



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA
ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

KKE/CE - Člověk a energie

ZS 2019/2020
3. cvičení

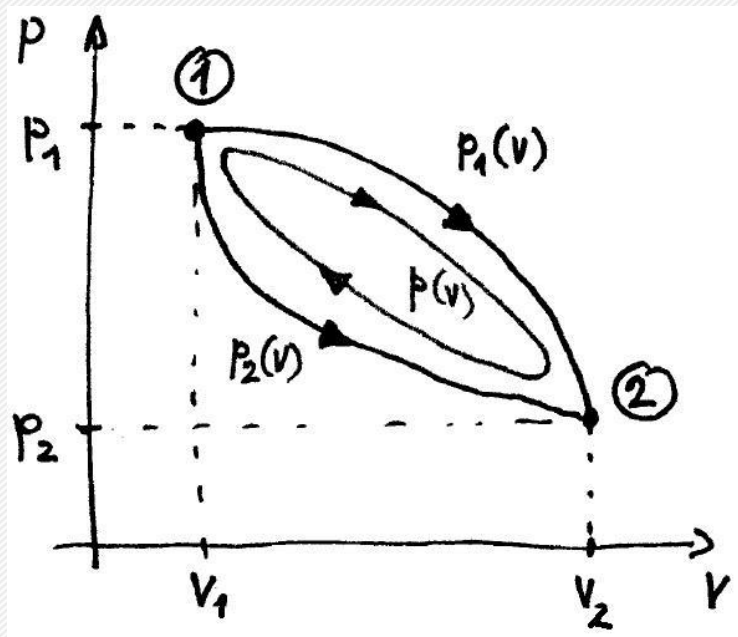
Plán cvičení

2

- Teplo a práce jako procesní veličiny
- Tepelný stroj
- Carnotův cyklus
- Entropie
- Příklady

Teplo jako procesní veličina

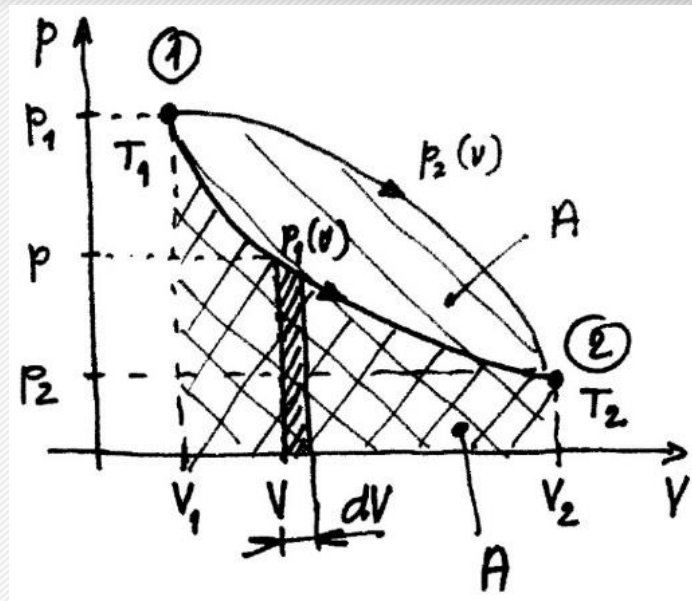
3



- $Q > 0 \rightarrow$ teplo přijaté látkou, tj. odevzdané okolí
- $Q < 0 \rightarrow$ teplo odebrané látce, tj. přijaté okolí

Práce jako procesní veličina

4



- $A > 0 \rightarrow$ práci koná plyn (soustava), tj. okolí přijímá práci
- $A < 0 \rightarrow$ práci koná okolí, tj. práci přijímá plyn (soustava)

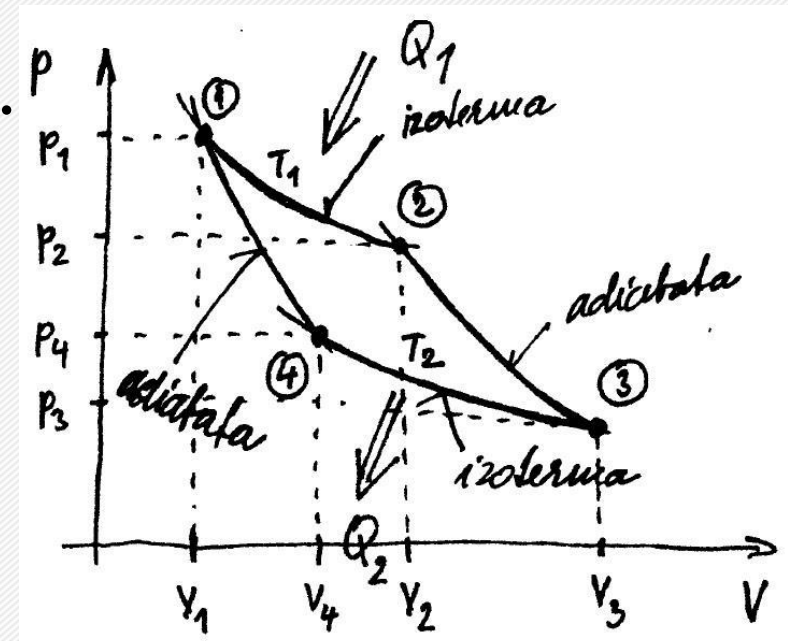
Tepelný stroj

5

- Aplikujeme-li 1. větu termodynamiky na kruhový děj získáme již dříve zmíněný zápis $A = Q$.

$$dU = dQ - dA \rightarrow \oint dU = \oint dQ - \oint dA \rightarrow A = Q$$

- Carnotův cyklus není typickým parním oběhem.



Carnotův cyklus

6

1. Izotermická expanze ($T_1 = konst.$) ze stavu 1(p_1, V_1, T_1) do stavu 2(p_2, V_2, T_2)

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

Pro vnitřní energii z kinetické teorie látek platí

$$dU = m \cdot c_V \cdot dT$$

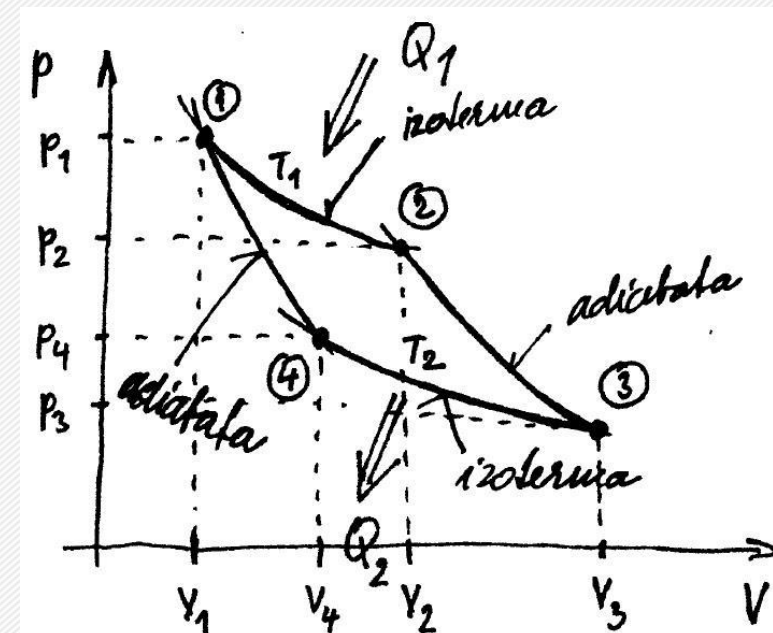
$$dU_1 = 0$$

Z 1. věty termodynamiky platí

$$dA_1 = dQ_1$$

$$A_1 = m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Čili plyn přijímá teplo a koná práci



Carnotův cyklus

7

2. Adiabatická expanze ($Q = 0$) ze stavu 2(p_2, V_2, T_2) do stavu 3(p_3, V_3, T_3)

$$dQ = 0$$

$$Q_2 = 0$$

$$p_2 \cdot V_2^\kappa = p_3 \cdot V_3^\kappa$$

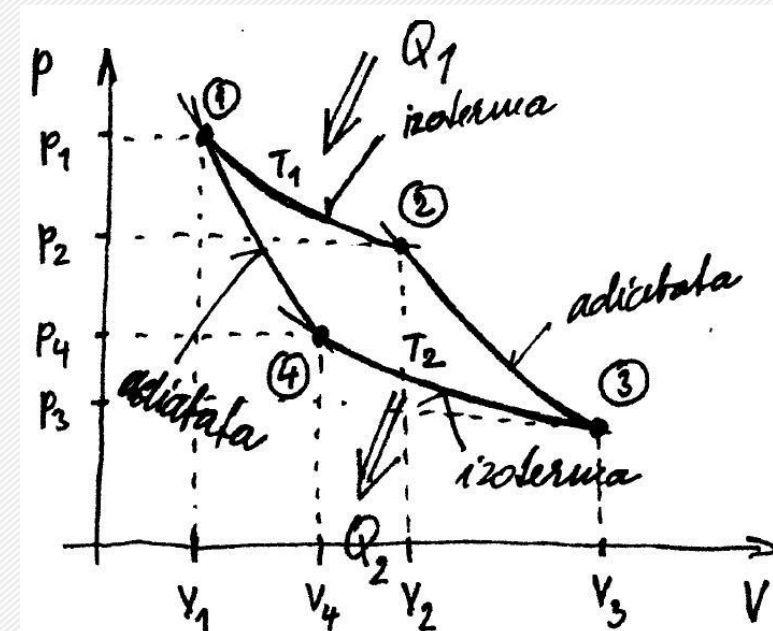
$$dA_2 = -dU_2$$

$$dU = m \cdot c_V \cdot dT$$

$$A_2 = -m \cdot c_V \cdot (T_2 - T_1)$$

$$A_2 = m \cdot c_V \cdot (T_1 - T_2)$$

Protože $T_2 < T_1 \rightarrow A_2 > 0$, a tedy plyn koná práci.



Carnotův cyklus

8

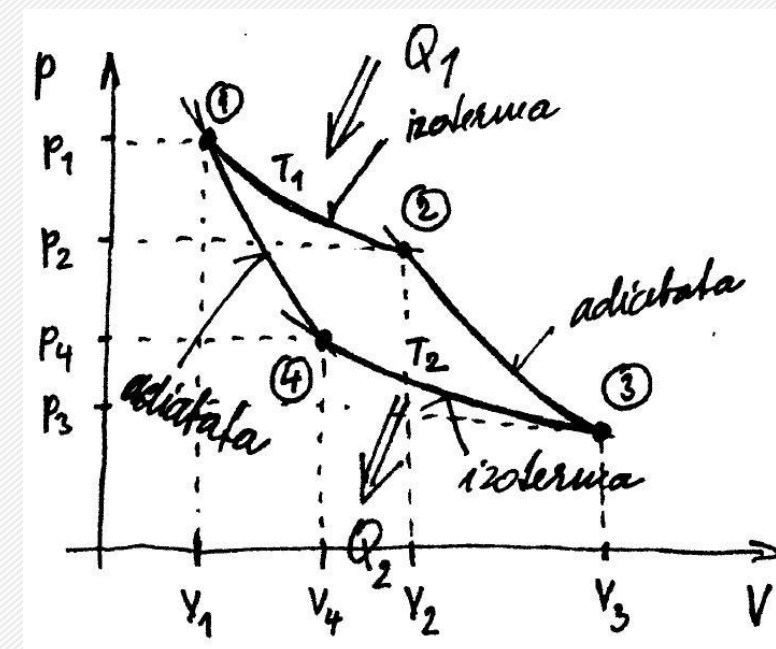
3. Izotermická komprese ($T_2 = \text{konst.}$) ze stavu 3(p_3, V_3, T_3) do stavu 4(p_4, V_4, T_4)

$$p_3 \cdot V_3 = p_4 \cdot V_4$$
$$dU = m \cdot c_V \cdot dT$$

Protože $T_2 = \text{konst.} \rightarrow dU_3 = 0$

$$dA_3 = dQ_3$$

$$A_3 = m \cdot r \cdot T_2 \cdot \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right)$$



Jelikož $V_4 < V_3 \rightarrow A_3 = Q_2 < 0$, a tedy plyn odevzdává teplo, práci koná okolí

Carnotův cyklus

9

4. Adiabatická komprese ($Q = 0$) ze stavu 4(p_4, V_4, T_4) do stavu 1(p_1, V_1, T_1)

$$dQ = 0$$

$$Q_4 = 0$$

$$p_4 \cdot V_4^\kappa = p_1 \cdot V_1^\kappa$$

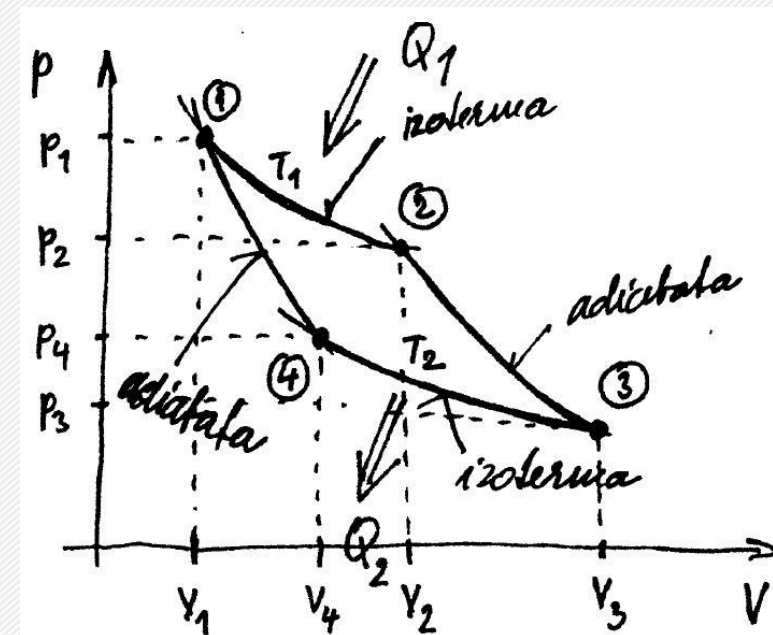
$$dA_4 = -dU_4$$

$$dU = m \cdot c_V \cdot dT$$

$$A_4 = -m \cdot c_V \cdot (T_1 - T_2)$$

$$A_4 = m \cdot c_V \cdot (T_2 - T_1)$$

Protože $T_2 < T_1 \rightarrow A_4 < 0$, a tedy práci koná okolí.



Carnotův cyklus

10

Celková práce cyklu A:

$$\begin{aligned} A &= A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \\ A &= m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + m \cdot c_V \cdot (T_1 - T_2) + m \cdot r \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) + m \cdot c_V \cdot (T_2 - T_1) \\ A &= m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + m \cdot r \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \end{aligned}$$

Dá se dokázat:

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2} \rightarrow \frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-1}$$

Tedy:

$$\begin{aligned} A &= m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + m \cdot r \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-1} = m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - m \cdot r \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \\ A &= m \cdot r \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \end{aligned}$$

Carnotův cyklus

11

Celková tepelná bilance cyklu Q:

$$\begin{aligned}Q &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \\A &= m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + 0 + m \cdot r \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) + 0 \\A &= m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + m \cdot r \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)\end{aligned}$$

Dá se dokázat:

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2} \rightarrow \frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-1}$$

Tedy:

$$\begin{aligned}Q &= m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + m \cdot r \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-1} = m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - m \cdot r \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \\Q &= m \cdot r \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)\end{aligned}$$

Carnotův cyklus

12

$$\begin{aligned}Q &= Q_1 + Q_2 \\A &= Q = Q_1 + Q_2 \\Q_1 &= A - Q_2\end{aligned}$$

Teplo Q_2 odvedené do chladiče se tedy na práci nepřemění, mluvíme o tzv. ztraceném teple, které není nikdy rovno nule.

Nelze periodicky odebírat tepelnou energii (teplo) z jednoho tělesa a přeměňovat ji na stejně velkou práci.

Teplo samovolně přechází z tělesa teplejšího na těleso chladnější a nikdy naopak.

Carnotův cyklus

13

- Obecná účinnost tepelného stroje

$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

- Účinnost Carnotova cyklu

$$\eta_c = \frac{\text{vykonaná práce}}{\text{dodaná tepelná energie}} = \frac{m \cdot r \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1} < 1$$

Carnotův cyklus

14

Účinnost všech vratných Carnotových cyklů (pracujících se stejnými teplotami), je stejná a závisí pouze na těchto teplotách.

$$\eta_c = \frac{A}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

Tepelné stroje pracující s libovolnými nevratnými cykly v témže teplotním rozsahu mají účinnost nižší.

$$\eta = \frac{A}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \eta_c$$

Entropie (S)

15

- Entropie je jedním ze základních a nejdůležitějších pojmů ve fyzice
- Vyskytuje se všude tam, kde hovoříme o pravděpodobnosti
- Říká se, že to je „míra neuspořádanosti“, což není jednoznačné
- Jedná se však o „míru neurčitosti systému“
- Nevratné reálné děje (mohou probíhat pouze jedním směrem - od počátečního stavu ke koncovému stavu) jsou spojeny s neustálým růstem entropie - zvyšuje se míra neurčitosti (neuspořádanosti) systému
- Vratné děje mohou probíhat oběma směry z počátečního do koncového stavu a zpět (tyto děje jsou pouze ideální)
- Princip růstu entropie v izolované soustavě je nejobecnější matematickou formulací 2. věty termodynamiky. Obecně lze říci, že procesy mohou probíhat takto:

$$\Delta S > 0$$

$$\Delta S = 0$$

$$\Delta S < 0$$

- U přirozeného procesu však bude platit pouze:

$$\Delta S \geq 0$$

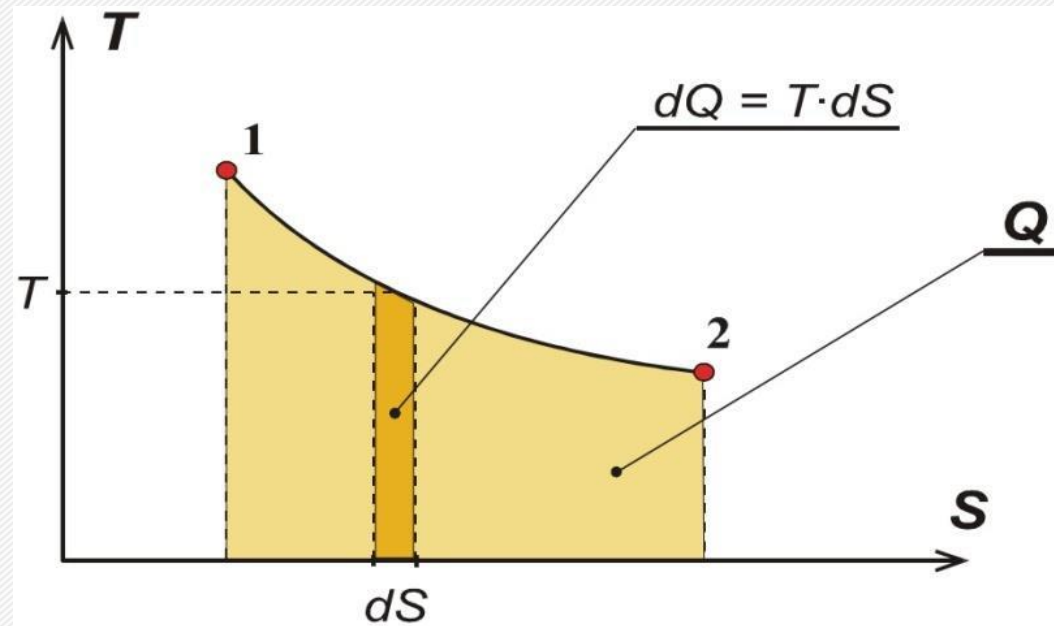
Ačkoliv může platit $\Delta S < 0$, tak se jedná pouze o lokální hodnotu, celková hodnota entropie vždy poroste

Entropie (S)

16

- Stejně jako ostatní stavové veličiny, je entropie také vhodná k popisu stavů termodynamických soustav.

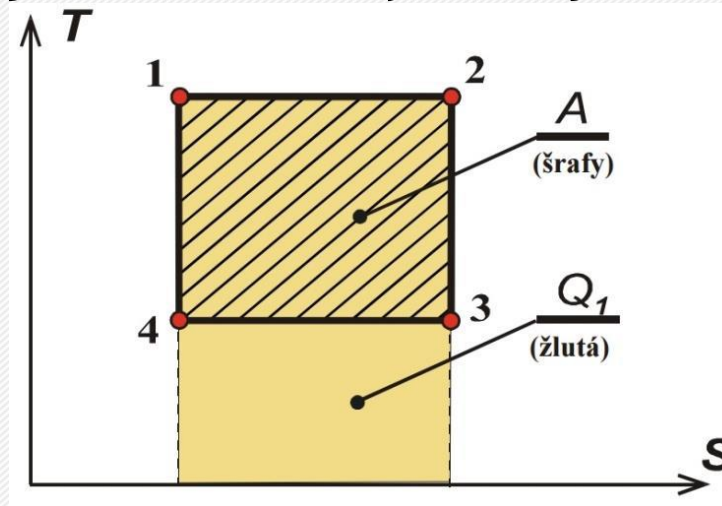
$$dQ = T \cdot dS$$



Entropie (S)

17

- Carnotův kruhový cyklus v T-S diagramu, který se stává ze dvou dějů izotermických a dvou dějů adiabatických - tj. izoentropických.

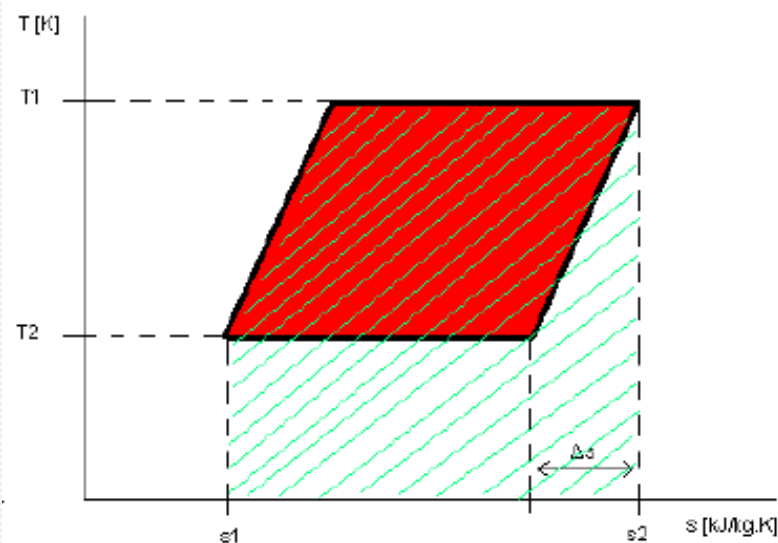


$$\eta_c = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_p - Q_o}{Q_p} = \frac{T_1 \cdot (S_2 - S_1) - |T_2 \cdot (S_1 - S_2)|}{T_1 \cdot (S_2 - S_1)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Příklad č.1

18/26

Obečný tepelný cyklus (viz Obr. 2) pracuje mezi teplotami $t_1 = 450^\circ \text{C}$ a $t_2 = 100^\circ \text{C}$ a entropiemi $s_1 = 1,56 \text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $s_2 = 6,82 \text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Jaká je účinnost cyklu, jestliže přírůstek entropie vlivem ztrát je $\Delta s = 1,59 \text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$?



Obr. 2 - Obečný cyklus

Příklad č.2

19

- V kalorimetru o tepelné kapacitě $220 \frac{J}{K}$ je $300ml$ vody o teplotě $20^{\circ}C$. Do vody hodíme ocelový předmět o teplotě $470^{\circ}C$. Hmotnost předmětu je $150g$. Určete výslednou teplotu soustavy (voda, kalorimetr, ocel) po ustálení teploty. Měrná tepelná kapacita vody je $4180 \frac{J}{K \cdot kg}$, měrná tepelná kapacita oceli je $469 \frac{J}{K \cdot kg}$.

Příklad č.3

20

- Do 5l vody, která má teplotu 18°C , hodím 300g měděný váleček o teplotě 70°C . O kolik stupňů se voda ohřeje po ustálení teploty? Předpokládejme, že tepelná výměna nastane pouze mezi vodou a válečkem. Měrná tepelná kapacita vody je $4180 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}}$, měrná tepelná kapacita mědi je $383 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}}$.

Příklad č.4

21

- Kolik bude stát ohřátí 1l vody na čaj v rychlovarné konvici? Vodu budeme ohřívat z 18°C na 100°C .
Měrná tepelná kapacita vody je $4180 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}}$, příkon rychlovarné konvice je 2000W , účinnost rychlovarné konvice je 85%. Cena za kilowatthodinu je $4,61\text{Kč}$.

Příklad č.5

22

- Plyn v tepelném motoru přijal od ohříváče $0,5\text{MJ}$ tepla a chladiči odevzdal 350kJ tepla.
 - a) Jaká je účinnost tohoto motoru?
 - b) Jakou celkovou práci motor vykonal při 10 000 cyklech?

Kahoot!

23

www.kahoot.it

Děkuji za pozornost