



Termomechanika – cvičení 3

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Obsah

Vnitřní energie

Entalpie

Absolutní a technická práce

První zákon termodynamiky



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



VNITŘNÍ ENERGIE



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Vnitřní energie je celková energie bez vnější kinetické ($= \frac{1}{2}mv^2$) a potenciální energie ($= mgy$)

Př.: Cisterna převážející palivo...

stojící cisterna



$$E_k = 0 \wedge E_p = 0$$

cisterna jedoucí po rovině



$$E_k \neq 0 \wedge E_p = 0$$

cisterna jedoucí do kopce



$$E_k \neq 0 \wedge E_p \neq 0$$

... kinetická i potenciální energie paliva se mění, ale vnitřní energie zůstává neměnná!



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

vnitřní energie:

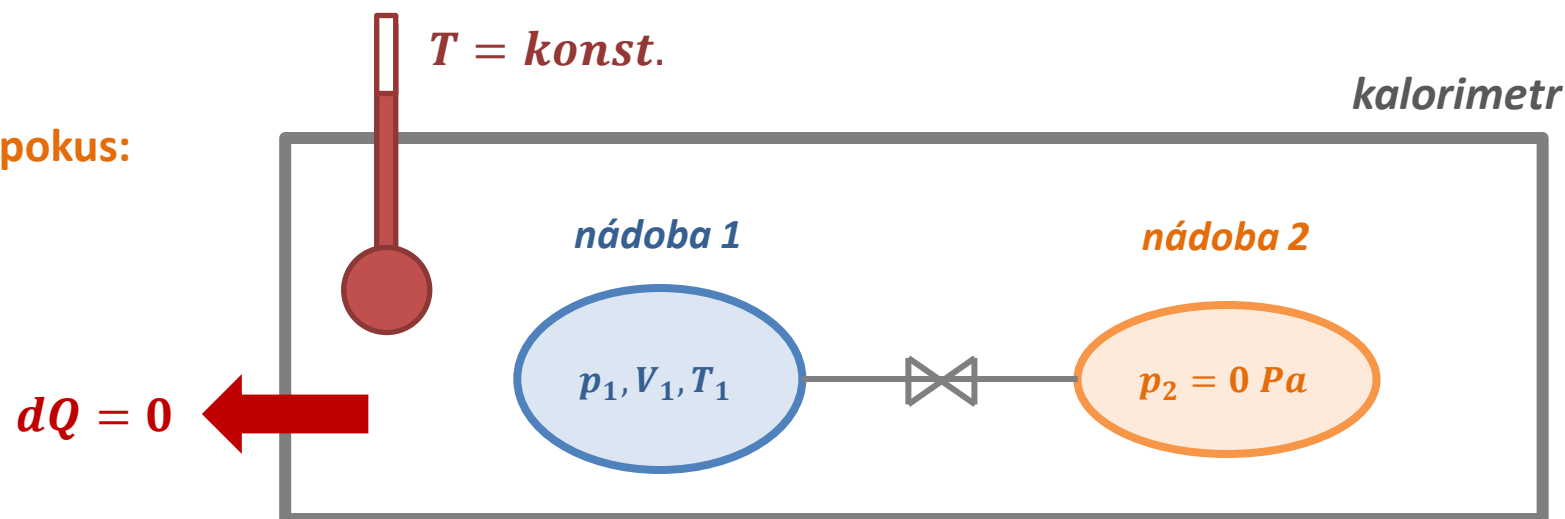
$U [J]$

měrná vnitřní energie:

$u [J \text{ kg}^{-1}]$

stavová veličina $\rightarrow U = U(p, V, T)$

Jouleův pokus:



Do vodní lázně uvnitř tepelně izolovaného termostatu vložil 2 nádoby, jednu s plynem, druhou vakuovanou. Po přepuštění plynu do vakuované nádoby se teplota lázně nezměnila, tedy se nezměnila ani uvnitř nádob. Protože do lázně nepřešlo žádné teplo, nemohla se změnit ani vnitřní energie plynu uvnitř nádob. Při tom se změnil tlak a objem. Tedy p a V nemají vliv na U , vliv může mít jen teplota T .

Ačkoliv je U stavovou veličinou, závisí pouze na teplotě $\rightarrow U = U(T)$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Měrná vnitřní energie ideálního plynu

$$u = c_v T$$

měrná vnitřní energie [J kg⁻¹] *termodynamická teplota [K]* *měrná tepelná kapacita při konst. objemu [J kg⁻¹ K⁻¹]*

$$u = \frac{U}{m}$$

vnitřní energie [J] *hmotnost [kg]*

Změna měrné vnitřní energie

$$\Delta u = c_v \Delta T$$

Diferenciálně malá změna měrné vnitřní energie

$$du = c_v dT$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

ENTALPIE



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



entalpie: $H [J]$
měrná entalpie: $h [J \text{ kg}^{-1}]$

stavová veličina $\rightarrow H = H(p, V, T)$

$$H = U + pV$$

součin tlaku (p) a objemu (V) = vtlačovací práce $[J]$

vnitřní energie $[J]$

$$h = u + pv$$

součin tlaku (p) a měrného objemu (v) = měrná práce $[J \text{ kg}^{-1}]$

měrná vnitřní energie $[J \text{ kg}^{-1}]$

Pozn.: T určuje vnitřní tepelnou energii plynu (tj. U); součin pV určuje mechanickou energii plynu



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Měrná entalpie v diferenciálním tvaru - odvozeno z definice entalpie

$$dh = d(u + pv)$$

$$dh = du + d(pv) = du + pdv + vdp$$

$$dh = du + p dv + v dp$$

diferenciálně malá změna tlaku [Pa]

diferenciálně malá změna měrného objemu [m³ kg⁻¹]

Měrná entalpie v diferenciálním tvaru - odvozeno z definice entalpie s využitím stavové rovnice

$$dh = d(u + pv) = d(u + rT)$$

Pozn.: ze stavové rovnice ideálního plynu vyplývá, že $pv = rT$

$$dh = du + d(rT) = du + rdT + Tdr$$

Pozn.: r je pro daný plyn konstantou, tudíž $dr = 0$

$$dh = du + rdT = c_v dT + rdT$$

Pozn.: $du = c_v dT$ viz slide 8

$$dh = (c_v + r)dT = c_p dT$$

Pozn.: Mayerův vztah (minulé cvičení) říká, že: $r = c_p - c_v$

$$dh = c_p dT$$



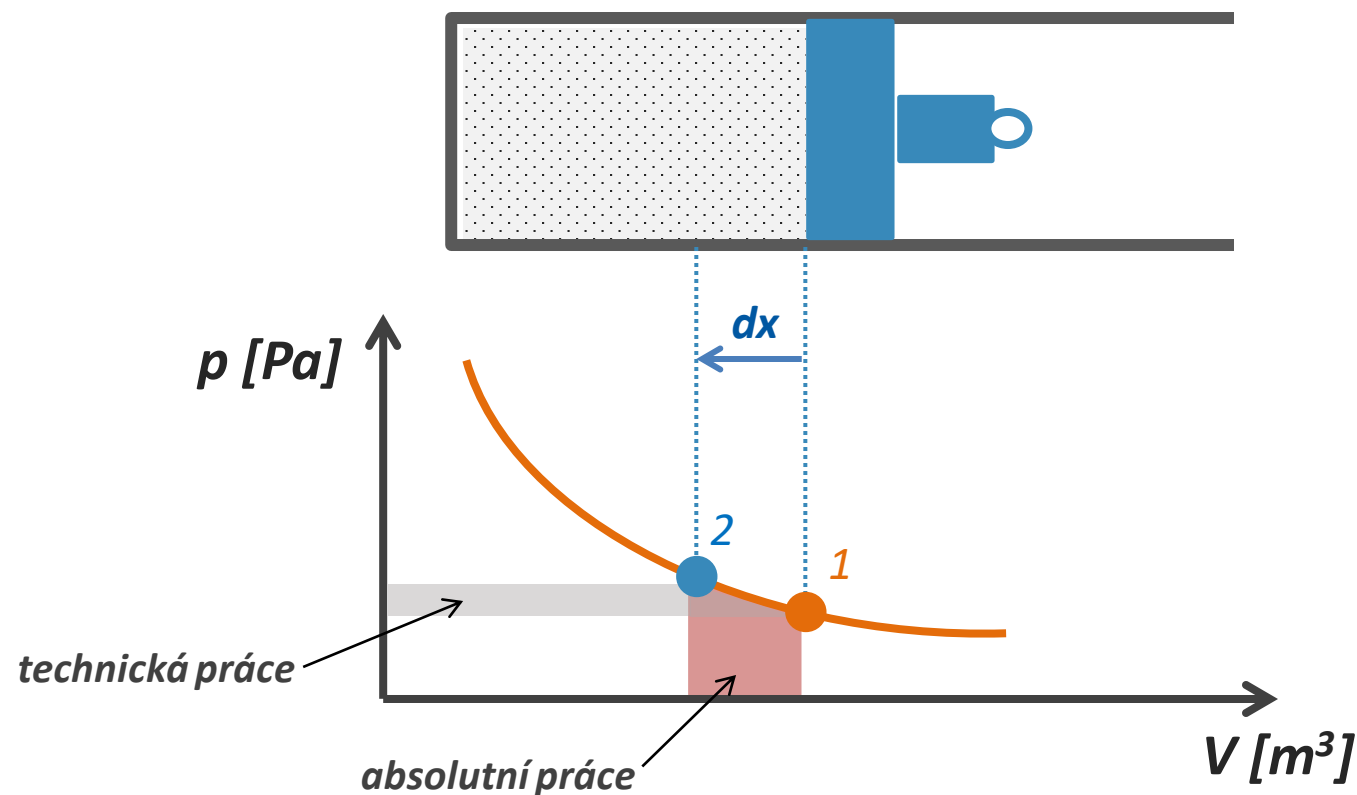
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

ABSOLUTNÍ (OBJEMOVÁ) A TECHNICKÁ PRÁCE



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání





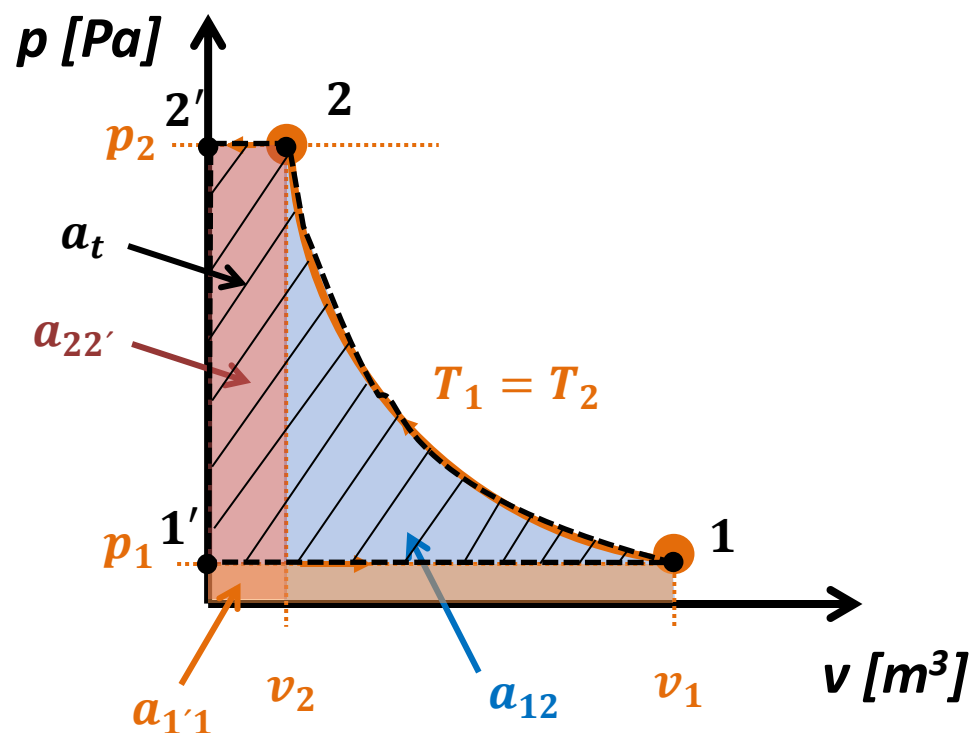
- Absolutní práce udává objemovou práci plynu a její velikost odpovídá ploše pod zobrazenou křivkou k ose objemu v p-V diagramu
- Technická práce udává tlakovou práci plynu a její velikost odpovídá ploše vlevo od zobrazené křivky k ose tlaku v p-V diagramu

▪ Absolutní práce	$dA = p dV [J]$	▪ Měrná absolutní práce	$da = p dv [J kg^{-1}]$
▪ Technická práce	$dA_t = -V dp [J]$	▪ Měrná technická práce	$da_t = -v dp [J kg^{-1}]$



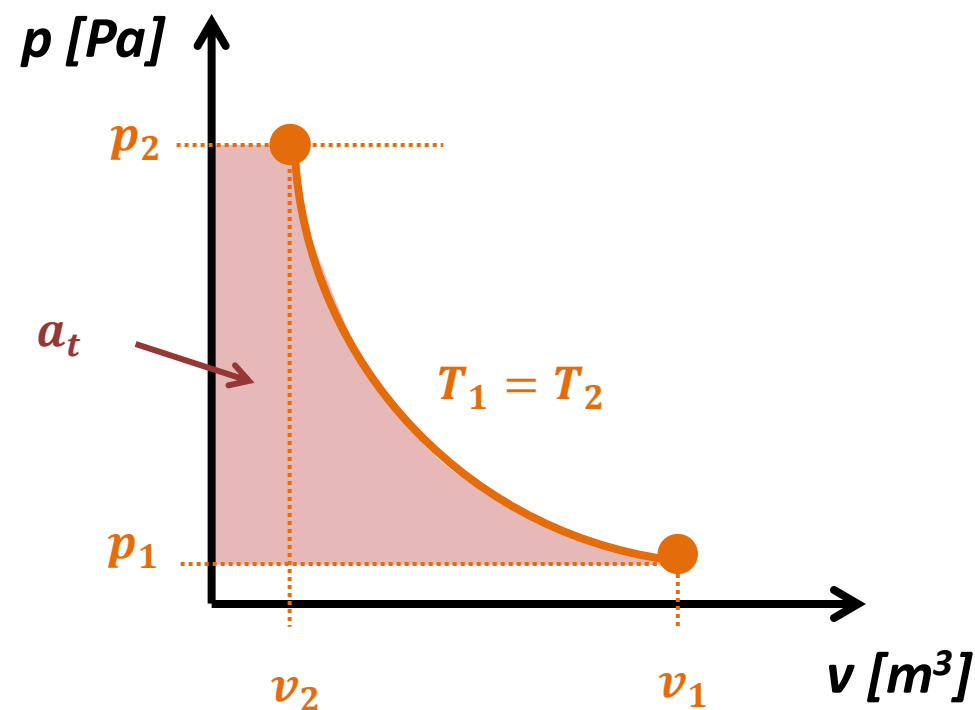
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Technická práce



$$a_t = a_{1'1} + a_{12} + a_{22'}$$

$$a_t = \int_{v_1}^{v_1'} p_1 dv + \int_{v_1'}^{v_2} p dv + \int_{v_2}^{v_2'} p_2 dv$$



$$da_t = -v dp$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

POZOR → technická i absolutní práce závisí na integrační cestě → da , resp. da_t není totální diferenciál

PLATÍ:
$$\left\{ \begin{array}{l} a_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv \equiv \int_1^2 p \, dv \\ a_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} v \, dp \equiv - \int_1^2 v \, dp \end{array} \right.$$

NELZE ovšem psát následující:

$$\begin{array}{l} a_{12} = a_2 - a_1 \\ a_{t12} = a_{t2} - a_{t1} \end{array}$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

PRVNÍ ZÁKON TERMODYNAMIKY



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

„Přivedené teplo termodynamické soustavě způsobí zvětšení její vnitřní energie a konání absolutní práce.“

1. termodynamický zákon ve formě s vnitřní energií:

$$dq = du + da = du + p dv$$

1. termodynamický zákon ve formě s entalpií:

$$dq = dh + da_t = dh - v dp$$

Teplo do TS přivedené je kladné (+), odvedené záporné (-).

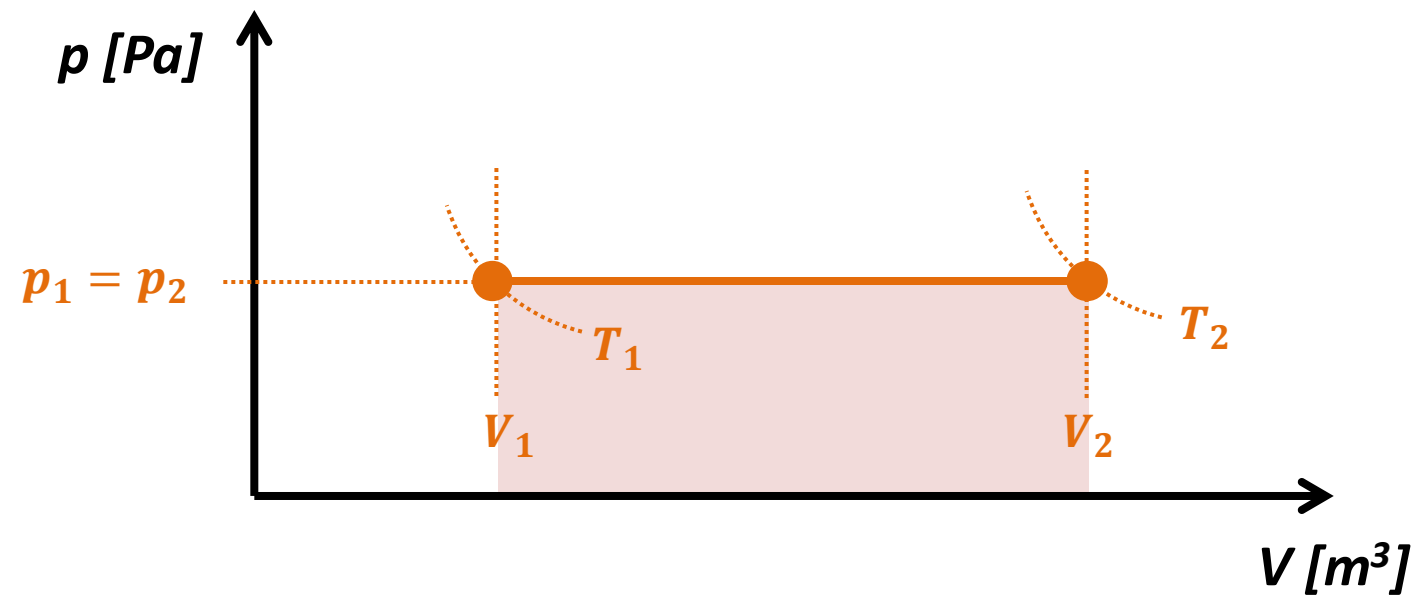
Práce vykonaná TS je kladná (+), práce dodaná TS je záporná (-).

Užitím správných rovnic lze vyjádřit množství sdíleného tepla a vykonané práce termodynamické soustavy pro jednotlivé vratné změny – viz následující slidy



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Isobarická změna stavu & 1. zákon termodynamiky



Měrná technická práce:

$$da_t|_{p=\text{konst}} = -v dp|_{p=\text{konst}} = 0$$

Měrná absolutní (objemová) práce:

$$da|_{p=\text{konst}} = p dv \rightarrow a_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p \int_1^2 dv = p (v_2 - v_1)$$

Přivedené nebo odvedené teplo:

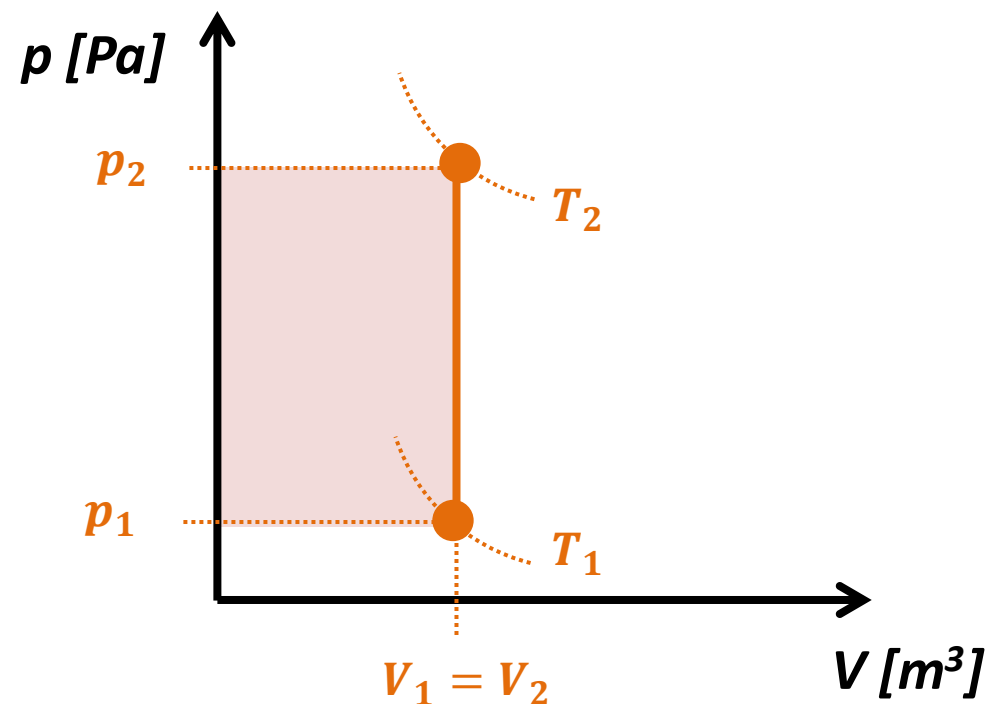
$$dq|_{p=\text{konst}} = dh + da_t|_{p=\text{konst}} = dh = c_p dT$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Isochorická změna stavu & 1. zákon termodynamiky



Měrná absolutní (objemová) práce :

Měrná technická práce:

Přivedené nebo odvedené teplo:

$$da|_{v=\text{konst}} = p dv|_{v=\text{konst}} = 0$$

$$da_t|_{v=\text{konst}} = -v dp \rightarrow a_{t12} = \int_{p_1}^{p_2} -v dp = -v \int_1^2 dp = -v (p_2 - p_1)$$

$$dq|_{v=\text{konst}} = du + da|_{v=\text{konst}} = du = c_v dT$$



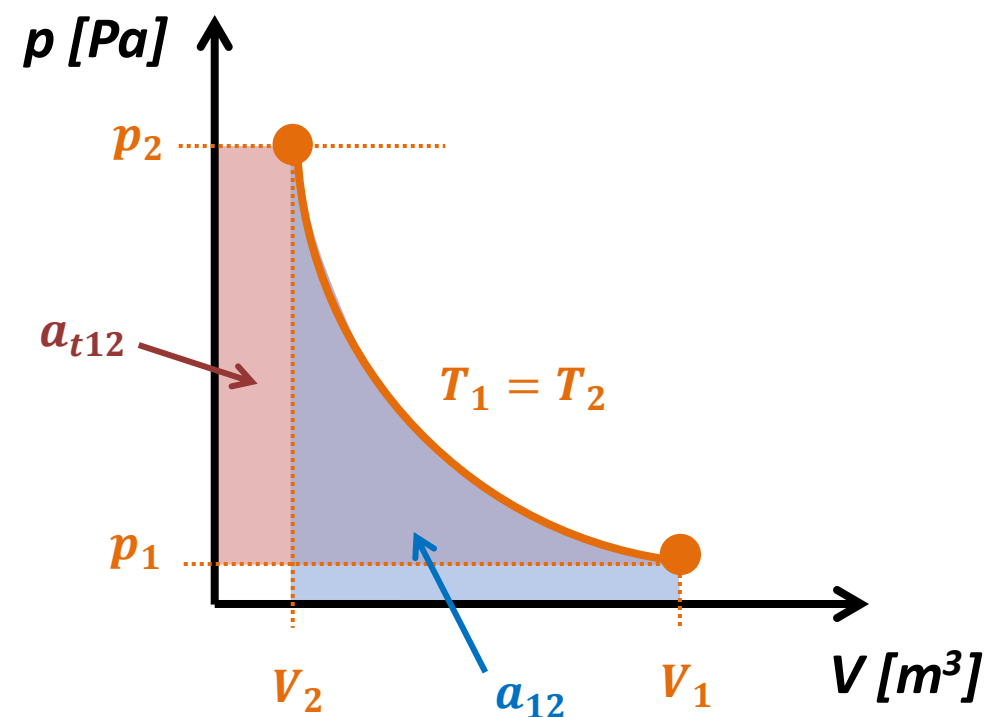
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Isotermická změna stavu & 1. zákon termodynamiky

$$\left. \begin{aligned} dq &= du + da = c_v dT + da \\ dq &= dh + da_t = c_p dT + da_t \end{aligned} \right\} T = \text{konst.} \rightarrow dT = 0$$

$$\left. \begin{aligned} dq &= da \\ dq &= da_t \end{aligned} \right\} dq|_{T=\text{konst}} = da|_{T=\text{konst}} = da_t|_{T=\text{konst}}$$



Velikost přivedeného nebo odvedeného tepla je rovna velikosti absolutní nebo technické práce.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Měrná absolutní (objemová) práce a_{12} & měrná technická práce a_{t12} & měrné přivedené nebo odvedené teplo q_{12} u izotermické vratné změny stavu ideálního plynu:

$$da = p dv \rightarrow a_{12} = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{rT}{v} dv = rT \int_1^2 \frac{dv}{v}$$

$$a_{12} = rT [\ln v]_1^2 = rT (\ln v_2 - \ln v_1)$$

$$a_{12} = a_{t12} = q_{12} = rT \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Pozn.: Z grafického řešení této úlohy (viz diagram na předchozím slidu) plyne, že plocha mezi křivkou (1-2) a osou objemů V je stejná jako plocha mezi křivkou (1-2) a osou tlaků p . Tedy platí, že $a_{12}=a_{t12}$.



Příklad 1

1 [kg] plynu při izobarickém ohřevu o 710 [°C] z teploty 40 [°C] vykonal práci 184.5 [kJ.kg-1]. Vypočítejte molární hmotnost plynu, množství přivedeného tepla a změnu vnitřní energie.

Dáno: $\Delta T = 710 [K]$, $t_1 = 40 [^{\circ}C]$, $a_{12} = 184.5 [kJ kg^{-1}]$

Určit: $Q_{12} = ? [J]$, $M = ? [kg mol^{-1}]$, $\Delta U = ? [J]$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Povšimněte si, že v zadání příkladu je napsáno, že se jedná o 1 kg látky, a tudíž je výhodné celý příklad spočítat přes měrné veličiny.

Pro výpočet molární hmotnosti vyjdeme z definičního vztahu entalpie

$$dh = d(u + pv) = du + p dv + v dp \Big|_{p=\text{konst.}} = du + p dv = du + da$$

$$da = dh - du = (c_p - c_v)dT = r dT = \frac{R_m}{M} dT$$

$$a_{12} = \frac{R_m}{M} \int_1^2 dT = \frac{R_m}{M} \Delta T$$

Pozn.: využijeme vztahy z minulých cvičení

$$du = c_v dT; dh = c_p dT; r = c_p - c_v; r = \frac{R_m}{M}$$

$$M = \frac{R_m \Delta T}{a_{12}} = \frac{8.314 * 710}{184.5 * 10^3} \cong 0.032 \text{ kg mol}^{-1}$$



Z vypočtené molární hmotnosti plynu lze předpokládat, že se jedná o plyný kyslík (tj. O₂), čili Poissonova konstanta bude $\kappa = 1.4$

Dále vypočítáme množství přivedeného tepla z 1. termodynamického zákona

$$dq = dh - v dp \Big|_{p=\text{konst}} = dh = c_p dT$$

Pozn.: výhodné je vyjít ze vztahu s entalpií a technickou prací, neboť u izobarického děje je technická práce nulová

$$q_{12} = c_p \int_1^2 dT = c_p \Delta T = \frac{\kappa r}{\kappa - 1} \Delta T = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{R_m}{M} \Delta T = \frac{1.4}{1.4 - 1} \frac{8.314}{0.032} * 710 \cong 645.6 \text{ kJ kg}^{-1} \Rightarrow Q_{12} = q_{12} * m = 645.6 \text{ kJ}$$

Změnu vnitřní energie lze vyjádřit z 1. termodynamického zákona, či dle definičního vztahu vnitřní energie

$$du = c_v dT \rightarrow u_{12} = c_v \int_1^2 dT = c_v \Delta T = \frac{r}{\kappa - 1} \Delta T = \frac{1}{\kappa - 1} \frac{R_m}{M} \Delta T$$

$$u_{12} = \frac{1}{1.4 - 1} \frac{8.314}{0.032} * 710 = 461.2 \text{ kJ kg}^{-1} \Rightarrow U_{12} = u_{12} * m = 461.2 \text{ kJ}$$



Příklad 2

V kompresoru se sacím objemem 4.3 [l] se izotermicky stlačuje vzduch z 0.096 [MPa] na 0.34 [MPa]. Určete hmotnostní průtok vzduchu, objem po stlačení, potřebnou práci a výkon kompresoru, jestliže se kompresor otáčí 500 [min⁻¹].

Dáno: $V_s = 4.3 \text{ [l]}, p_1 = 0.096 \text{ [MPa]}, p_2 = 0.34 \text{ [MPa]}, t = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}, n = 500 \text{ [min}^{-1}\text{]}, r = 287.04 \text{ [J kg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$

Určit: $\dot{m} =? \text{ [kg s}^{-1}\text{]}, V_2 =? \text{ [m}^3\text{]}, A_t =? \text{ [J]}, P =? \text{ [W]}$

V první řadě je třeba si uvědomit, že jde o izotermický děj, jak je napsáno v zadání. Pak je nutné si uvědomit, na co je zaměřené zadání (co se má vypočítat) a v jakých jednotkách bude výsledek. Hmotnostní průtok vzduchu [kg.s^{-1}]; objem po stlačení $V_2=? \text{ [m}^3\text{]}$ a potřebnou práci a výkon kompresoru. U posledních bodů, je dobré se zastavit a uvědomit si některá fakta. Prvním je, že při izotermickém ději je technická práce rovna absolutní $a_{12}=a_{t12} \text{ [J]}$. Druhým faktem je, že se jedná o kompresor, tedy práce se musí dodávat. Dodaná práce má záporné znaménko. Lze předpokládat, že výkon vyjde též v záporných hodnotách.



Hmotnostní průtok vzduchu kompresorem je množství vzduchu, které prochází kompresorem za jednotku času (v základních jednotkách to bude $kg.s^{-1}$). K proudění vzduchu na vstupu do kompresoru tedy dojde následkem otáčení lopatek, tj. výpočet pro hmotnostní průtok se bude řídit rovnicí:

$$\dot{m} = m * n$$

V klidovém stavu má kompresor tzv. sací objem. Ze stavové rovnice dopočítáme hmotnost vzduchu na vstupu:

$$p_1 V_1 = m r T_1 \rightarrow m = \frac{p_1 V_1}{r T_1}$$
$$m = \frac{0.096 * 10^6 * 4.3 * 10^{-3}}{287.04 * (20 + 273.15)} \cong 4.91 * 10^{-3} \text{ kg}$$

Dopočítáme hmotnostní tok:

$$\dot{m} = m * n = 4.91 * 10^{-3} * \frac{500}{60} \cong 0.041 \text{ kg s}^{-1}$$

Objem po stlačení dopočítáme ze zákonitostí izotermického děje (viz minulé cvičení):

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \rightarrow V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{0.096 * 10^6 * 4.3 * 10^{-3}}{0.34 * 10^6} = 1.21 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

Zbývá dopočítat práci kompresoru a jeho výkon. V případě izotermické změny platí, že:

$$a_{t12} = a_{12}$$



Můžeme tedy počítat dle vztahu pro technickou nebo pro absolutní práci, níže je uveden postup při užití vztahu pro absolutní práci:

$$da = p dv \rightarrow a_{12} = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{rT}{v} dv = rT \int_1^2 \frac{dv}{v} = rT \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$a_{12} = 287.04 * (20 + 273.15) * \ln \frac{1.21 * 10^{-3}}{4.3 * 10^{-3}} = -106\,696.4 \text{ J kg}^{-1}$$

Spočetli jsme měrnou absolutní práci, ale nás zajímá absolutní práce:

$$A_{12} = m * a_{12} = 4.91 * 10^{-3} * (-106\,696.4) \cong -523.9 \text{ J}$$

Zbývá dopočítat výkon kompresoru:

$$P = \dot{m} * a_{t12} = 0.041 * (-106\,696.4) = -4\,374.6 \text{ W}$$



Příklad 3

Pod pístem spočívajícím na zarážkách je vzduch o objemu $0.3 \text{ [m}^3\text{]}$, tlaku 0.15 [MPa] , teplotě $20 \text{ [}^\circ\text{C]}$. Přívodem tepla začne tlak plynu pod pístem stoupat a při hodnotě 0.3 [MPa] se tlaková síla působící na píst vyrovná s tíhou pístu a píst začne stoupat, dokud se objem vzduchu pod pístem nezvětší na trojnásobek původního objemu. Vypočítejte konečnou teplotu vzduchu po expanzi, vykonanou absolutní a technickou práci a množství tepla nutné pro vykonání změny. Proveďte kontrolu pomocí první věty termodynamické.

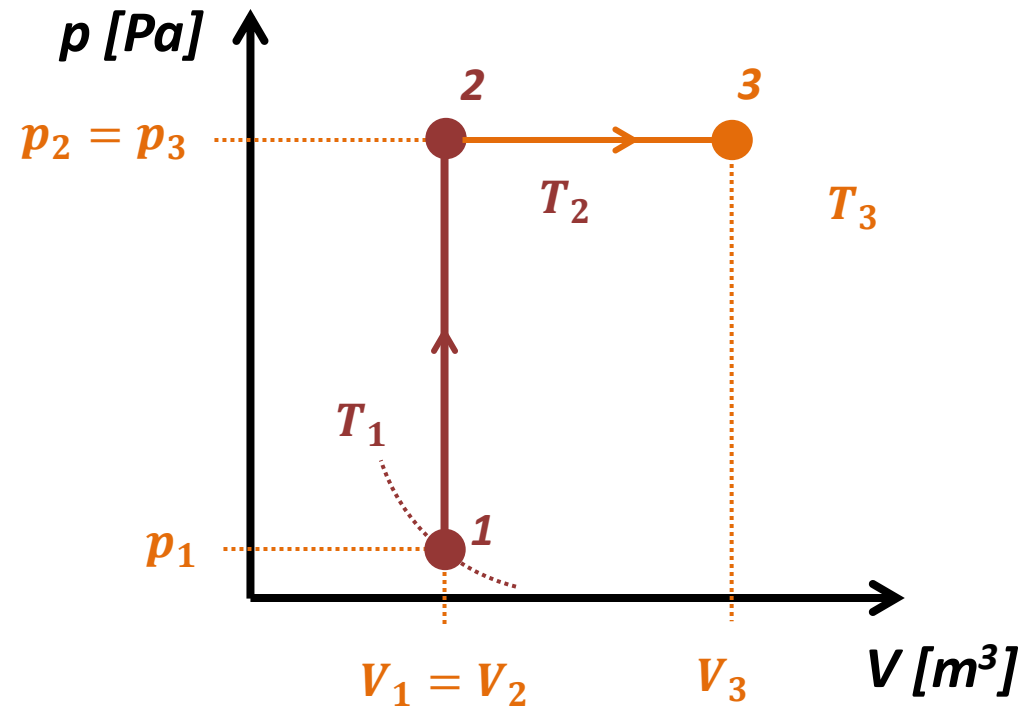
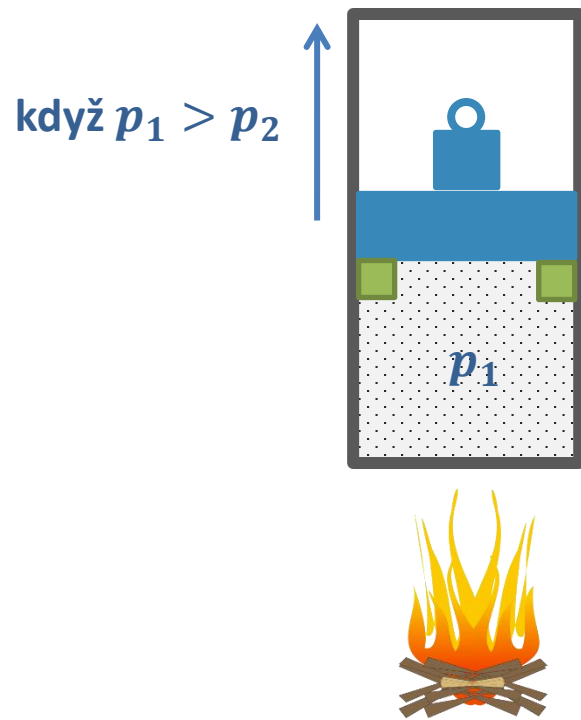
Dáno: $V_1 = 0.3 \text{ [m}^3\text{]}, p_1 = 0.15 \text{ [MPa]}, t_1 = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}, p_2 = 0.3 \text{ [MPa]}, r = 287.04 \text{ [J kg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}, V_3 = 3V_1$

Určit: $t_3 = ? \text{ [}^\circ\text{C]}, A_{13} = ? \text{ [J]}, A_{t13} = ? \text{ [J]}, Q_{13} = ? \text{ [J]}$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Před řešením příkladu je třeba si uvědomit, že nejde o jeden samostatný děj. Odpovědi, o jaké děje jde, je třeba hledat v zadání příkladu. V zadání se objeví věta: „...tlaková síla působící na píst vyrovná s tíhou pístu a píst začne stoupat...“, to znamená, že před tím, než se píst pohne, dojde k nějaké změně. Jakožto poloha pístu se nezmění, nezmění se ani objem ale teplo se přivádí. To znamená, že dojde k isochorické změně. Pak píst začne stoupat a objem se zvětší na trojnásobek původního objemu. Při stálém přívodu tepla se předpokládá i nárůst teploty, tedy se musí jednat o izobarický děj. Celkový děj se tedy bude skládat z jedné isochorické a jedné isobarické změny.



1 → 2 ... isochorická změna
2 → 3 ... isobarická změna



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Dále je nutné si uvědomit, které veličiny není nutno určit výpočtem, ale které plynou ze zadání. První změnou je změna izochorická. To znamená, že tlak i teplota budou na konci děje vyšší, ale objem zůstane konstantní tj. $V_1 = V_2 = 0.3 \text{ [m}^3\text{]}$. Dál je ze zadání patrné, že koncový objem bude třikrát větší než objem původní, tedy $V_3 = 3V_1$. V zadání je také uvedeno, že velikost tíhové síly pístu se vyrovná s velikostí tlakové síly při hodnotě 0.3 [MPa] . To znamená, že tlak na konci izochorického a na začátku isobarického děje bude 0.3 [MPa] . Bude tedy platit $p_2 = 0.3 \text{ [MPa]}$ a tedy $p_2 = p_3 = 0.3 \text{ [MPa]}$.

V zadání není udána hmotnost vzduchu pod válcem, tedy budeme uvažovat hmotnost m . Jelikož z pod pístu žádný vzduch neuniká, můžeme uvažovat zákon zachování hmoty, a tedy hmotnost vzduchu bude stejná na konci i na začátku děje. Můžeme si ji tedy vyjádřit z rovnice pro počáteční stav:

$$p_1 V_1 = m r T_1 \rightarrow m = \frac{p_1 V_1}{r T_1}$$
$$m = \frac{0.15 * 10^6 * 0.3}{287.04 * (20 + 273.15)} \cong 0.535 \text{ kg}$$

Pro výpočet konečné teploty pak můžeme této skutečnosti (tj. zachování hmotnosti) využít a můžeme napsat:

$$m_1 = m_3 \rightarrow \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_3 V_3}{T_3}$$
$$T_3 = T_1 \frac{p_3 V_3}{p_1 V_1} = (20 + 273.15) * \frac{0.3 * 10^6 * 0.9}{0.15 * 10^6 * 0.3} = 1\,758.9 \text{ K}$$
$$t_3 = T_3 - 273.15 = 1\,758.9 - 273.15 = 1\,485.75 \text{ °C}$$



Absolutní práci pak vypočteme následovně:

$$A_{13} = A_{12} + A_{23} = 0 + A_{23} = \int_2^3 p \, dV = p_2(V_3 - V_2) = 0.3 * 10^6 * (0.9 - 0.3) \cong \mathbf{180 \, kJ}$$

Technická práce se vypočte opět jako součet dílčích prací:

$$A_{t13} = A_{t12} + A_{t23} = A_{t12} + 0 = - \int_1^2 V \, dp = -V_1(p_2 - p_1) = V_1(p_1 - p_2)$$
$$A_{t12} = 0.3 * (0.15 - 0.30) * 10^6 = \mathbf{-45 \, kJ}$$

Z teorie bylo patrné, že množství přivedeného tepla při isochorickém ději se rovná velikosti změny vnitřní energie $U_{12} = m \cdot c_v(T_2 - T_1)$ – (jen mezi body 1-2 je isochorický děj) a množství přivedeného tepla při izobarickém ději se rovná velikosti změny entalpie $H_{23} = m \cdot c_p(T_3 - T_2)$ – (jenom mezi body 2-3 je izobarický děj).

$$Q_{13} = U_{12} + H_{23} = mc_v(T_2 - T_1) + mc_p(T_3 - T_2) = m \frac{r}{\kappa - 1}(T_2 - T_1) + m \frac{\kappa r}{\kappa - 1}(T_3 - T_2) = \frac{mr}{\kappa - 1}((T_2 - T_1) + \kappa(T_3 - T_2))$$

$$\text{Pozn.: } p_2 V_2 = mr T_2 \rightarrow T_2 = \frac{p_2 V_2}{mr} = \frac{0.3 * 10^6 * 0.3}{0.535 * 287.04} \cong 586.1 \, K$$

$$Q_{13} = \frac{0.535 * 287.04}{1.4 - 1} \left((586.1 - (20 + 273.15)) + 1.4 * (1758.9 - 586.1) \right) \cong \mathbf{743 \, kJ}$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Pro výpočet tepla lze postupovat i jednodušeji, jelikož už známe technickou i absolutní práci.

Jeden z tvarů první věty termodynamické definuje množství přivedeného tepla jako součet změny vnitřní energie a vykonané absolutní práce:

$$Q_{13} = U_{13} + A_{13}$$
$$Q_{13} = m c_v (T_3 - T_1) + A_{13} = m \frac{r}{\kappa - 1} (T_3 - T_1) + A_{13}$$

Lze využít i druhého tvaru 1. věty termodynamické:

$$Q_{13} = H_{13} + A_{t13}$$
$$Q_{13} = m c_p (T_3 - T_1) + A_{t13} = m \frac{\kappa r}{\kappa - 1} (T_3 - T_1) + A_{t13}$$

Za zmínku stojí, jakým způsobem se zde zadávají teploty. Velikost absolutní i technické práce se v předchozím počítala na celý děj, tedy i změna vnitřní energie a změna entalpie se musí počítat pro celý děj. Z toho plyne, že v rovnicích výše se výpočet změny vnitřní energie a změny entalpie provádí pomocí rozdílu teplot $(T_3 - T_1)$.



DĚKUJI ZA POZORNOST



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

