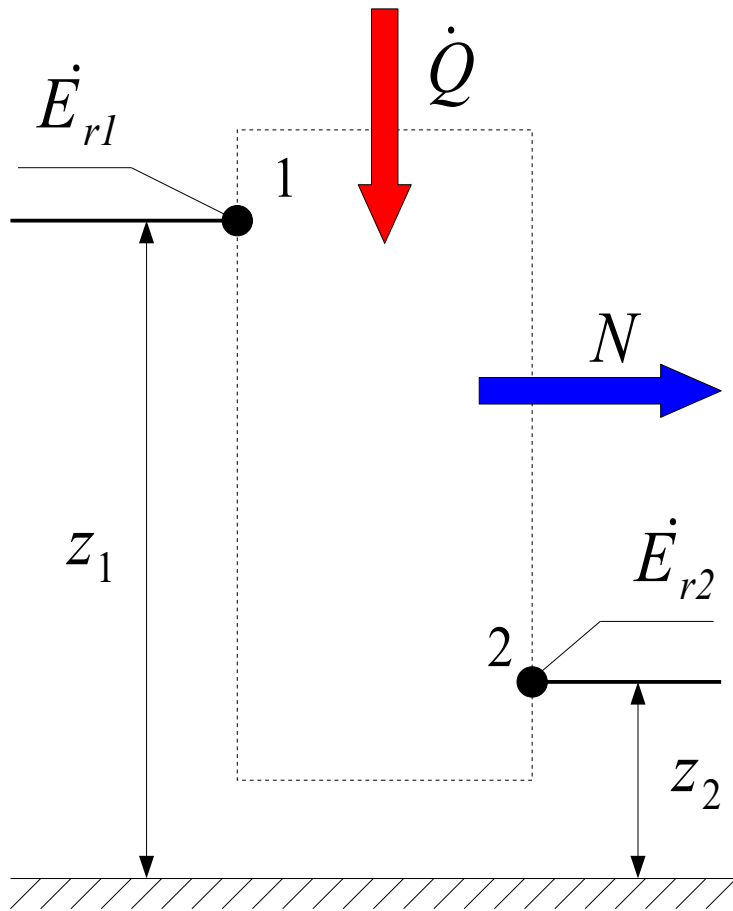
---

**Nikola Tesla** (10.07.1856-7.01.1943) – serbski inżynier i wynalazca.

Nikola Tesla jest autorem około 125 wynalazków (i prawie 300 patentów), głównie rozmaitych urządzeń elektrycznych, z których najślawniejsze to: silnik elektryczny, prądnicą prądu przemiennego, autotransformator, dynamo rowerowe, radio, elektrownia wodna, bateria słoneczna, turbina talerzowa, transformator Tesli (rezonansowa cewka wysokonapięciowa) i świetlówka. Nikola Tesla był m.in. twórcą pierwszych urządzeń zdalnie sterowanych drogą radiową.



# ZZE dla układu otwartego



W przypadku układu otwartego trzeba koniecznie uwzględnić czynnik czasu – dlatego też sensowniej jest bilansować nie pracę i ciepło, a moc.

$$E_d = \Delta E_{ut} + E_w \quad [J] \quad / : t$$

$$\dot{E}_d = \Delta \dot{E}_{ut} + \dot{E}_w \quad \left[ \frac{J}{s} \right] = [W]$$

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{r1} + \dot{Q}$$

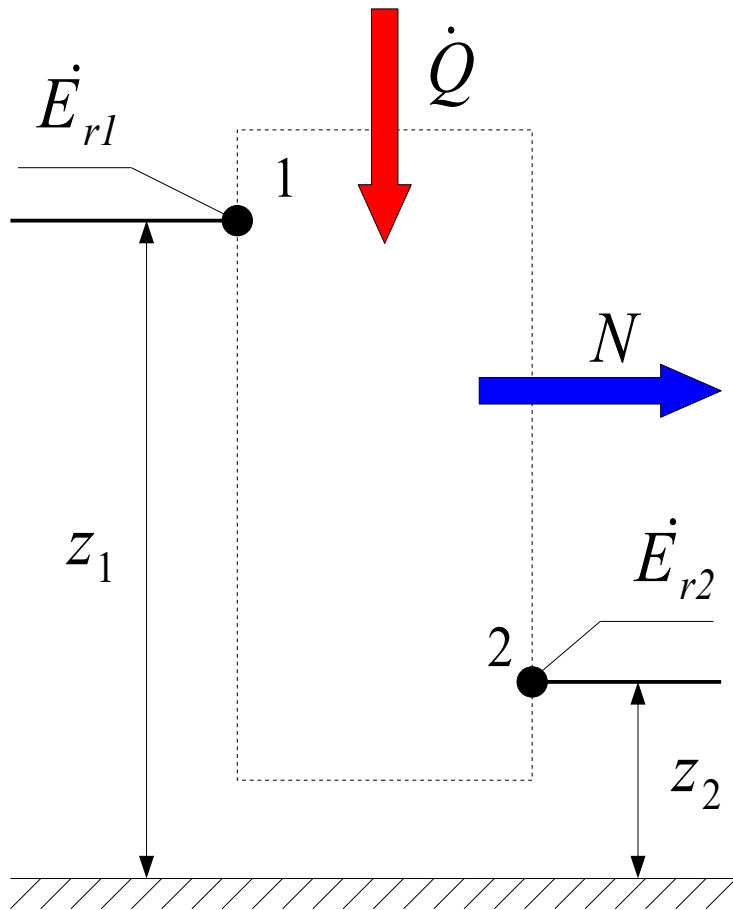
$$\Delta \dot{E}_{ut} = 0$$

$$\dot{E}_w = \dot{E}_{r2} + N$$

w stanie ustalonym  
(np. w turbinie po  
okresie rozruchu)  
temperatura elementów  
jest stała - nie zmienia  
się więc energia układu

Pojęcie energii strugi omówione było wcześniej.

# ZZE dla układu otwartego



$$\dot{E}_{r1} + \dot{Q} = \dot{E}_{r2} + N \quad [W]$$

$\dot{E}_{r1}$  - energia strugi dopływającej do układu

$\dot{E}_{r2}$  - energia strugi wypływającej z układu

$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$  - strumień ciepła dostarczany do układu  
(ale może to być również strumień ciepła odprowadzany)

$N = \frac{L}{t}$  - moc uzyskiwana z układu  
(ale może to być również moc wkładana w układ)

**Moc** – energia całkowita (ogólnie: w postaci ciepła lub pracy) odniesiona do czasu, w jakim była ona przekazywana.

# ZZE dla układu otwartego

---

$$\dot{E}_{r1} + \dot{Q} = \dot{E}_{r2} + N \quad - \text{bilans energii dla układu otwartego}$$

$$\dot{E}_{r1} = \dot{m} \cdot \left( h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot z_1 \right)$$

$$\dot{E}_{r2} = \dot{m} \cdot \left( h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot z_2 \right)$$

masa na wlocie i wylocie jest taka sama (nie pojawia się, ani nie znika w jednostce czasu) – dlatego przy symbolu masy nie ma indeksu.

$$\dot{m} \cdot \left( h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot z_1 \right) + \dot{Q} = \dot{m} \cdot \left( h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot z_2 \right) + N$$

# ZZE dla układu otwartego

---

I Zasada Termodynamiki dla układów otwartych:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \left[ (h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) \right] + N$$

$$v_1^2 - v_2^2$$

- człon pomijalnie mały,  
jeżeli różnica prędkość jest mniejsza niż 40 [m/s]

$$E_k \approx 0$$

$$z_1 - z_2$$

- człon pomijalnie mały,  
jeżeli różnica wysokości jest mniejsza niż 80 [m]

$$E_p = 0$$

ZZE dla układu otwartego, dla którego bilansuje się entalpię, ciepło i pracę w jednostce czasu, nosi nazwę Pierwszej Zasady Termodynamiki.



# ZZE dla układu otwartego

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) + N \longrightarrow \dot{H} = \dot{m} \cdot h \longrightarrow \dot{Q} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 + N$$

strumień entalpii

$$\dot{Q} = \Delta \dot{H} + N$$

Sprawdzenie jednostek:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad \left[ \frac{J}{s} \right] = [W]$$

$$\dot{H} = \dot{m} \cdot h \quad \left[ \frac{kg}{s} \cdot \frac{J}{kg} \right] = \left[ \frac{J}{s} \right] = [W]$$

$$N = \frac{L}{t} \quad \left[ \frac{J}{s} \right] = [W]$$

Uproszczona postać I ZT  
dla układów otwartych.

# Porównanie

układ zamknięty

(wzór prawdziwy dla procesu jednostkowego)

$$Q = \Delta H + L_t$$

ciepło

entalpia

praca techniczna

układ otwarty

(wzór prawdziwy dla procesu ciągłego w czasie)

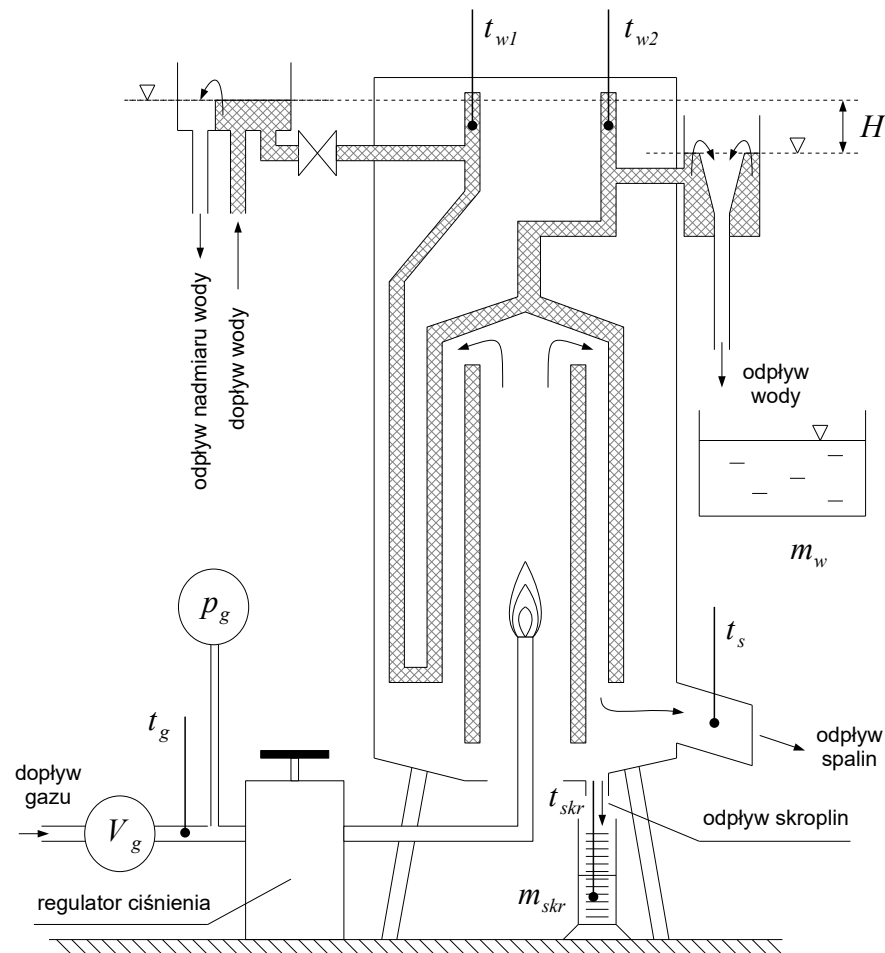
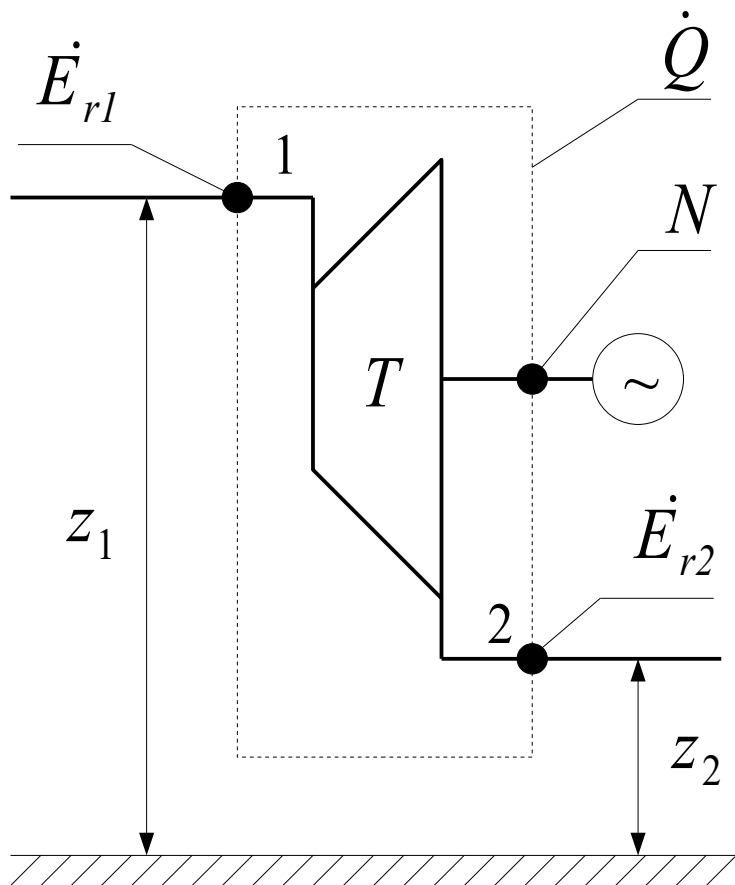
$$\dot{Q} = \Delta \dot{H} + N$$

strumień ciepła

moc

strumień entalpii  
(lub ogólniej energia strugi)

# ZZE dla układu otwartego



Podobnie jak dla układu zamkniętego, dokładne znaczenie poszczególnych członów oraz ich znaki przyjmuje się dopiero w konkretnym przypadku (porównaj bilans siłowni parowej i kalorymetru Junkresa)

# Zasady bilansowania energii

---

I Zasadę Termodynamiki należy generalnie traktować jako globalny bilans „zysków” i „strat” energii:

- z lewej strony pisząc te składniki, które dostarczają energię,
- z prawej strony pisząc te składniki, które odbierają dostarczoną energię

$$E_d = \Delta E_{ut} + E_w$$

lub przyrównując wszystkie składniki do zera, uwzględniając ich znaki.

$$E_d - E_w - \Delta E_{ut} = 0$$

# Zasady bilansowania energii

---

Układy zamknięte: I Zasada Termodynamiki jest to **bilans energii**<sup>1</sup>, w którym bierze się pod uwagę wyłącznie ciepło, pracę i energię wewnętrzną.

Układy otwarte: I Zasada Termodynamiki jest to **bilans energii w czasie**<sup>2</sup>, w którym bierze się pod uwagę wyłącznie strumień ciepła, strumień pracy (zwany również mocą) oraz energię strugi dopływającej i wypływającej.

$$\begin{array}{r} +1000 \\ -600 \\ -100 \\ -300 \\ \hline 0.0 \end{array} \quad \checkmark$$



© CanStockPhoto.com

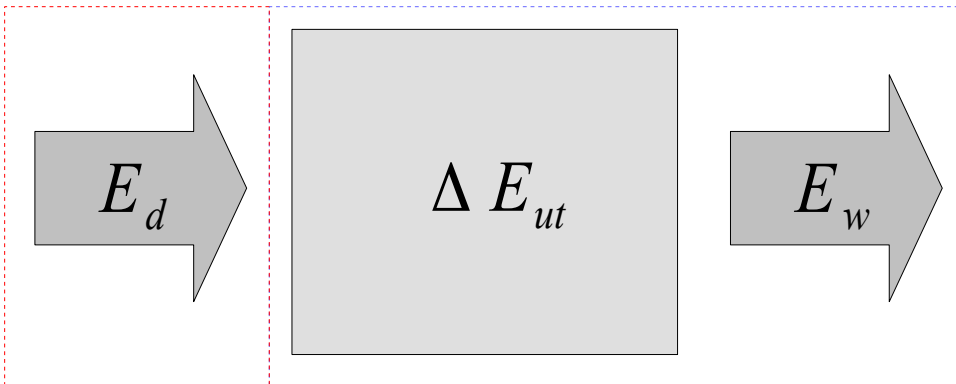
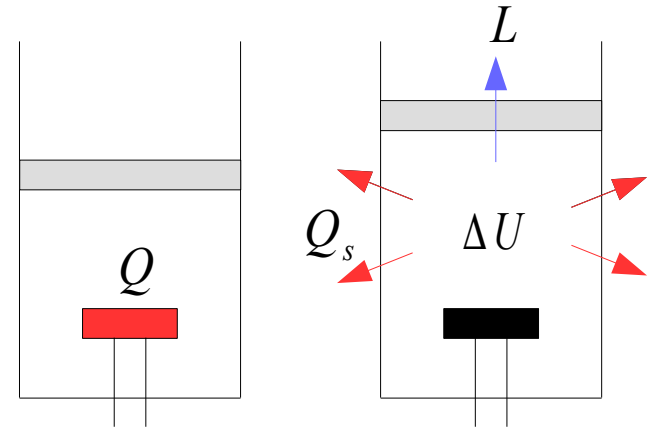
---

<sup>1</sup> czyli wszystkie składniki bilansu muszą być w [J]

<sup>2</sup> czyli wszystkie składniki bilansu muszą być w [J/s], czyli [W]

# Zasady bilansowania energii

Na gaz w cylindrze działa tłok niezmienną się siłą 7.5 [kN].  
 Opornik elektryczny umieszczony w gazie zasilono przez 40 [s]  
 prądem stałym o napięciu 120 [V] i natężeniu 2 [A].  
 Na końcu procesu stwierdzono podniesienie się tłoka o 320 [mm].  
 Jaka pracę wykonał gaz i o ile zmieniła się jego energia termiczna,  
 jeżeli podczas procesu przez ścianki cylindra odpłynęło do  
 otoczenia 500 [J] ciepła?



$$Q = \Delta U + L + Q_s$$

$$\Delta U = Q - L - Q_s$$

$$E_d = Q$$

$$\Delta E_{ut} = \Delta U$$

$$E_w = L + Q_s$$

$$Q = U \cdot I \cdot t = 120 \cdot 2 \cdot 40 = 9600$$

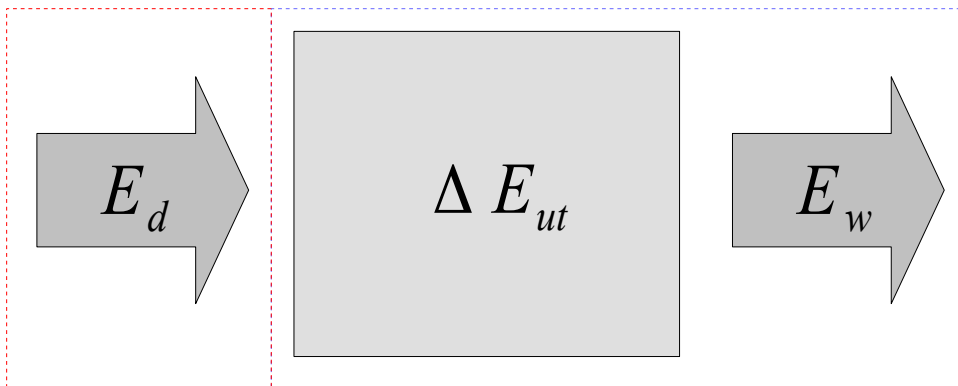
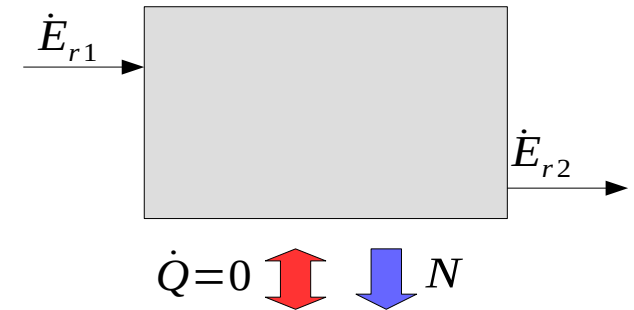
$$L = F \cdot \Delta l = 7.5 \cdot 1000 \cdot \frac{320}{1000} = 2400$$

$$\Delta U = 9600 - 2400 - 500 = 6700$$

[J]

# Zasady bilansowania energii

Silnik gazowy {bez spalania}, doskonale zaizolowany cieplnie {brak wymiany ciepła}, zasilany jest helem o jednostkowej entalpii 1560 [kJ/kg]. Hel dopływa do silnika z prędkością 25 [m/s] w ilości 0.85 [kg/s], a opuszcza system z prędkością 30 [m/s] i ma wtedy entalpię jednostkową 625 [kJ/kg]. Zmianę energii potencjalnej, między wlotem i wylotem helu pominąć. Silnik działa w stanie ustalonym w czasie {brak zmian wewnątrz układu}. Obliczyć mechaniczną moc wewnętrzną silnika {teoretyczną moc maksymalną}.



$$\dot{E}_{r1} = \dot{E}_{r2} + \dot{L}$$

$$\dot{L} = N = \dot{E}_{r1} - \dot{E}_{r2}$$

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{r1} \quad \Delta E_{ut} = 0$$

$$\dot{E}_w = \dot{E}_{r2} + \dot{L}$$

$$N = \dot{E}_{r1} - \dot{E}_{r2} = 794633.125 \quad [W]$$

# Podsumowanie

---

## Zagadnienia:

Zasada Zachowania Energii (ZZE), formy szczególne ZZE, ZZE w Termodynamice, stan termicznie ustalony i nieustalony, czas relaksacji, ZZE dla układu zamkniętego, Pierwsza Zasada Termodynamiki dla układu zamkniętego – 1 postać, konwencja znaków przepływu energii, zapalniczka tłokowa, Pierwsza Zasada Termodynamiki dla układu zamkniętego – 2 postać, perpetuum mobile pierwszego rodzaju, ZZE dla układu otwartego, Pierwsza Zasada Termodynamiki dla układu otwartego, zasady bilansowania energii.



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, 2013-2024