

EVROPSKÁ UNIE **esf** MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ  
**VYBRANÉ KAPITOLY Z TERMOMECHANIKY**

doc. Ing. Josef ŠTETINA, Ph.D.

<http://StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz/sew/categor/vydbortermomechaniky/termomechanika/> 4. 5. 2012

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ - ENERGETICKÝ ÚSTAV  
ODBOR TERMOMECHANIKY A TECHNIKY PROSTŘEDÍ

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz Absolvent-energetiků připravovan pro špičkové práce

**KONTAKT** **esf** evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Budova A2 dveře 314

Email: [stetina@fme.vutbr.cz](mailto:stetina@fme.vutbr.cz)

WWW: <http://www.eu.fme.vutbr.cz/odbor-termomechaniky-a-techniky-prostredi/josef-stetina>

Facebook: <http://facebook.com/termomechanika>

eMail: [stetina@fme.vutbr.cz](mailto:stetina@fme.vutbr.cz)

Telefon: 603731349  
541143269



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 . . . 252

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz Absolvent-energetiků připravovan pro špičkové práce

**ZAJÍMAVÉ ŘEŠENÉ APLIKACE** **esf** evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetické přeprogramování pro ICH práce

**ZAJÍMAVÉ ŘEŠENÉ APLIKACE**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### Zkušebna v Škoda auto



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

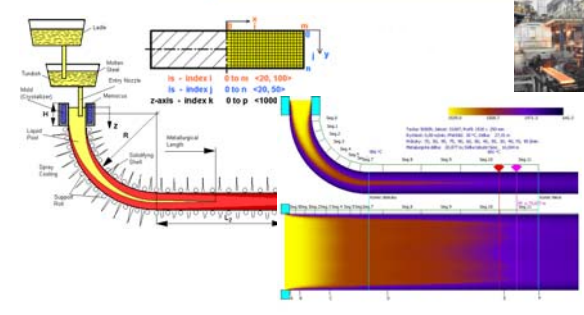
---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetické přeprogramování pro ICH práce

**ŘÍZENÍ PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

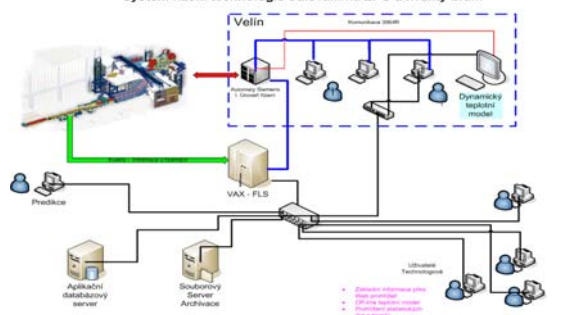
StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetické přeprogramování pro ICH práce

**ŘÍZENÍ PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### Systém řízení technologie odlévání na ZPO a kvality bramb



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro Ith práce

**ZAJÍMAVÉ ŘEŠENÉ APLIKACE**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Sluneční penzión Svitavy – monitorování solárního skleníku pro ohřev vzduch**



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro Ith práce

**ZAJÍMAVÉ ŘEŠENÉ APLIKACE**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Nizkoenergetický dům Energetického ústavu – monitorování a řízení prostředí**



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro Ith práce

**VYUŽITÍ TERMOMECHANIKY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Lidské tělo  
Klimatizace  
Letadlo  
Proudový motor  
voda vstup  
Automobilový chladič  
voda výstup  
Tepelná elektrárna  
Lednice

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetika přípraven pro 10h práce

**STUDIJNÍ LITERATURA**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

[http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/seo/category/odbortermomechaniky/seminar\\_aplikovane\\_termomechaniky/](http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/seo/category/odbortermomechaniky/seminar_aplikovane_termomechaniky/)  
<http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/seo/category/odbortermomechaniky/termomechanika/>  
<http://www.energetickeforum.cz/fsi-v-brne/vzdelavaci-kurzy/>  
<http://www.mhhe.com/engcs/mech/cengel/index.mhtml>

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ... 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetika přípraven pro 10h práce

**TERMOMECHANIKA**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Termodynamika**

- Termodynamika plynů
- Kompresory
- Spalovací motory
- Vodní pára
- Tepelné elektrárny
- Chladicí zařízení
- Vlhký vzduch
- Proudění plynů
- Proudové motory

**Přenos tepla**

- Vedení tepla
- Tepelné ztráty
- Přenos tepla prouděním
- Záření
- Tepelné výměníky

1 ... 6 7 8 9 10 11 12 13 14 ... 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetika přípraven pro 10h práce

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

1 ... 8 9 10 11 12 13 14 15 ... 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**TERMODYNAMICKÁ SOUSTAVA**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

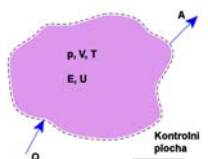
**TERMODYNAMICKÁ SOUSTAVA**  
 je souhrn látek účelně omezený vůči okolí kontrolní plochou

**ROZLIŠUJEME SOUSTAVU**

- Uzavřenou** - hmotnost procházející kontrolní plochou je nulová
- Otevřenou** - hmotnost procházející kontrolní plochou je nenulová
- Izolovanou** - kontrolní plocha zamezuje výměně tepla  $Q$  s okolím
- Neizolovanou** - kontrolní plocha nezamezuje výměně tepla  $Q$  s okolím
- Homogenní - Heterogenní**

**ROVNOVÁHA SOUSTAVY**

- Mechanická** - síly působící v soustavě a v okolí jsou v rovnováze
- Teplná** - nedochází k přenosu tepla v soustavě ani s okolím
- Chemická** - chemické složení soustavy se nemění



1 ... 8 9 10 11 12 13 14 15 ... 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

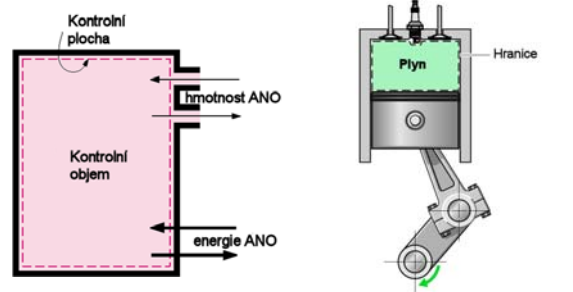
---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**OTEVŘENÁ TERMODYNAMICKÁ SOUSTAVA**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



1 ... 8 9 10 11 12 13 14 15 ... 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**ENERGIE, TEPLA, PRÁCE**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**ENERGIE  $E$  [J]** je schopnost soustavy konat práci (fyzikální, chemické či jiné změny).  
 Energie je stavová veličina.  
 Rozlišujeme energii mechanickou, tepelnou, elektrickou, magnetickou, chemickou, jadernou

1 kcal = 4,1868 kJ	1 kWh = 3,6 kJ
1 kpm = 9,80665 J	1 BTU = 1055,04 J

**VNITŘNÍ ENERGIE  $U$  [J]** = tepelná energie je energie neuspořádaného pohybu částic

**TEPLO  $Q$  [J]** je forma přenosu energie mezi soustavou a okolím - není stavovou veličinou.

Pro předávané teplo platí kalorimetrická rovnice  $Q_{12} = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$

$m$  [kg] je hmotnost,  $T$  [K] jsou teploty,  
 $c$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ] je měrná tepelná kapacita (u plynů rozlišujeme  $c_p$  a  $c_v$ ).

**PRÁCE  $A$  [J]** je forma přenosu energie - není stavovou veličinou. Práce je dána silou působící po dráze.

1 ... 8 9 10 11 12 13 14 15 ... 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připravení-pro-10h-práce

**STAVOVÉ VELIČINY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**STAVOVÉ VELIČINY určují stav soustavy**

Rozlišujeme:

a) **STAVOVÉ VELIČINY MĚŘITELNÉ**

- **Tlak**
- **Teplota**
- **Měrný objem**
  - > Objem
  - > Hmotnost
  - > Látkové množství

b) **STAVOVÉ FUNKCE**  
 počítané z měřitelných stavových veličin *Vnitřní energie U, entalpie H, entropie S ...*

c) **FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI**  
 Měrná tepelná kapacita *c*, součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ , teplotní vodivosti *a*, kinematická viskozita *v ...*

1 . . . 11 12 13 14 15 16 17 18 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připravení-pro-10h-práce

**STAVOVÉ VELIČINY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Výška je stavová veličina stejně jako teplota, tlak, měrný objem, vnitřní energie entalpie a entropie – nezávisí na cestě.

Trasa na kopec není stavová veličina stejně jako objemová práce, technická práce a teplo.

1 . . . 11 12 13 14 15 16 17 18 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připravení-pro-10h-práce

**TLAK**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$p = \frac{dF}{dS}$

$p = \frac{F}{S}$

*F [N]* síla  
*S [m<sup>2</sup>]* plocha  
*p [Pa]* tlak

$p_a = 0,1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa} = 1000 \text{ hPa} = 1 \text{ atm} = 1000 \text{ mbar}$

$p_a = p_b - |p_{podl}|$   
 $p_a = p_b + p_{pr}$

**Do všech vztahů v termodynamice dosazujeme absolutní tlak, (nikdy přetlak ani podtlak). Pokud v zadání příkladu není řečeno o jaký tlak se jedná předpokládáme, že se jedná o absolutní tlak. Přednostně používáme kPa.**

1 . . . 11 12 13 14 15 16 17 18 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně energetické přepočty pro 1 m<sup>3</sup> práce

**TLAK**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Přístroje pro měření tlaku:

- **přetlak** – klasické manometry
- **barometrický tlak** – barometry
- **podtlak** – vakuometry
- **absolutní tlak**
- **diferenční tlak**

1 bar = 10<sup>5</sup> Pa = 1000 hPa = 100 kPa = 0,1 MPa  
 1 atm = 101325 Pa = 101,325 kPa = 1,01325 bar  
 1 kp/cm<sup>2</sup> = 9,807 N/cm<sup>2</sup> = 0,9807 bar = 0,9679 atm  
 1 atm = 14,696 psi  
 1 mmHg = 1 torr = 133,322 Pa  
 1 mmH<sub>2</sub>O = 9,806 65 Pa

**Hydrostatický tlak - využití při měření**

1 13 14 15 16 17 18 19 20 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně energetické přepočty pro 1 m<sup>3</sup> práce

**DYNAMICKÉ RYCHLOSTNÍ SONDY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Bernoulliho rovnici pro stlačitelné tekutiny integrujeme za konstantního objemu

$$-\int_1^2 v dp = \int_1^2 d \frac{w^2}{2}$$

$$\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_{STR}} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$

Bernoulliho rovnice pro nestlačitelné tekutiny

$$\rho_1 + \frac{w_1^2}{2} \rho_{STR} = \rho_2 + \frac{w_2^2}{2} \rho_{STR}$$

**$p_s + p_d = p_c$**

**Tlak statický + tlak dynamický = tlak**

Rychlostní sondy  $w < 0,3$  rychlosti zvuku

$$p_d = p_c - p_s$$

$$p_d = \rho_{STR} \cdot w^2 / 2$$

$$w = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho_{STR}}}$$

Pitotova trubice Prandtlova trubice

1 13 14 15 16 17 18 19 20 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně energetické přepočty pro 1 m<sup>3</sup> práce

**DYNAMICKÉ RYCHLOSTNÍ SONDY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$F_{vztlak} = C \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \cdot S$$

Pitotova trubice měří celý člen odpovídající dynamickému tlaku, kvadrát relativní rychlosti krát hustota proudícího vzduchu.

1 15 16 17 18 19 20 21 22 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetika: příprava pro ICH práce

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### TEPLOTA

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**T [K] = 273,15+t[°C]**

**t [°C]**

**V termodynamice používáme pouze teplotu označovanou T v Kelvinech**

**t[°C]=5/9.(t[F]-32)**

1 . . . 15 16 17 18 19 20 21 22 | . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetika: příprava pro ICH práce

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### 0. ZÁKON TERMODYNAMIKY

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Jestliže, dva systémy (A a B) jsou v tepelné rovnováze s třetím systémem (C) [ A a C jsou v tepelné rovnováze; B a C jsou v tepelné rovnováze ] tak jsou v tepelné rovnováze i systémy A a B.

**T<sub>A</sub> = T<sub>C</sub> T<sub>B</sub> = T<sub>C</sub> T<sub>A</sub> = T<sub>B</sub>**

**Základní princip všech měření teplot**

1 . . . 17 18 19 20 21 22 23 | 24 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetika: příprava pro ICH práce

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### MĚRNÝ OBJEM

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$

$v_2 = \frac{V_2}{m_2} = \frac{2,5}{2} = 1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

$\rho_2 = 0,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$v_1 = \frac{V_1}{m_1} = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

$\rho_1 = 1,333 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

**Hustota (měrný objem) u plynů není konstanta a nehlédá se v tabulkách.**

1 . . . 18 19 20 21 22 23 24 | 25 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-lh-práci

**ZÁKLADNÍ STAVOVÉ VELIČINY**

**Tlak**  
p [kPa]

**Teplota**  
T [K]

**Měrný objem**  
v [m³/kg]

1 . . . 18 19 20 21 22 23 24 25 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-lh-práci

**TERMODYNAMIKA PLYNŮ**

**Pracovní látka**

- Ideální plyn
- Nedokonalé plyny - zjednodušený výpočet
- Reálný plyn - přesný výpočet
- Páry

Směsi plynů } Směsi plynů a par

Fyzikální vlastnosti jsou pro:

- ideální plyny f (druhu látky) = konst.
- nedokonalé plyny f (druhu látky, T)
- reálné plyny f (druhu látky, T, p)

U nedokonalých plynů používáme střední integrální hodnoty vlastností

$$c_{stf} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT$$

1 . . . 20 21 22 23 24 25 26 27 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-lh-práci

**AVOGADRŮV ZÁKON**

Slovní formulace (1811): Různé ideální plyny stejných objemů obsahují za stejné teploty a tlaku stejný počet molekul (ne atomů).

Hmotnosti stejných objemů jsou úměrné molárním hmotnostem M [kg.kmol⁻¹]

Pozn.: M udává, kolikrát je hmotnost molekuly látky větší, než 1/12 hmotnosti atomu uhlíku ¹²C.

Plati:  $m = M \cdot konst. \Rightarrow V/v = M \cdot konst.$

Matematická formulace:  $M \cdot v = V_m = konst.$

kde V<sub>m</sub> [m³.kmol⁻¹] je molární objem. Při p = 101325 Pa a T = 273,15 K (normální fyzikální podmínky - NFP) je V<sub>m</sub> = 22,4136 m³.kmol⁻¹.

Plati:  $n = \frac{m}{M} \Rightarrow V = n \cdot V_m = \frac{m}{M} \cdot V_m, \quad v = \frac{V}{m} = \frac{1}{M} \cdot V_m$

Normální m³ je hmotnost 1 m³ (p = m/V = 1/v) při NFP:  $1 Nm^3 = \left(\frac{m}{V}\right)_{NFP} = \left(\frac{M}{V_m}\right)_{NFP} = \frac{M}{22,41}$

1 . . . 20 21 22 23 24 25 26 27 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**TERMODYNAMICKÉ DĚJE**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

1 . . . 23 24 25 26 27 28 29 30 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**GAY-LUSSACŮV ZÁKON**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Gay-Lussac (1778-1850) sledoval chování plynu za konstantního tlaku.

Slovní formulace:  
 Za stálého tlaku roste objem plynu lineárně s teplotou. Hodnota teplotní objemové roztažnosti  $\gamma$  je pro všechny plyny stejná, nezávisí na tlaku.

Matematická formulace:  $V = V_0 (1 + \gamma \cdot t)$   
 $\gamma = 1 / 273,15 \text{ K}^{-1}$   
 $V_0$  objem při  $t_0 = 0^\circ\text{C}$

Po úpravě:  $V = V_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{273,15} \cdot t\right) = \frac{V_0}{273,15} \cdot (273,15 + t) = \frac{V_0}{T_0} \cdot T$

Matematická formulace:  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow V = T \cdot \text{konst.}$

1 . . . 23 24 25 26 27 28 29 30 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**CHARLESŮV ZÁKON**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Charles (1746-1823) sledoval chování plynu za konstantního objemu.

Slovní formulace:  
 Za konstantního objemu roste tlak plynu lineárně s teplotou. Hodnota rozpínavosti  $\beta$  je pro všechny plyny stejná.

Matematická formulace:  $p = p_0 (1 + \beta \cdot t)$   
 $\beta = 1 / 273,15 \text{ K}^{-1}$   
 $p_0$  tlak při  $t_0 = 0^\circ\text{C}$

Po úpravě:  $p = p_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{273,15} \cdot t\right) = \frac{p_0}{273,15} \cdot (273,15 + t) = \frac{p_0}{T_0} \cdot T$

Matematická formulace:  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \Rightarrow p = T \cdot \text{konst.}$

1 . . . 23 24 25 26 27 28 29 30 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik příprava pro ICH práce

**BOYLEŮV - MARIOTTEŮV ZÁKON**  
 evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Boyle (1662), Mariotte (1672) sledovali chování plynů za konstantní teploty.

Slovní formulace:  
 Za konstantní teploty je součin tlaku a objemu daného množství plynu konstantní.

Matematická formulace:  $p \cdot V = konst. \Rightarrow p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$

Zákon lze vyjádřit i pomocí stlačitelnosti  $\delta$ :  $V = V_0 [1 + \delta \cdot (p - p_0)]$

Stlačitelnosti  $\delta$  není však ani u ideálních plynů konstantní, a proto uvedená závislost  $V = f(p)$  není přímka.

1 . . . 30 31 | 32 33 34 35 36 37 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik příprava pro ICH práce

**SOUŘADNÝ SYSTÉM p-V-T**  
 evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

p . V . T plocha pro ideální plyny

Boyle-Mariotteův zákon

Rovnovážné stavy plynu se nacházejí pouze na této termodynamické ploše.

1 . . . 30 31 32 | 33 34 35 36 37 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik příprava pro ICH práce

**ODVOZENÍ STAVOVÉ ROVNICE**  
 evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Stavovou rovnici ideálního plynu odvodil v roce 1834 francouzský fyzik Clapeyron (1799-1864). Vycházel přitom z Boyleova-Mariotteova a Gay-Lussacova zákona  $\Rightarrow$  obecný děj nahradil izotermou a izobarou.

1) Boyle-Mariotte ( $T = konst.$ )  
 $p_1 V_1 = p_2 V_2 \Rightarrow V_A = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{p_1 V_1}{p_2}$

2) Gay-Lussac ( $p = konst.$ )  
 $\frac{V_A}{T_A} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow V_A = \frac{T_A V_2}{T_2} = \frac{T_1 V_2}{T_2}$

Měrný objem  $v_A$  je v obou případech stejný, a proto platí:  
 $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = konst. \Rightarrow \frac{pV}{T} = konst.$

Stavová rovnice ideálního plynu je dána vztahem:  $p \cdot v = r \cdot T$   
 kde  $r$  je měrná plynová konstanta.

1 . . . 30 31 32 33 | 34 35 36 37 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolventi-energetik-připraveni-pro-10h-prace

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

## PLYNOVÁ KONSTANTA

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Měrná plynová konstanta  $r$  [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] určí se pro jednotlivé plyny z tabulek nebo **VYPOČTEM**

Odvození z Avogadrova zákona  $M \cdot v = V_m = \text{konst.}$

a ze stavové rovnice  $r = \frac{p \cdot v}{T}$

Při normálních fyzikálních podmínkách  $p = 101325 \text{ Pa}$  a  $T = 273,15 \text{ K}$  je  $V_m = 22,4136 \text{ m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$  pro všechny plyny a lze psát

$$M r = \frac{p v M}{T} = \frac{p V_m}{T} = \frac{101325 \times 22,4136}{273,15} = 8314,3 \pm 1,2 \text{ J}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

Univerzální plynová konstanta  $R_m = 8314,3 \text{ J}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Výpočet plynové konstanty  $r = \frac{R_m}{M}$

1 . . . 30 31 32 33 34 35 36 37 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolventi-energetik-připraveni-pro-10h-prace

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

## ZÁKLADNÍ TVARY STAVOVÉ ROVNICE

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Stavová rovnice pro 1 kg ideálního plynu  $p \cdot v = r \cdot T$

Stavová rovnice pro  $m$  kg ideálního plynu  $p \cdot V = m \cdot r \cdot T$

Vynásobením rovnice pro 1 kg molární hmotností  $M$  dostaneme všeobecnou stavovou rovnici ideálního plynu

$$p \cdot V_m = M \cdot r \cdot T \quad \text{nebo} \quad p \cdot V_m = R_m \cdot T$$

kde  $V_m = M \cdot v$  a  $R_m = M \cdot r$

Vynásobením všeobecné stavové rovnice látkovým množstvím  $n$  získáme rozšířenou všeobecnou stavovou rovnici ideálního plynu

$$p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T \quad \text{kde} \quad V = n \cdot V_m$$

1 . . . 30 31 32 33 34 35 36 37 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolventi-energetik-připraveni-pro-10h-prace

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

## TEPELNÉ KAPACITY

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Měrná tepelná kapacita  $c$  [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] je teplo k ohřátí 1 kg látky o 1 K

U plynů rozlišujeme

- Měrnou tepelnou kapacitu za konstantního tlaku  $c_p$
- Měrnou tepelnou kapacitu za konstantního objemu  $c_v$

Děj 1-2<sub>v</sub> plyn zvýší vnitřní energii  
Děj 1-2<sub>p</sub> plyn zvýší vnitřní energii a vykoná práci

$$m \cdot c_p \cdot dT = dQ_p > dQ_v = m \cdot c_v \cdot dT$$

$$c_p > c_v$$

Molární tepelná kapacita  $C_m$  [ $\text{J}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]  
 $C_m = M \cdot c$       $C_{mv} = M \cdot c_v$   
Tepelná kapacita  $C$  [ $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ ]  
 $C = m \cdot c = n \cdot C_m$ ,      $C_p = m \cdot c_p = n \cdot C_{mp}$ ,      $C_v = m \cdot c_v = n \cdot C_{mv}$

1 . . . 30 31 32 33 34 35 36 37 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik přípraven pro Ith práce

**MAYERŮV VZTAH**

Odvození Mayerova vztahu  
 1. forma I. zákona termodynamiky  
 Stavová rovnice ideálního plynu  
 Po dosazení  $p \cdot dv$  do 1. formy ...  
 Pro izobarický děj  $dp = 0$

$$dq = c_v \cdot dT + p \cdot dv$$

$$pv = rT \Rightarrow p \, dv + v \, dp = r \, dT$$

$$dq = c_v \cdot dT + r \cdot dT - v \cdot dp$$

$$c_p \cdot dT = c_v \cdot dT + r \cdot dT$$

Mayerův vztah  $\rightarrow$   $c_p = c_v + r$

Poissonova konstanta

1-atomové plyny	$\kappa = 1,67$
2-atomové plyny	$\kappa = 1,41$
3-atomové plyny	$\kappa = 1,30$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

1 . . . 30 31 32 33 34 35 36 37 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik přípraven pro Ith práce

**VLASTNOSTI IDEÁLNÍCH PLYNŮ**

Mayerův vztah  $c_p = c_v + r$

Poissonova konstanta

1-atomové plyny	$\kappa = 1,67$
2-atomové plyny	$\kappa = 1,41$
3-atomové plyny	$\kappa = 1,30$

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot r = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{R_m}{M}$$

$$c_v = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot r = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot \frac{R_m}{M}$$

Univerzální plynová konstanta  $R_m = 8314,3 \text{ J.kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Výpočet plynové konstanty  $r = \frac{R_m}{M}$

Plyn	M [kg.kmol <sup>-1</sup> ]
H <sub>2</sub>	2
N <sub>2</sub>	28
O <sub>2</sub>	32
C	12
CO <sub>2</sub>	44

Pro vzduch (směs N<sub>2</sub> a O<sub>2</sub>)  $r = 287,04 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

1 . . . 31 32 33 34 35 36 37 38 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik přípraven pro Ith práce

**VÝZNAM SMĚSÍ PLYNŮ**

V technické praxi se vyskytují převážně směsi plynů, např.:

- Vzduch pro technologické aplikace
- Plynná paliva – Propan-Butan, Zemní plyn, Bio plyn
- Pracovní látky spalovacích motorů a plynových turbin – Vzduch + směs paliva (benzínové páry)
- Výfukové plyny spalovacích motorů a plynových turbin – problematika emisí

Proto se musíme zabývat termodynamikou směsí plynů a umět určovat jejich termodynamické vlastnosti

**DVĚ ZÁKLADNÍ VĚTY PRO ŘEŠENÍ SMĚSÍ PLYNŮ:**

Každý plyn se chová ve směsi ideálních plynů tak, jako by byl v celém prostoru sám řídí se svou stavovou rovnicí ze stavové rovnice lze určit jeho tlak (parciální tlak) pomocí teploty a celkového objemu směsi

Směs chemicky na sebe nepůsobících plynů má vlastnosti opět plynu, pro který lze rovněž použít stavovou rovnici

1 . . . 31 32 33 34 35 36 37 38 39 . . . 254

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### VLASTNOSTI SMĚSI PLYNŮ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Ze známého složení směsi lze vypočítat různé vlastnosti směsi (nebývají v tabulkách), a to pomocí:

rovnice zachování hmotnosti  $m = \sum m_i$

rovnice zachování látky  $n = \sum n_i$

rovnice zachování energie  $m \cdot c \cdot \Delta T = \sum m_i \cdot c_i \cdot \Delta T$

H <sub>2</sub> 6 kg	+ O <sub>2</sub> 32 kg	→ H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> 38 kg
H <sub>2</sub> 3 kmol	+ O <sub>2</sub> 1 kmol	→ H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> 4 kmol

STŘEDNÍ ZDÁNĹIVÁ MOLÁRNÍ HMOTNOST SMĚSI  $M$  [kg.kmol<sup>-1</sup>]

$$M = \sum M_i x_i \quad \text{kg.kmol}^{-1}$$

1 ... 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 ... 254

Copyright The McGraw-Hill Companies, Inc.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### MĚRNÁ PLYNOVÁ KONSTANTA A KAPACITY

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

MĚRNÁ PLYNOVÁ KONSTANTA SMĚSI  $r$  [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

$$r = \frac{R_m}{M} = R_m \sum \frac{w_i}{M_i} = \sum w_i \cdot r_i$$

HUSTOTA SMĚSI  $\rho$  [kg.m<sup>-3</sup>] ze stavové rovnice  $\rho = p / (r \cdot T)$

MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA SMĚSI  $c$  [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

$$m \cdot c \cdot \Delta T = \sum m_i \cdot c_i \cdot \Delta T$$

$$m \cdot c = \sum m_i \cdot c_i$$

$$c = \sum \frac{m_i}{m} \cdot c_i$$

$$c = \sum w_i \cdot c_i$$

Platí stejně pro  $c_p, c_v$

Platí stejné vztahy jako pro plyny

$$c_p = c_v + r \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad c_p = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot r \quad c_v = \frac{r}{\kappa-1} = \frac{R_m}{\kappa-1} \cdot M$$

1 ... 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 ... 254

Copyright The McGraw-Hill Companies, Inc.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### DVA PŘÍPADY SMÍŠENÍ PLYNŮ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Daltonův zákon**

$$p = \sum p_i$$

Plyn 1 V <sub>1</sub> , T p <sub>1</sub>	+	Plyn 2 V <sub>2</sub> , T p <sub>2</sub>	=	Směs plynů 1+2 V, T p <sub>1</sub> +p <sub>2</sub>
--	---	--	---	--

**Amagatův zákon**

$$V = \sum V_i$$

plyn 1 p, T V <sub>1</sub>	+	plyn 2 p, T V <sub>2</sub>	=	Směs plynů 1+2 p, T V <sub>1</sub> +V <sub>2</sub>
----------------------------------	---	----------------------------------	---	--

1 ... 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 ... 254

Copyright The McGraw-Hill Companies, Inc.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---









StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik přípraven pro 1h práce

**ENTALPIE H [J]**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Entalpie H [J], měrná entalpie h [J.kg<sup>-1</sup>] - teplo za konstantního tlaku  $H_{12} = m \cdot h_{12}$

Definice pro ideální plyn  $dH = m \cdot c_p \cdot dT$   $dh = c_p \cdot dT$

H je stavová veličina  $\int_1^2 dH = H_2 - H_1 = mc_p (T_2 - T_1)$   $\oint dH = 0$   
 dh je totální diferenciál  $\int_1^2 dh = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$   $\oint dh = 0$

Odvození entalpie z děje p=konstantní  $dq_p = (du + da)_p$   
 1. forma I. zákona pro p = konstantní  $dh = (du + da)_p$   
 Entalpie je teplo při p = konstantní  $h_2 - h_1 = u_2 - u_1 + p (v_2 - v_1)$   
 Po integraci při p = konstantní  $h_2 - h_1 = (u_2 + pv_2) - (u_1 + pv_1)$   
 Po seskupení veličin stavu 1 a 2  $H = U + p \cdot V$   $h = u + p \cdot v$

1 ... 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik přípraven pro 1h práce

**TECHNICKÁ PRÁCE A<sub>t</sub> [J]**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

MĚRNÁ TECHNICKÁ PRÁCE a<sub>t</sub> [J.kg<sup>-1</sup>]  
 Je to práce na hřídelích rotačních strojů.  
 Technická práce je plocha pod křivkou v p-v diagramu směrem k ose p.  
 Plocha je uvažována záporně (vzhledem k růstu tlaku), aby při expanzi či poklesu tlaku soustavy byla kladná.  
 Definice technické práce A<sub>t</sub> a měrné technické práce a<sub>t</sub> mezi původním stavem o tlaku p<sub>1</sub> a konečným stavem o tlaku p<sub>2</sub> jsou tudíž dány vztahy

$A_{t12} = m \cdot a_{t12}$

$A_{t12} = -\int_1^2 V \cdot dp$   $a_{t12} = -\int_1^2 v \cdot dp$

Technická práce není stavovou veličinou, neboť závisí na cestě, po které děj probíhá a platí, že neexistuje A<sub>t1</sub> nebo A<sub>t2</sub>.

1 ... 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik přípraven pro 1h práce

**2. FORMA I. ZTD**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$dQ = dH + dA_t = c_p \cdot m \cdot dT - V \cdot dp$  [J]  
 $dq = dh + da_t = c_p \cdot dT - v \cdot dp$  [J/kg]

$Q_{12} = \Delta H_{12} + A_{t12} = c_p \cdot m \cdot (T_2 - T_1) - \int_1^2 V \cdot dp$  [J]  
 $q_{12} = \Delta h_{12} + a_{t12} = c_p \cdot (T_2 - T_1) - \int_1^2 v \cdot dp$  [J/kg]

Vhodné pro otevřené soustavy, např. pro řešení kompresorů nebo zařízení kde se mění tlak i objem.

1 ... 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

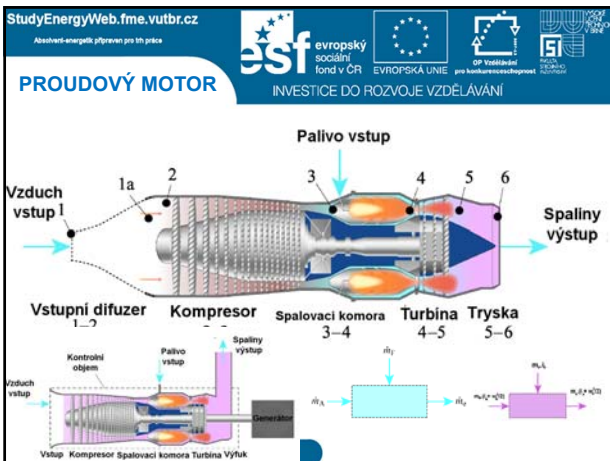
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

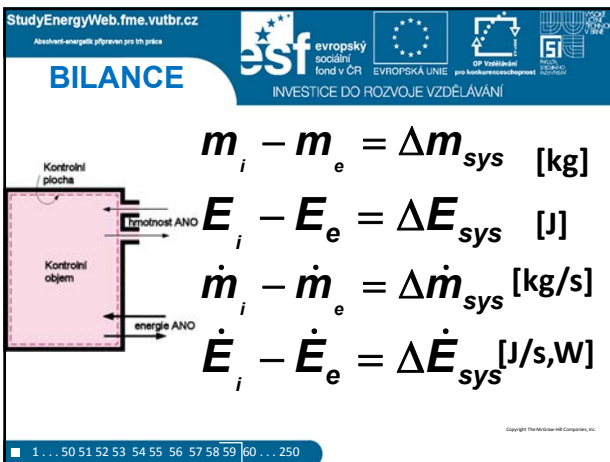
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

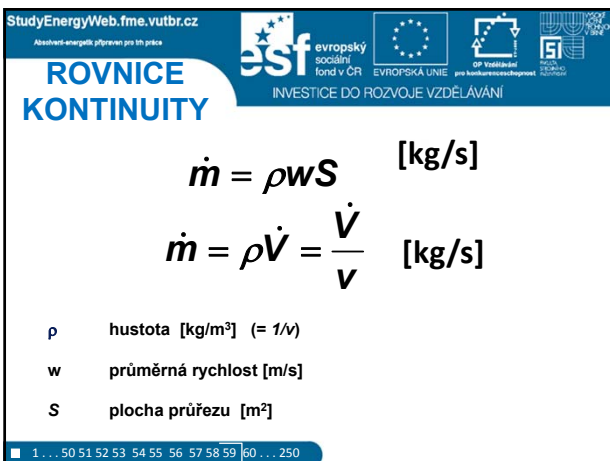
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetika-připraveni-pro-1sh-prace

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### KINETICKÁ A POTENCIÁLNÍ ENERGIE

Kinetická energie  $E_K = m \frac{w^2}{2}$

Potenciální energie  $E_P = mgz$

Energie soustavy bez energie proudu  $E = E_K + E_P + U$

Celková energie  $E = E_K + E_P + H$

[J]

1 ... 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetika-připraveni-pro-1sh-prace

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### I. ZTD PRO OTEVŘENOU SOUSTAVU

1 ... 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetika-připraveni-pro-1sh-prace

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### I. ZTD PRO OTEVŘENOU SOUSTAVU

1 ... 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připravení-pro-10h-práce

**I. ZTD PRO OTEVŘENOU SOUSTAVU**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e$$

$$Q - A = \sum \dot{m}_e \left( u_e + \frac{w_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_i \left( u_i + \frac{w_i^2}{2} + gz_i \right)$$

$$Q - A_t = \sum \dot{m}_e \left( u_e + p_e v_e + \frac{w_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_i \left( u_i + p_i v_i + \frac{w_i^2}{2} + gz_i \right)$$

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e$$

$$\dot{Q} - P = \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{w_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{w_i^2}{2} + gz_i \right) \quad [\text{W}]$$

1 ... 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připravení-pro-10h-práce

**I. ZTD ZJEDNODUŠENÍ**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\dot{Q} - P = \dot{m} \left( h_2 - h_1 + \frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) \quad [\text{W}]$$

Copyright: The McGraw-Hill Companies, Inc.

1 ... 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připravení-pro-10h-práce

**TURBÍNA**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

1 ... 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetiké přípravené pro trh práce

**ENTROPIE DEFINICE**

Entropie  $S$  [J/K] Měrná entropie  $s$  [J/(kg.K)]


$dS = \frac{dQ}{T}$   $dS = m \cdot ds$   $ds = \frac{dq}{T}$

Entropie je extenzivní veličina

Entropie je stavová veličina,  $dS$  je totální diferenciál a lze psát následující integrály:

Pro termodynamické děje:  $\int_1^2 dS = S_2 - S_1$   $\int_1^2 ds = s_2 - s_1$

Pro vratné cykly:  $\oint dS = 0$   $\oint ds = 0$



- Entropie určuje směr vývoje soustavy
- Entropie umožní dokázat nevratné termodynamické děje
- Entropie určuje pravděpodobnost systému
- Entropie určuje míru disipace látky či energie
- Entropie určuje míru neuspořádaní systému
- Entropie určuje míru znehodnocení kvality systému

1 ... 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

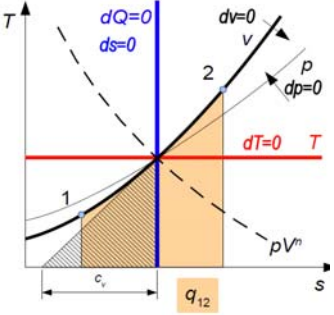
---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetiké přípravené pro trh práce

**T-S DIAGRAM PRO IDEÁLNÍ PLYN**

Druhý nejdůležitější graf po  $p-v$

*Ploucha pod křivkou je teplo  $q_{12}$*



1 ... 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetiké přípravené pro trh práce

**PŘEHLED TERMODYNAMICKÝCH DĚJŮ**

Rozlišujeme

- **Děje vratné** - soustava prochází jen rovnovážnými stavy (lze použít stavovou rovnici) a při opačném ději se vrátí do původního stavu
- **Děje nevratné** - soustava neprochází rovnovážnými stavy a při opačném ději se nevrátí do původního stavu

Vratné termodynamické děje - vhodné pro teoretické rozbor

- **Izochorický děj** při konstantním objemu ( $v = \text{konstantní}, dv = 0$ )
- **Izobarický děj** při konstantním tlaku ( $p = \text{konstantní}, dp = 0$ )
- **Izotermický děj** při konstantní teplotě ( $T = \text{konstantní}, dT = 0$ )  $p \cdot v^\gamma = \text{konst.}$
- **Adiabatický děj** bez výměny tepla s okolím ( $q_{12} = 0, dq = 0$ )  $p \cdot v^\kappa = \text{konst.}$
- **Polytropický děj** definovaný rovnicí  $p \cdot v^n = \text{konst.}$   
 technická polytropia  $n \in (\gamma, \kappa)$   
 obecná polytropia  $n \in (-\infty, \infty)$

1 ... 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-školení-pro-10h-práci

**ISOCHORICKÝ DĚJ**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$v = \text{konst.}, dv = 0$  (Charles)  
 Pro řešení uzavřených soustav (např. tlakových nádob)

Stavové rovnice  
 $p_1 \cdot v = r \cdot T_1$   
 $p_2 \cdot v = r \cdot T_2$

Rovnice změny stavu  
 $v_1 = v_2$      $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

Izochorická komprese

1 ... 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-školení-pro-10h-práci

**ISOCHORICKÝ DĚJ**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Energetické veličiny  $A_{12}, A_{122}, Q_{12}$   
 $a_{12} = 0$   
 $A_{12} = 0$

$A_{12} = \int_1^2 p dV = 0$      $a_{12} = \int_1^2 p dv = 0$

$A_{122} = -\int_1^2 V dp = -V(p_2 - p_1)$      $a_{122} = -\int_1^2 v dp = -v(p_2 - p_1)$

Teplu vyjádříme z 1. formy I. zákona termodynamiky  
 $dq = c_v \cdot dT + p \cdot dv = c_v \cdot dT = du$   
 $Q_{12} = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$  ,     $q_{12} = c_v \cdot (T_2 - T_1)$

Entropie  
 $\int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{c_v \cdot dT}{T} = c_v \int_1^2 \frac{dT}{T}$      $s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$

1 ... 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-školení-pro-10h-práci

**IZOBARICKÝ DĚJ**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$p = \text{konst.}, dp = 0$  (Gay-Lussac)  
 Pro řešení výměníků tepla, chladičů apod.

Stavové rovnice  
 $p \cdot v_1 = r \cdot T_1$   
 $p \cdot v_2 = r \cdot T_2$

Rovnice změny stavu  
 $p_1 = p_2$      $\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$

Izobarická expanze

1 ... 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Absolutně energetický přístup pro IPI práce

### IZOBARICKÝ DĚJ-PRÁCE

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Energetické veličiny  $A_{12}, A_{12}, Q_{12}$

$$a_{112}=0 \quad A_{112}=0$$

$$A_{12} = -\int_1^2 V dp = 0 \quad a_{112} = -\int_1^2 v dp = 0$$

$$A_{12} = \int_1^2 p dV = p (V_2 - V_1) \quad a_{12} = \int_1^2 p dv = p (v_2 - v_1)$$

Teplu vyjádříme z 2. formy I. zákona termodynamiky

$$dq = c_p \cdot dT - v \cdot dp = c_p \cdot dT = dh$$

$$Q_{12} = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad q_{12} = c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Entropie

$$\int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{c_p \cdot dT}{T} = c_p \int_1^2 \frac{dT}{T} \quad s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

1 ... 70 71 72 73 | 74 75 76 77 78 79 80 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Absolutně energetický přístup pro IPI práce

### IZOTERMICKÝ DĚJ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$T = \text{konst.}, dT = 0$  (Boyle, Mariotte)

Pro řešení ideální komprese nebo expanze plynů.

Stavové rovnice  $p_1 \cdot V_1 = r \cdot T$   $p_2 \cdot V_2 = r \cdot T$

Rovnice změny stavu  $T_1 = T_2$   $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$

Izotermická komprese

1 ... 70 71 72 73 74 | 75 76 77 78 79 80 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Absolutně energetický přístup pro IPI práce

### IZOTERMICKÝ DĚJ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Energetické veličiny  $A_{12}, A_{12}, Q_{12}$

Z I. zákona termodynamiky platí

$$dq = c_v \cdot dT + p \cdot dv = p \cdot dv = da_i$$

$$dq = c_p \cdot dT - v \cdot dp = -v \cdot dp = da_i$$

Práci objemovou a technickou lze odvodit z jejich definičních vztahů

$$a_{12} = \int_1^2 p \cdot dv = \int_1^2 rT \cdot \frac{dv}{v} = rT \ln \frac{V_2}{V_1} = p_2 \cdot v_2 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$a_{112} = -\int_1^2 v \cdot dp = -\int_1^2 rT \cdot \frac{dp}{p} = -rT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 \cdot v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Entropie

$$\int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{dq}{T} \quad s_2 - s_1 = q_{12}/T$$

$$s_2 - s_1 = r \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$s_2 - s_1 = -r \ln \frac{p_2}{p_1} = r \ln \frac{p_1}{p_2}$$

1 ... 70 71 72 73 74 75 | 76 77 78 79 80 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetiká přepraven pro tich práci

**ADIABATICKÝ DĚJ**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$dq = 0, q_{12} = 0, Q_{12} = 0$   
Pro řešení ideální komprese nebo expanze plynů.

Rovnice změny stavu  
1. forma I. zákona termodynamiky  
 $dq = c_v dT + p dv = 0$

2. forma I. zákona termodynamiky  
 $dq = c_p dT - v dp = 0$

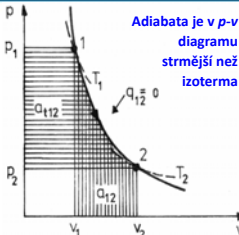
Podělením 2. formy 1. formou bude  
 $\frac{c_p}{c_v} \frac{v dp}{p dv} = \kappa \Rightarrow \frac{dp}{p} + \kappa \frac{dv}{v} = 0$

Po integraci  $\ln p + \kappa \cdot \ln v = \ln konst.$

$p \cdot v^\kappa = konst.$

$p_1 \cdot v_1^\kappa = p_2 \cdot v_2^\kappa$

$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa$



Adiabata je v p-v diagramu strmější než izoterma

1 ... 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 ... 250



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetiká přepraven pro tich práci

**ADIABATICKÝ DĚJ**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Další rovnice změny stavu  
 $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa \Rightarrow \frac{rT_2 \cdot v_1}{rT_1 \cdot v_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa$   $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}$

$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{rT_1 \cdot p_2}{rT_2 \cdot p_1}\right)^\kappa$   $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$

Práce objemová  
 $a_{12} = c_v (T_1 - T_2) = c_v T_1 \left[1 - \frac{T_2}{T_1}\right]$

$dq = c_v dT + da = 0$

$a_{12} = \frac{c_v}{r} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] = \frac{c_v}{c_p - c_v} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]$  podělením  $c_v$  bude

$A_{12} = \frac{1}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]$

$a_{12} = \frac{1}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]$

1 ... 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 ... 250



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetiká přepraven pro tich práci

**ADIABATICKÝ DĚJ - PRÁCE**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Další rovnice změny stavu  
 $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa \Rightarrow \frac{rT_2 \cdot v_1}{rT_1 \cdot v_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa$   $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}$

$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{rT_1 \cdot p_2}{rT_2 \cdot p_1}\right)^\kappa$   $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$

Práce objemová  
 $a_{12} = c_v (T_1 - T_2) = c_v T_1 \left[1 - \frac{T_2}{T_1}\right]$

$dq = c_v dT + da = 0$

$a_{12} = \frac{c_v}{r} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] = \frac{c_v}{c_p - c_v} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]$  podělením  $c_v$  bude

$A_{12} = \frac{1}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]$

$a_{12} = \frac{1}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]$

1 ... 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 ... 250



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetika-připraveno-pro-1sh-prace

ADIBATICKÝ DĚJ-PRÁCE

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Práce technická

$$dq = c_v \cdot dT + da = 0 \Rightarrow da = -c_v dT$$

$$dq = c_p \cdot dT + da_i = 0 \Rightarrow da_i = -c_p dT$$

$$da_i = -\kappa (c_v dT) = -\kappa \cdot da$$

$$A_{112} = \frac{\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \quad a_{112} = \frac{\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$

Teplo  $Q_{12} = 0 \quad q_{12} = 0$

Adiabatický děj probíhá v tepelně izolované soustavě a velmi rychle. Lze se s ním setkat při teoretickém rozboru tepelných zařízení, viz

- komprese a expanze v pístových strojích
- expanze v dýzách, turbínách apod.

1...70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80...250



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetika-připraveno-pro-1sh-prace

ADIBATICKÝ DĚJ IZOENTROPICKÝ DĚJ

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\int_1^2 ds = 0$$

$s = konst.$

1...70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80...250



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetika-připraveno-pro-1sh-prace

POLYTROPICKÝ DĚJ

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$p \cdot v^n = konst.$

Technická polytropa

Pro řešení komprese a expanze Obecná polytropa

Rovnice změny stavu

$$p_1 \cdot v_1^n = p_2 \cdot v_2^n \quad \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Příklad výpočtu polytropického exponentu n

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{n-1}{n} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$n \ln \frac{T_2}{T_1} - (n-1) \ln \frac{p_2}{p_1} = -\ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$n = \frac{\ln \frac{p_2}{p_1}}{\ln \frac{p_2}{p_1} - \ln \frac{T_2}{T_1}}$$

1...80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90...250



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

ABSOLUTNĚ ENERGETICKÝ PŘÍPRAVENÍ PRO ICH PRÁCE

**PRÁCE POLYTROPICKÉHO DĚJE**

EVROPSKÝ SOCIÁLNÍ FOND V ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Objemová práce**

$$A_{12} = \frac{1}{n-1} p_1 V_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$a_{12} = \frac{1}{n-1} p_1 V_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

**Technická práce**

$$A_{t12} = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$a_{t12} = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

1 ... 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

ABSOLUTNĚ ENERGETICKÝ PŘÍPRAVENÍ PRO ICH PRÁCE

**MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA POLYTROPICKÉHO DĚJE**

EVROPSKÝ SOCIÁLNÍ FOND V ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Tepl**

Stavová rovnice ideálního plynu  $p \cdot v = r \cdot T$   $v dp + p dv = r dT$

Rovnice polytropy  $p \cdot v^n = konst.$   $v dp + n \cdot p dv = 0$

$\ln p + n \cdot \ln v = \ln konst.$   $(1-n) p \cdot dv = r dT$

Po odečtení těchto rovnic  $dq = c_v dT + p dv = c_v dT + \frac{r dT}{1-n}$

Po dosazení  $p \cdot dv$  do 1. formy I. zákona termodynamiky  $dq = \left( c_v + \frac{c_p - c_v}{1-n} \right) dT = c_v \frac{1-n+k-1}{1-n} dT = c_n \frac{n-k}{n-1} dT$

$$Q_{12} = m \cdot c_n (T_2 - T_1) \quad q_{12} = c_n (T_2 - T_1)$$

Měrná tepelná kapacita polytropického děje  $c_n = c_v \frac{n-k}{n-1} \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

1 ... 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

ABSOLUTNĚ ENERGETICKÝ PŘÍPRAVENÍ PRO ICH PRÁCE

**POLYTROPICKÝ DĚJ V T-s DIAGRAMU**

EVROPSKÝ SOCIÁLNÍ FOND V ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{c_n dT}{T} = c_n \int_1^2 \frac{dT}{T}$$

$$s_2 - s_1 = c_n \ln \frac{T_2}{T_1}$$

1 ... 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

esf evropský sociální fond v ČR  
EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### POLYTROPICKÝ DĚJ

Zobrazení obecného polytropického děje  $p \cdot v^n = konst.$  v  $p$ - $v$  diagramu

Izobara  $n = 0$   $p \cdot v^0 = p = konst.$

Izochora  $n = \infty$   $p \cdot v^\infty = p^\infty \cdot v = v = konst.$

Izoterma  $n = 1$   $p \cdot v^1 = konst.$

Adiabata  $n = \kappa$   $p \cdot v^\kappa = konst.$

Technická polytropa  $n \in (1, \kappa)$

Polytropický děj modeluje kompresi či expanzi plynů v tepelných zařízeních reálněji, než izotermický nebo adiabatický děj.

1 ... 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

esf evropský sociální fond v ČR  
EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### PŘEHLED

Při nevratných dějích soustava neprochází rovnovážnými stavy a při ději opačném se nevrátí do původního stavu.

Typické nevratné děje v termomechanice:

- Vznik tepla třením
- Přenos tepla při konečném rozdílu teplot
- Difúze plynů
- Vyrovnání konečných rozdílů tlaků
- Škracení plynů a par

Důkaz nevratnosti samovolného děje v tepelně izolované soustavě je **nárůst entropie**.

1 ... 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

esf evropský sociální fond v ČR  
EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### VZNIK TEPLA TŘENÍM

Pro uzavřenou termodynamickou soustavu s reálným plynem platí:

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{dQ_{tr}}{T} + \frac{dQ_{ok}}{T}$$

Pro izolovanou soustavu lze psát  $dQ_{ok} = 0$

$$dS = \frac{dQ_{tr}}{T} = \frac{dA_{tr}}{T} \geq 0$$

V izolované soustavě entropie roste  $\Rightarrow$  tření je nevratný děj.

Nárůst entropie při adiabatické expanzi reálného plynu se třením je zřejmý také z  $T$ - $s$  diagramu.

1 ... 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetika-připraveni-pro-10h-práci

**PŘENOS TEPLA**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Přenos tepla při konečném rozdílu teplot v izolované soustavě

$dQ_V = dQ_N = dQ$

Změna entropie při ochlazení látky 1  
 $dS_V = \frac{dQ_V}{T_V} = \frac{-dQ}{T_V} = -\frac{dQ}{T_V}$

Změna entropie při ohřevu látky 2  
 $dS_N = \frac{dQ_N}{T_N} = \frac{dQ}{T_N} = \frac{dQ}{T_N}$

Celková změna entropie soustavy  
 $dS = dS_V + dS_N = -\frac{dQ}{T_V} + \frac{dQ}{T_N} = dQ \left( \frac{1}{T_N} - \frac{1}{T_V} \right) > 0$  Entropie roste, přenos tepla je nevratný děj

1...80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetika-připraveni-pro-10h-práci

**ŠKRČENÍ PLYNŮ A PAR**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Škrčení probíhá v kapiláře, ventilu, cloně ...

Pro děje v otevřené, izolované soustavě, bez konání technické práce platí z 2. formy 1. zákona termodynamiky  
 $dq = dh + da_i \Rightarrow 0 = dh + 0$

$dH = 0 \quad dh = 0 \quad H_1 = H_2 \quad h_1 = h_2$

Škrčení nahrazujeme **izoentalpickým dějem**. V průběhu děje dochází k poklesu entalpie.

**Nevratnost děje potvrzuje nárůst entropie.**

- Pro ideální plyny je izoentalpa totožná s izotermou  $T_2 = T_1$ , jelikož  $di = c_p dT$  a  $c_p = konst.$
- Pro reálné plyny (páry) může být  $T_2 < T_1$  nebo  $T_2 = T_1$  nebo  $T_2 > T_1$

1...80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetika-připraveni-pro-10h-práci

**PŘEHLED TEPELNÝCH CYKLŮ**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Cyklus (oběh)** je několik po sobě jdoucích dějů, po jejichž vykonání se soustava vrátí do původního stavu. Rozlišujeme cykly

- Vratné / Nevratné
- Přímé / Obrácené

**Vratné cykly** - skládají se výhradně z vratných termodynamických dějů

**Nevratné cykly** - obsahují alespoň jeden nevratný termodynamický děj

**Přímé cykly** - jsou cykly tepelných motorů, slouží pro získávání práce, které probíhají v p-v diagramu ve směru hodinových ručiček ⤴

**Nepřímé cykly** - jsou cykly tepelných poháněných pracovních strojů (chladicích zařízení a tepelných čerpadel), které práci spotřebovávají a v p-v diagramu probíhají obráceně ⤵

horký zásobník  
 Q<sub>H</sub>  
 Q<sub>C</sub>  
 chladný zásobník  
 práce

**PŘÍMÝ CYKLUS**  
 +Q<sub>H</sub> [J] přivedené teplo  
 -Q<sub>C</sub> [J] odvedené teplo  
 +A<sub>C</sub> [J] práce cyklu

1...90|91 92 93 94 95 96 97 98 99 100...250

---

---

---

---

---

---

---

---

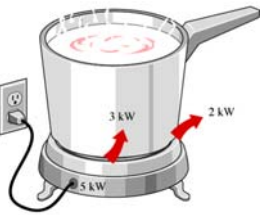

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

**ÚČINNOST**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\eta = \frac{\text{Užitečnost}}{\text{Náklady}} = \frac{3 \text{ kW}}{5 \text{ kW}} = 0,6 = 60\%$$

© The McGraw-Hill Companies, Inc., 1993

1...90 91 | 92 93 94 95 96 97 98 99 100...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

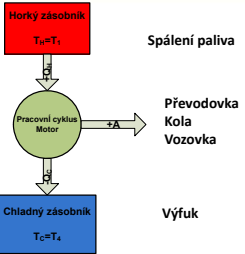
esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

**TERMICKÁ ÚČINNOST**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Termická účinnost  $\eta_t$  [-]

$$\eta_t = \frac{A_b}{Q_H} = \frac{Q_H - |Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H}$$

Parní stroj	20 %
Parní turbína	30 %
Benzínový spalovací motor	32 %
Naftový motor	43 %



Termická účinnost se teoreticky pohybuje v intervalu 0 až 1.  
Pro vyjádření v procentech je třeba účinnost vypočtenou dle uvedeného vzorce násobit hodnotou 100.

1...90 91 92 | 93 94 95 96 97 98 99 100...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

**PŘÍMÝ TEPELNÝ CYKLUS**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Spalovací motor**

- Palivo = zdroj tepla
- Užitek = práce na klikovém hřídeli
- Výfuk, chladič = odvod tepla



1...90 91 92 | 93 94 95 96 97 98 99 100...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-řpraveni-pro-10h-prace

**PŘÍMÝ CARNOTŮV CYKLUS**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Carnotův cyklus slouží k porovnávání účinnosti jiných cyklů

Carnotův cyklus přímý:  
 $T_H, T_C$  zásobníky tepla  
 1-2 izotermická expanze (pomalá)  
 2-3 adiabatická expanze (rychlá)  
 3-4 izotermická komprese (pomalá)  
 4-1 adiabatická komprese (rychlá)

Předávané teplo - viz izotermický děj  
 $dq = (c_v \cdot dT + p \cdot dv)_z = p \cdot dv = da$   
 $q_H = a_{12} = \int_1^2 p dv = \int_1^2 rT_H \frac{dv}{v} = rT_H \ln \frac{v_2}{v_1}$   
 $q_C = a_{34} = \int_3^4 p dv = \int_3^4 rT_C \frac{dv}{v} = rT_C \ln \frac{v_4}{v_3}$

Práce cyklu  
 $a_0 = q_H - |q_C|$   
 $a_0 = rT_H \ln \frac{v_2}{v_1} - rT_C \ln \frac{v_4}{v_3}$

1...90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-řpraveni-pro-10h-prace

**PŘÍMÝ CARNOTŮV CYKLUS**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Pro vyjádření termické účinnosti přímého Carnotova cyklu vyjádíme z definice

$$\eta_t = \frac{a_0}{q_H} = \frac{q_H - |q_C|}{q_H} = 1 - \frac{|q_C|}{q_H}$$

kde  $q_H = rT_H \ln \frac{v_2}{v_1}$   $q_C = rT_C \ln \frac{v_4}{v_3}$

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_C|}{q_H} = 1 - \frac{rT_C \ln \left( \frac{v_3}{v_4} \right)}{rT_H \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)}$$

Po úpravě bude účinnost přímého Carnotova cyklu ve tvaru

$$\eta_{tc} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

jelikož pro adiabaty platí:  
 $\frac{T_C}{T_H} = \frac{T_3}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_3} \right)^{\kappa-1}$   
 $\frac{T_C}{T_H} = \frac{T_4}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_4} \right)^{\kappa-1}$   $\frac{v_3}{v_4} = \frac{v_2}{v_1}$

1...90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-řpraveni-pro-10h-prace

**PŘÍMÝ CARNOTŮV CYKLUS p-V a T-S**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\eta_t = \frac{A_0}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H}$$

$$\eta_{tc} = \frac{A_0}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{T_3}{T_1}$$

1...90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetické přenosy pro Ith práce

**PŘÍMÝ CARNOTŮV CYKLUS TERMICKÁ ÚČINNOST**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Termická účinnost Carnotova cyklu

- Závisí na teplotách, nezávisí na druhu pracovní látky
- Roste s rostoucí teplotou  $T_H$  a klesající teplotou  $T_C$  (nelze jít pod nejnižší teplotu v okolí)
- Je vždy menší než 1 a pro  $T_H = T_C$  je  $\eta_c = 0$

$\eta_{tc}$  je při stejných extrémních teplotách větší než u termická účinnost teoretických cyklů nebo skutečných motorů.

Benzinový motor	pro $T_H = 2500 \text{ K}$ , $T_C = 600 \text{ K}$		
$\eta_{tc} = 0,76$	$\eta_{t,TEORIE} = 0,5$	$\eta_{t,skutečné} = 0,3$	
Parostrojní zařízení	pro $T_H = 600 \text{ K}$ , $T_C = 300 \text{ K}$		
$\eta_{tc} = 0,5$	$\eta_{t,TEORIE} = 0,3$	$\eta_{t,skutečné} < 0,3$	

Konstruktéři mají snahu vyvíjet a upravovat tepelné stroje tak, aby se přiblížili Carnotovu cyklu.  
Tento proces nazýváme CARNOTIZACE.

1...90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetické přenosy pro Ith práce

**PŘÍKLADY CARNOTOVA CYKLU**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**TROPICKÁ CYKLÓNA**

1...90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetické přenosy pro Ith práce

**PŘÍKLADY CARNOTOVA CYKLU**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**TEPELNÉ TRUBICE**

1...90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

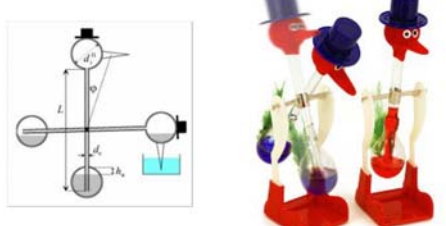
---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**PŘÍKLADY CARNOTOVA CYKLU**  
**VĚČNĚ PLÍČÍ PTÁK**



<http://www.dealextreme.com/p/novelty-dippy-drinking-bird-29233>

1 ... 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**OBRÁCENÝ TEPELNÝ CYKLUS**

**Chladicí zařízení**

- **Potřebuje dodávat práci = kompresor s elektromotorem**
- **Užitek = chladicí výkon**
- **Odváděné teplo**



1 ... 100 101 102 103 104 105 106 107 108 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**OBRÁCENÝ TEPELNÝ CYKLUS**

**Tepelné čerpadlo**

- **Potřebuje dodávat práci = kompresor s elektromotorem**
- **Užitek = dodávané teplo**
- **Zdroj tepla = chladný zásobník**



1 ... 100 101 102 103 104 105 106 107 108 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Asistent-energetik@přijevni.fme.vutbr.cz

**OBRÁCENÝ CARNOTŮV CYKLUS**

Slouží k porovnávání obrácených cyklů chladicích zařízení a tepelných čerpadel

Předávané teplo a práce cyklu

$$q_H = a_H = \int_1^2 p dv = \int_1^2 rT_H \frac{dv}{v} = rT_H \ln \frac{v_1}{v_2}$$

$$q_C = a_C = \int_3^4 p dv = \int_3^4 rT_C \frac{dv}{v} = rT_C \ln \frac{v_3}{v_4}$$

$$|a_0| = |q_H| - q_C = rT_H \ln \frac{v_1}{v_2} - rT_C \ln \frac{v_3}{v_4}$$

Pro 1 kg

Chladicí faktor  $\epsilon_{ch}$  - Koefficient znásobení COP (Coefficient of performance) pro chladicí zařízení

$$\epsilon_{ch} = \frac{q_C}{a_0} = \frac{q_C}{|q_H| - q_C}$$

Carnot  $\epsilon_{chC} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$

COP pro tepelná čerpadla (topný faktor  $\epsilon_{top}$ )

$$\epsilon_i = \frac{|q_H|}{a_0} = \frac{|q_H|}{|q_H| - q_C}$$

Carnot  $\epsilon_{iC} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$

1 ... 100 101 102 103 104 105 106 107 108 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Asistent-energetik@přijevni.fme.vutbr.cz

**OBRÁCENÝ CARNOTŮV CYKLUS**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\eta_i = \frac{A_0}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

$$\eta_{iC} = \frac{A_0}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{T_3}{T_1}$$

1 ... 100 101 102 103 104 105 106 107 108 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Asistent-energetik@přijevni.fme.vutbr.cz

**EFEKTIVITA CYKLŮ**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

*efektivita = proč zařízení konstruují co za to platím*

Motory, turbíny  $\eta_i = \frac{A_0}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H}$   $\eta_{iC} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$  Termická účinnost (0-1) Obvykle pod 0,5

Chladicí zařízení  $\epsilon_{ch} = \frac{|Q_C|}{A_0}$   $\epsilon_{chC} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$  Chladicí faktor Koefficient znásobení COP - Coefficient of performance Obvykle 4 a více

Tepelná čerpadla  $\epsilon_i = \frac{Q_H}{A_0}$   $\epsilon_{iC} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$  Topný faktor Koefficient znásobení COP - Coefficient of performance Obvykle 4 a více

1 ... 100 101 102 103 104 105 106 107 108 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetická příprava pro Ith práci

**SMĚR PRŮBĚHU CYKLU**

1 ... 100 101 102 103 104 105 106 107 108 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetická příprava pro Ith práci

**CARNOTOVA POROVNÁVACÍ ÚČINNOST**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\eta_{CP} = \frac{\eta_t}{\eta_{TC}} = \frac{1 - \frac{|Q_C|}{Q_H}}{1 - \frac{T_C}{T_H}}$$

V případě Carnova cyklu  $\eta_{CP} = 1$   $1 - \frac{|Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$

Vyjadřuje o kolik je cyklus méně účinnější než Carnotův cyklus

**Tepelný stroj je tím dokonalejší, čím bude menší rozdíl do účinnosti Carnotova cyklu**

1 ... 100 101 102 103 104 105 106 107 108 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetická příprava pro Ith práci

**NEVRATNÝ CARNOTŮV CYKLUS**

Zavedeme dva nevratné děje do přímého Carnotova cyklu:

- Přenos tepla do Carnotova cyklu při izotermickém ději 1\* - 2\*  
Teplu se přenáší z místa o teplotě vyšší do místa o teplotě nižší  $\Rightarrow T_H > T_H^*$
- Přenos tepla z Carnotova cyklu při izotermickém ději 3\* - 4\*  
Teplu se přenáší z místa o teplotě vyšší do místa o teplotě nižší  $\Rightarrow T_C < T_C^*$

Snižování teploty  $T_H$  a zvyšování teploty  $T_C$  způsobuje zmenšování termické účinnosti (termickou účinnost zmenšují i další nevratné děje).

Termická účinnost nevratného Carnotova cyklu je menší, než termická účinnost vratného Carnotova cyklu a platí vztah

$$\eta_{TC}^* = 1 - \frac{T_C^*}{T_H^*} < 1 - \frac{T_C}{T_H} = \eta_{TC}$$

1 ... 100 101 102 103 104 105 106 107 108 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetika-připraveni-pro-10h-prace

**NEVRATNÝ CARNOTŮV CYKLUS**  
 vratný      NEvratný

$$\eta_{iC} = 1 - \frac{T_C'}{T_H} < 1 - \frac{T_C}{T_H} = \eta_{iC}$$

1 ... 109 | 110 111 112 113 114 115 116 117 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetika-připraveni-pro-10h-prace

**II. ZÁKON TERMODYNAMIKY**

© The McGraw-Hill Companies, Inc., 1991

1 ... 109 110 | 111 112 113 114 115 116 117 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetika-připraveni-pro-10h-prace

**SLOVNÍ FORMY II. ZÁKONA TERMODYNAMIKY**

- Neexistuje perpetuum mobile 2. druhu
- Nelze získávat ze soustavy neživých látek práci tím, že ji ochlazujeme pod teplotu nejjednodušší látky v okolí (Kelvin)
- Teplo nemůže samovolně přecházet z tělesa o teplotě nižší na těleso o teplotě vyšší (Clausius)
- Nelze sestavit periodicky pracující stroj, který by odebíral teplo ze zásobníku a konal tomuto teplu ekvivalentní práci ⇒ Nutné 2 zásobníky tepla (Kelvin - Planck)
- Ideální oběh s největší účinností mezi dvěma teplotami je Carnotův oběh. Maximální účinnost tohoto oběhu závisí jen na teplotě a nezávisí na pracovní látce. Skládá se ze dvou izoterm a dvou adiabat.

William Kelvin  
 (1824-1907)

Rudolf Calusius  
 (1822-1888)

Sadi Carnot  
 (1796-1832)

1 ... 109 110 111 | 112 113 114 115 116 117 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-lh-práci

II. ZÁKON TERMODYNAMIKY PRO DĚJE

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Odvození z Clausiova integrálu  $\oint \frac{dq}{T} \leq 0 \Rightarrow \oint \frac{dq}{T} \leq \oint ds$

kde  $0 = \oint ds$

II. zákon termodynamiky pro děje, kde  $dQ$  je teplo předávané při daném ději mezi soustavou a okolím


$dS \geq \frac{dQ}{T} \quad ds \geq \frac{dq}{T}$

II. zákon termodynamiky pro děje v tepelně izolované soustavě kde teplo předávané mezi soustavou a okolím je nulové  $\Rightarrow dQ = 0$

$dS \geq 0 \quad ds \geq 0$

Princip vzrůstu entropie Tepelná smrt vesmíru

1 ... 109 110 111 112 113 114 115 116 117 ... 250




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-lh-práci

II. ZTD

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Horký zásobník  $T_H = T_1$

Pracovní cyklus Motor  $\rightarrow +A$

Chladný zásobník  $T_C = T_2$

~~Horký zásobník  $T_H = T_1$~~

~~Pracovní cyklus Motor  $\rightarrow +A$~~

~~Chladný zásobník  $T_C = T_2$~~

1 ... 109 110 111 112 113 114 115 116 117 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-lh-práci

II. ZTD

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Horký zásobník  $T_H = T_1$

Pracovní cyklus Chladicí zařízení  $\leftarrow -A_c$

Chladný zásobník  $T_C = T_2$

Horký zásobník  $T_H = T_1$

Pracovní cyklus Tepelné čerpadlo  $\leftarrow -A_c$

Chladný zásobník  $T_C = T_2$

~~Horký zásobník  $T_H = T_1$~~

~~Pracovní cyklus Tepelné čerpadlo  $\leftarrow -A_c$~~

~~Chladný zásobník  $T_C = T_2$~~

1 ... 109 110 111 112 113 114 115 116 117 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

II. ZTD INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

1 ... 109 110 111 112 113 114 115 116 117 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

PERPETUUM MOBILE INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Prvního druhu:**

- Dělá práci větší než přivedené teplo
- Vstupy nejsou rovny výstupům
- Porušuje I. Zákon termodynamiky

**Druhého druhu:**

- Dělá práci rovnou přivedenému teplu
- Chybí chladný zásobník (ochlazení až na absolutní nulu)
- Porušuje II. zákon termodynamiky

1 ... 109 110 111 112 113 114 115 116 117 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

PERPETUUM MOBILE INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Perpetuum mobile prvního druhu      Perpetuum mobile druhého druhu      Reálný stroj

1 ... 109 110 111 112 113 114 115 116 117 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolvent-energetik-připraven-pro-10h-prace

**KVALITA ENERGIE**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

1 ... 118 119 120 121 122 123 124 125 126 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolvent-energetik-připraven-pro-10h-prace

**EXERGETICKÁ ÚČINNOST**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

II. zákon termodynamiky říká:  
Nelze získávat ze soustavy neživých látek práci tím, že ji ochlazujeme pod teplotu  $T_{\infty}$  nejjednodušší látky v okolí.

**Exergie  $E$  [J], měrná exergie  $e$  [J.kg<sup>-1</sup>]**  
je využitelná část energie ve formě tepla

**Anergie  $B$  [J], měrná anergie  $b$  [J.kg<sup>-1</sup>]**  
je nevyužitelná část energie a platí:  
 $q_{12} = e_{12} + b_{12}$

**Exergetická účinnost** přímých cyklů je dána vztahem  
 $\eta_e = \frac{a_p}{e_H}$

$\eta_e > \eta_t$ , Carnotův cyklus může mít až  $\eta_e=1$   
 $\eta_e$  lépe vyjadřuje využití zařízení než  $\eta_t$   
 $\eta_e$  vyžaduje oproti  $\eta_t$  navíc znalost  $T_{\infty}$   
 $\eta_e$  vyjadřuje ale stejnou skutečnost, jako  $\eta_t$

1 ... 118 119 120 121 122 123 124 125 126 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolvent-energetik-připraven-pro-10h-prace

**VYUŽITÍ TEPELNÉ ENERGIE**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$e = \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T_H}\right) q_H$$

$$\dot{E} = \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T_H}\right) \dot{Q}_H$$

1 ... 118 119 120 121 122 123 124 125 126 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent energetického přípravku pro 114 práce

**III. ZÁKON TERMODYNAMIKY**

Nernstův tepelný teorem (1906)  
 Změna entropie čistých látek se s klesající teplotou blíží k nule.

Planck (1912)  
 Absolutní entropie každé kondenzované chemicky čisté látky má při 0 K nulovou hodnotu.

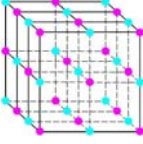
Matematický zápis:  $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$

Pozn.: Ukázalo se, že to platí jen pro krystalické čisté látky a nikoliv pro amorfní látky nebo slitiny. Krystalické látky mají totiž atomy uspořádané, a proto jejich entropie může být menší nebo až nulová.

**III. ZÁKON TERMODYNAMIKY**  
 Entropie čistých krystalických látek při 0 K je nulová.

Pozn.: V praxi bývá  $S = 0$  při  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  a pro  $t < 0 \text{ }^\circ\text{C}$  je  $S < 0$ .

Pozn.: Konečným počtem dějů nelze dosáhnout 0 K. V roce 1990 bylo dosaženo  $8.10^{-10}$  K.




---

---

---

---

---

---

---

---


---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent energetického přípravku pro 114 práce

**TŘI ZÁKONY TERMODYNAMIKY**

„Není možné zvítězit, je možné pouze dosáhnout nerozhodného výsledku.  
 Nerozhodného výsledku lze dosáhnout jedině za předpokladu absolutní nuly.  
 Není možné dosáhnout absolutní nuly.“



Walther Hermann Nernst (1864 - 1941)

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent energetického přípravku pro 114 práce

**IDEÁLNÍ 1-STUPŇOVÉ KOMPRESORY**

Ideální 1-stupňové kompresory jsou:

- Rotační kompresory
- Pístové kompresory bez škodného prostoru

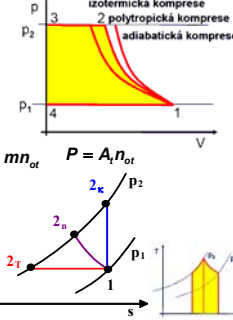
Práce kompresoru

$$A_0 = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = A_{112}$$

Příkon  $P$  [W] je funkcí  $\dot{V}$  [m³.s⁻¹]  $\dot{V} = V n_{ot}$   $\dot{m} = m n_{ot}$   $P = A_1 n_{ot}$

Pro adiabatický děj  $P = \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 \dot{V}_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]$

Pro polytropický děj  $P = \frac{n}{n - 1} p_1 \dot{V}_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n - 1}{n}} \right]$




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Asistent-energetik připravuje pro tih práce

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

**PRINCIP ČINNOSTI SKUTEČNÉHO PÍSTOVÉHO KOMPRESORU**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Kompresory se škodným prostorem

$\epsilon_0 = V_3/V_2$  poměrná velikost škodného prostoru  
 $V_2 = V_1 - V_3$  zdvihový objem  
 $V_{41} = V_4 - V_1$  nasávaný objem ( $V_{41} < V_2$ )

Objemová účinnost

$$\eta_o = \frac{V_{41}}{V_2} = \frac{V_2(1 + \epsilon_0) - V_4}{V_2} = 1 + \epsilon_0 - \frac{V_4}{V_2}$$

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{V_4}{\epsilon_0 V_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/n} \quad \frac{V_4}{V_2} = \epsilon_0 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/n}$$

$$\eta_o = 1 - \epsilon_0 \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/n} - 1\right] \quad \eta_o \text{ klesá s rostoucím tlakovým poměrem } p_2/p_1$$

1 ... 118 119 120 121 122 123 124 125 126 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Asistent-energetik připravuje pro tih práce

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

**KOMPRESORY SE ŠKODNÝM PROSTOREM**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Teoretický příkon kompresoru při polytropické kompresi a expanzi

$$P = \frac{n}{n-1} p_1 \dot{V}_1 \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] - \frac{n}{n-1} p_2 \dot{V}_2 \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$P = \frac{n}{n-1} p_1 \dot{V}_1 \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

Teplota po kompresi (z rovnice polytropy)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{max} = \left(\frac{T_{2,max}}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}} = \epsilon_{p,max}$$

- Z důvodu vysoké teploty po kompresi pro dané mazivo (mezí hodnoty pro kvalitní mazivo bývají 180 až 200 °C pozor nebezpečí vzplanutí oleje)
- Z důvodu klesající objemové účinnosti při vyšších tlakových poměrech  $p_2/p_1$

**VOLÍME VÍCESTUPŇOVOU KOMPRESI**

1 ... 118 119 120 121 122 123 124 125 126 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Asistent-energetik připravuje pro tih práce

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

**2-STUPŇOVÁ KOMPRESI**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Teoretický příkon pro oba stupně

$$P = \frac{n}{n-1} \dot{m} r T_1 \left[ 1 - \left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] + \frac{n}{n-1} \dot{m} r T_{1x} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_x}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

1 ... 118 119 120 121 122 123 124 125 126 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik přípraven pro Ith práce

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### z-STUPŇOVÁ KOMPRESIE

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$Z = \left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{p_2}{p_x}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Zavedeme substituci  $m = (n-1)/n$ , derivujeme Z dle  $p_x$  a derivaci položíme rovnou nule

$$\frac{m p_x^{m-1}}{p_1^m} - \frac{m p_2^m}{p_x^{m-1}} = 0 \Rightarrow p_x^{2m} = p_1^m p_2^m$$

$$p_x = \sqrt{p_1 p_2}$$

Optimální tlakový poměr  $\epsilon_P = \frac{p_x}{p_1} = \frac{p_2}{p_x} = \sqrt{\frac{p_2}{p_1}}$

z-STUPŇOVÁ KOMPRESIE - Tlakový poměr má být ve všech stupních stejný  $\epsilon_p = \frac{p_x}{p_1} = \sqrt[n]{\frac{P_{KONEČNÝ}}{P_{ZAČNÍ}}}$

1 ... 127 | 128 129 130 131 132 133 134 135 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik přípraven pro Ith práce

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### z-STUPŇOVÁ KOMPRESIE

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Stanovení kompresního poměru  $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{max} = \left(\frac{T_{2,max}}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}} = \epsilon_{P,max}$

Stanovení počtu stupňů  $Z' = \frac{\log \frac{p_2}{p_1}}{\log \epsilon_{P,max}}$   $Z'$  zaokrouhlíme nahoru a dostaneme z

Vypočítáme skutečný kompresní poměr  $\epsilon_p = z \sqrt[\frac{p_2}{p_1}]$

Vypočítáme skutečný příkon kompresoru  $P = \sum \dot{m} \cdot a_i = \frac{n}{n-1} p \cdot \dot{V} \cdot \left[ \epsilon_p^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \cdot Z$

1 ... 127 128 | 129 130 131 132 133 134 135 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik přípraven pro Ith práce

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### DIAGRAM SKUTEČNÉHO KOMPRESORU

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tlakové diagramy skutečných pístových kompresorů lze získat snímaním tlaku ve válci a snímaním úhlu pootočení klikové hřídele (přečítává se na objem plynu ve válci).

1 ... 127 128 129 | 130 131 132 133 134 135 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

ABSOLUTNĚ ENERGETICKĚ PŘÍPRAVENÍ PRO ICH PRÁCI

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### OTTŮV CYKLUS

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Ve vzorcích pro termickou účinnost

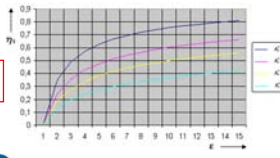
- pokrátime zlomek teplotou  $T_2$
- 1. člen čitatele vynásobíme  $T_3/T_3$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_4 T_3 / T_2 - T_1 T_3 / T_2}{T_3 T_2 / T_2 - T_1 T_2 / T_2}$$

$T_2/T_2 = T_3/T_3$ , viz důkaz:  $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\kappa-1} = \frac{T_4}{T_3}$  a pak lze psát

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_3 - T_2}{T_2}\right)}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1}$$

$\eta_t = 1 - \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{\kappa-1}$

 $\eta_t = f(\kappa, \epsilon)$ 


$\eta_t$  lze zvyšovat kompresním poměrem

1 ... 127 128 129 130 131 132 133 134 135 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

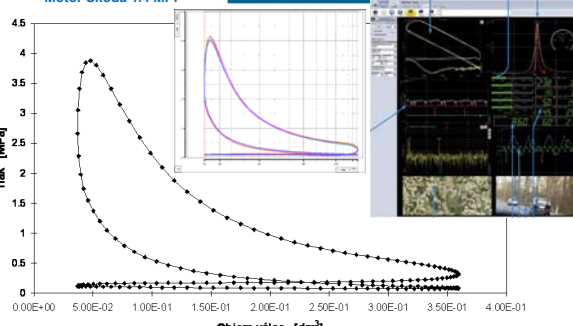
ABSOLUTNĚ ENERGETICKĚ PŘÍPRAVENÍ PRO ICH PRÁCI

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### SKUTEČNÉ CYKLY SPALOVACÍCH MOTORŮ

Motor Škoda 1.4 MPI

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



1 ... 127 128 129 130 131 132 133 134 135 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

ABSOLUTNĚ ENERGETICKĚ PŘÍPRAVENÍ PRO ICH PRÁCI

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### CYKLY PLYNOVÝCH TURBÍN

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Plynové turbíny se používají pro větší výkony. Rozlišujeme:

- Plynové turbíny se spalováním za konstantního tlaku nahrazované Braytonovým cyklem  
George Brayton (1830 - 1892) americký strojní inženýr
- Plynové turbíny se spalováním za konstantního objemu nahrazované Humphreyovým cyklem



Mikroturbína

1 ... 127 128 129 130 131 132 133 134 135 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-řpraveni-pro-ih-praca

**BRAYTONŮV CYKLUS**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Adiabatický kompresor (2) → p-konst. → Adiabatická turbína (3) → p-konst. → (4) → A<sub>0</sub> = A<sub>1</sub> - |A<sub>4</sub>|

1 ... 136 137 138 139 140 141 142 143 144 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-řpraveni-pro-ih-praca

**BRAYTONŮV CYKLUS**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$Q_H = mc_p (T_3 - T_2)$   
 $Q_C = mc_p (T_1 - T_4)$

Kompresní poměr  $\epsilon = V_1 / V_2$   
 Tlakový poměr  $\epsilon_p = p_2 / p_1$   
 Stupeň plnění  $\varphi = V_3 / V_2$

$\eta_t = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{mc_p (T_4 - T_1)}{mc_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left( \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_1} \right)$

$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1 - (\epsilon_p)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = 1 - \left( \frac{1}{\epsilon} \right)^{\kappa-1}$

**$\eta_t = 1 - (\epsilon_p)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$**        **$\eta_t = f(\kappa, \epsilon_p)$**

1 ... 136 137 138 139 140 141 142 143 144 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-řpraveni-pro-ih-praca

**BRAYTONŮV CYKLUS - ÚČINNOST**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Typický tlakový poměr pro plynové turbíny

Tlakový poměr v praxi mezi 5 až 20, jsme omezeni maximální teplotou cca  $T_{max} = 1600$  K

**pro max  $A_0$      $\epsilon_p = \left( \frac{T_{max}}{T_{min}} \right)^{\frac{\kappa}{2\kappa-2}}$**

1 ... 136 137 138 139 140 141 142 143 144 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

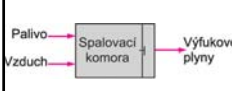
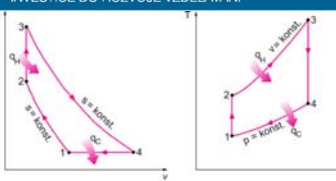
StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik-připraveno-pro-13h-prace

**HUMPHREYŮV CYKLUS**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Kompresní poměr  $\epsilon = V_1 / V_2$   $Q_c = mc_p (T_1 - T_4)$   $Q_H = mc_v (T_3 - T_2)$

Stupeň zvýšení tlaku  $\Psi = p_3 / p_2$

$\eta_t = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_H} = 1 - \frac{mc_p (T_4 - T_1)}{mc_v (T_3 - T_2)} = \dots = 1 - \frac{\kappa (\Psi^{\frac{1}{\kappa}} - 1)}{\epsilon^{\kappa-1} (\Psi - 1)}$   **$\eta_t = f(\kappa, \epsilon, \Psi)$**

Se stejným kompresorem lze při izochorickém přívodu tepla dosáhnout vyšší teplotu  $T_3$  než u Braytonova cyklu a následně větší práci cyklu.

1 ... 136 137 138 139 | 140 141 142 143 144 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

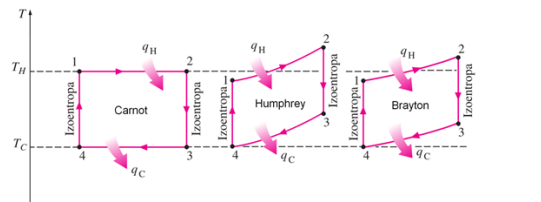
StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik-připraveno-pro-13h-prace

**POROVNÁNÍ CYKLU PLYNOVÝCH TURBÍN S CARNOTOVÝM CYKLEM**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



- Humphreyův cyklus** má při stejném  $\epsilon$  větší  $\eta_t$  než Braytonův cyklus, ale vyžaduje složitější zařízení a prakticky se nepoužívá.
- Carnotův cyklus** má při stejných extrémních teplotách vždy největší termickou účinnost  $\eta_t$ .

1 ... 136 137 138 139 | 140 | 141 142 143 144 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik-připraveno-pro-13h-prace

**IDEÁLNÍ PLYN**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Zjednodušující předpoklady:

- Molekuly mají stejnou hmotnost, kulový tvar a stejný poloměr
- Objem molekul je zanedbatelný vůči celkovému objemu plynu
- Povrch molekul je dokonale hladký a molekuly jsou dokonale pružné
- Mezi srážkami na sebe molekuly silově nepůsobí (konají rovnoměrný přímočarý pohyb)
- Vnitřní energie  $U$  je pouze funkcí teploty  **$U=f(T)$**

Reálný plyn se chová téměř jako ideální v případě dostatečně vysokých teplot a nízkých tlaků tj. model je platný přibližně pro řídké plyny za normálních termodynamických podmínek

Kompresní faktor

$Z = \frac{pV_m}{R_m T} = \frac{pv}{rT}$

Ideální plyn  $Z = 1$

Realný plyn  $Z \begin{cases} > 1 \\ = 1 \\ < 1 \end{cases}$

1 ... 136 137 138 139 | 140 | 141 142 143 144 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraven-pro-lh-práci

**KOMPRESNÍ FAKTOR**

$$Z = \frac{pV_m}{R_m T} = \frac{pv}{rT}$$

$$\lim_{p \rightarrow 0} Z = 1$$

Redukované veličiny

$$p_R = \frac{p}{p_{kr}} \quad T_R = \frac{T}{T_{kr}}$$

**Kritický bod** je bod na fázovém diagramu, který zakončuje křivku vypařování. Tento bod určuje **kritický stav látky**. Stavové veličiny  $p_{cr}$ ,  $T_{cr}$  a  $V_{cr}$  v tomto bodě se nazývají **kritický tlak**, **kritická teplota** a **kritický objem**. Plyn, který má teplotu vyšší než je kritická teplota, nelze žádným stlačením zkapalnit.

1 ... 136 137 138 139 140 141 142 | 143 144 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraven-pro-lh-práci

**TERMODYNAMICKÉ PLOCHY PLYNŮ V SOŘADNICÍCH p-v-T**

- Rovnice ideálních plynů** - neuvažují fázovou přeměnu
- Rovnice van der Waalse** - uvažují fázovou přeměnu, ale nepřesně (vyskytují se zde i záporné tlaky)
- Rovnice reálných látek** - jsou přesné (pevná fáze je hustší než kapalná)
- Rovnice pro H<sub>2</sub>O** - jsou nejpřesnější, jelikož H<sub>2</sub>O je nejpoužívanější (pevná fáze je řidší, než kapalná)

1 ... 136 137 138 139 140 141 142 143 | 144 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraven-pro-lh-práci

**SMĚS VZDUCHU A PALIVA A VÝFUKOVÉ PLYNY JAKO REÁLNÝ PLYN**

```

    Procedure CpKoefficient(fi,psi,y,d,g,T:double;var
    rp1,rp2:double;var ac:matcp);
    {procedura pro vypocet koeficientu polynomu vypoctu Cp
    fi ..... -1/faměla (smesovací pomer)
    psi ..... mol. pomer N/O vzduchu
    y ..... mol. pomer H/C paliva
    d ..... merna vlhkost vzduchu
    g ..... mol. pomer obsahu residui v cerstve smesi
    t ..... teplota vyfukovych plynu [K]
    (nutne pro bohate smesi- vliv obsahu CO)

    rp1 ..... plynova konstanta cerstve smesi [kJ/kg/K]
    rp2 ..... plynova konstanta spalín [kJ/kg/K]
    ac ..... koeficienty polynomu pro vypocet cp [kJ/kg/K]
    Function Fcp(t:double;x:integer):double; {vypocet merneho
    tepka Cp}
    Begin
    T:=t/1000.0;
    cp:=*(ac[6,k]+**ac[7,k]);
    cp:=*(ac[5,k]+cp);
    cp:=*(ac[4,k]+cp);
    cp:=*(ac[3,k]+cp);
    cp:=*(ac[2,k]+cp);
    cp:=*(ac[1,k]+cp);
    Result := (ac[0,k]+cp);
    End;
    
```

$r_{směs} = 274,7 \text{ J/kgK} \quad \kappa = 1,321$   
 $r_{spalín} = 289,1 \text{ J/kgK} \quad \kappa = 1,277$

1 ... 136 137 138 139 140 141 142 143 144 | ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-lh-práci

**ZMĚNY SKUPENSTVÍ**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

plyn, pevná látka, kapalina

sublimace, desublimace, vypařování var, kapalnění, tuhnutí, tání

1 ... 143 146 147 148 149 150 151 152 153 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-lh-práci

**OHŘEV LÁTKY PŘI KONSTANTNÍM TLAKU**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Izobarické vypařování je také izotermické

‘ Sytá kapalina  
 ” Sytá pára  
 Suchost páry

$$x = \frac{m'}{m}$$

Vlhkost páry

$$y = \frac{m'}{m} = \frac{m - m''}{m}$$

$$y = 1 - x$$

1 ... 145 146 147 148 149 150 151 152 153 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-lh-práci

**$t_{23}$   $T_{23}$  TEPLOTA VARU**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Teplota varu - je funkcí tlaku

Papinův hrnec

Var ve velkých nadmořských výškách

$h = 8000 \text{ m}$   
 $p = p_N/3 = 34 \text{ kPa}$   
 $T_{23} = 70 \text{ °C}$

1 ... 145 146 147 148 149 150 151 152 153 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveno-pro-10h-prace

**p-T DIAGRAM**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$p_k = 22,06 \text{ MPa}$   $t_k = 373,95 \text{ °C}$   $v_k = 0,003106 \text{ m}^3/\text{kg}$

1 ... 145 146 147 148 149 150 151 152 153 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveno-pro-10h-prace

**ANOMÁLIE VODY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- Roste-li teplota kapaliny, její hustota se zmenšuje
- To ovšem neplatí pro vodu při teplotě od 0°C do 4°C.**
- Tuto výjimku nazýváme **TEPLOTNÍ ANOMÁLIE VODY**
  - Největší hustotu má voda o teplotě 4 °C (přesně 3,98 °C)
    - Ve velkých rybnících a jezerech má voda u dna tuto teplotu v zimě i v létě
    - Umožňuje proto rybám i dalším vodním živočichům přežít mrazy i horka

Rybník v létě      Rybník v zimě

1 ... 145 146 147 148 149 150 151 152 153 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveno-pro-10h-prace

**POUŽITÍ TABULEK A DIAGRAMŮ**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Stavové rovnice par jsou složité proto se používají se **tabulky a diagramy**.

Používané parní tabulky	Používané parní diagramy
<ul style="list-style-type: none"> <li>Syté páry a syté kapaliny (mapují jen hodnoty 'a')</li> <li>Přehřáté páry (mapují plochu přehřáté páry)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>p-v diagram</li> <li>T-s diagram</li> <li>h-s diagram</li> <li>ale i p-t, p-h, T-h diagram aj.</li> </ul>

VÝCHOZÍ VELIČINY pro konstrukci tabulek a diagramů:

- Naměřené veličiny **p-T-v** (včetně stavů syté kapaliny a syté páry)
- Naměřená závislost  $c_p = f(T, p)$  včetně  $l_{23}$

**CÍLOVÉ VELIČINY pro p-T: v, h, u, s**

1 ... 145 146 147 148 149 150 151 152 153 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolvent-energetické přípravy pro I. rok práce

STAVOVÉ (ENERGETICKÉ) VELIČINY MOKRÉ PÁRY

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vychází se ze syté kapaliny (1 apostrof ') a syté páry (2 apostrofy ")

Veličiny  $V, H, U, S$  jsou aditivní a platí:

$$V_x = V' + V'' \quad H_x = H' + H'' \quad U_x = U' + U'' \quad S_x = S' + S''$$

$$mV_x = m'v' + m''v'' \Rightarrow v_x = \frac{m'}{m}v' + \frac{m''}{m}v'' = (1-x)v' + xv''$$

Po úpravách platí:

$$v_x = v' + x(v'' - v')$$

$$h_x = h' + x(h'' - h')$$

$$u_x = u' + x(u'' - u')$$

$$s_x = s' + x(s'' - s')$$

**Stavy mokré páry lze snadno a přesně počítat z tabulek syté kapaliny a syté páry**, které nejsou rozsáhlé, jelikož mapují jen hodnoty ' a ". Používají se přitom:

- Uvedené rovnice přímek
- Interpolace v tabulkách

1...145 146 147 148 149 150 151 152 153...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolvent-energetické přípravy pro I. rok práce

p-v DIAGRAM PÁRY

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$x=0$  dolní mezní křivka  
se stavy syté kapaliny označované jedním apostrofem '

$x=1$  horní mezní křivka  
se stavy syté páry označované dvěma apostrofy ''

Mokrý pára je směs syté kapaliny a syté páry

Izobarický var a-b je také děj izotermický

1...145 146 147 148 149 150 151 152 153...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolvent-energetické přípravy pro I. rok práce

T-s DIAGRAM PÁRY

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Izobary v oblasti mokré páry jsou rovnoběžné.

V místě, kde jsou izotermny rovnoběžné s izoentalpami, je možné použít stavovou rovnici ideálního plynu.

Plocha pod izobarou a-b je měrné výparné teplo  $l_{23}$  [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

- mění se s teplotou
- pro  $T_{kr}$  je nulové

1...145 146 147 148 149 150 151 152 153...250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### h-s DIAGRAM PÁRY

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Izobary v oblasti mokré páry nejsou rovnoběžné.

V místě, kde jsou izotermny rovnoběžné s izoentalpami, je možné použít stavovou rovnici ideálního plynu.

Pro H<sub>2</sub>O se v používá pouze výřez diagramu (část vlevo nahore není užitečná), mokrá pára se počítá z tab. syté páry a kapaliny

1 ... 154 155 156 157 158 159 160 161 162 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### VODNÍ PÁRA = REALNÝ PLYN

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vodní pára je reálný plyn ve stavu blízkém zkvalnění.

1 ... 154 155 156 157 158 159 160 161 162 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### VÝPOČTY S VODNÍ PÁROU

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

~~Ideální plyn:~~

1. Stavová rovnice
2. Vztahy mezi p, V, T
3. I. Zákon termodynamiky
4. II. Zákon termodynamiky

**Vodní pára (reálný plyn):**

1. Tabulky syté kapaliny a syté
2. Diagram h-s vodní páry
3. I. Zákon termodynamiky  
 $q_{12} = \Delta u_{12} + a_{12}$     $q_{12} = \Delta h_{12} + a_{12}$
4. II. Zákon termodynamiky  
 $\Delta s_{12} = q_{12} / T$
5. Definiční vztah entalpie  
 $h = u + p \cdot v$
6. Musíme počítat v měrných veličinách: v, h, u, s, a, a<sub>t</sub> až výsledky přepočítáme na V, H, U, S, A, A<sub>t</sub>

1 ... 154 155 156 157 158 159 160 161 162 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

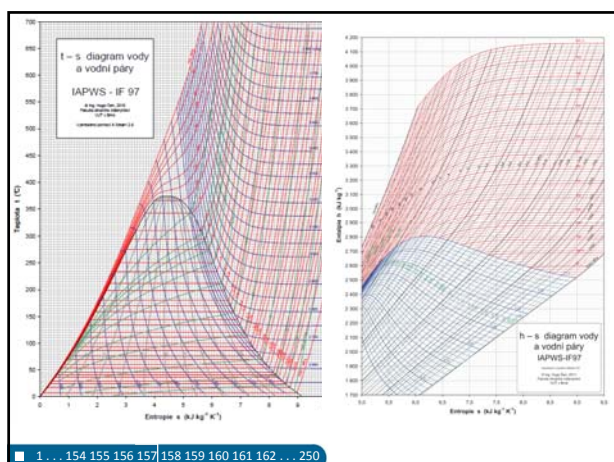
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

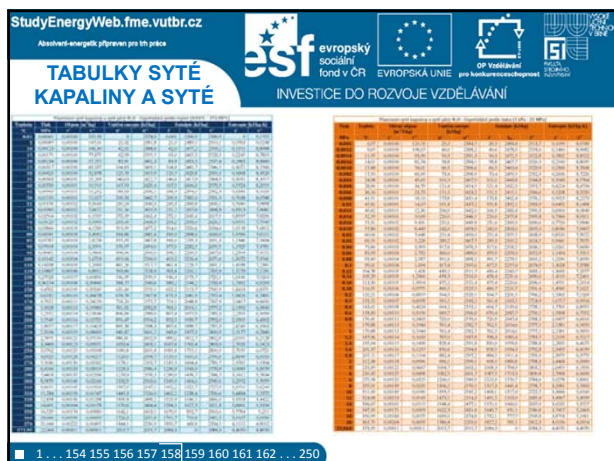
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

evropský sociální fond v ČR  
EVROPSKÁ UNIE  
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

ŘEŠENÍ STAVŮ VODNÍ PÁRY NA POČÍTAČÍCH

Výpočtové rutiny IAPWS (jsou psané ve Fortranu - lze je přepsat do svých programů, nejsou však ošetřené vůči omylům při zadávání - počítají pak nesmyslné hodnoty)  
Interaktivní grafický software (slouží k výpočtům stavů a základních termodynamických dějů vodní páry, pracuje na principu interpolace, lze jej rozšířit pro výpočty jiných látek)

1 ... 154 155 156 157 158 159 160 161 162 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

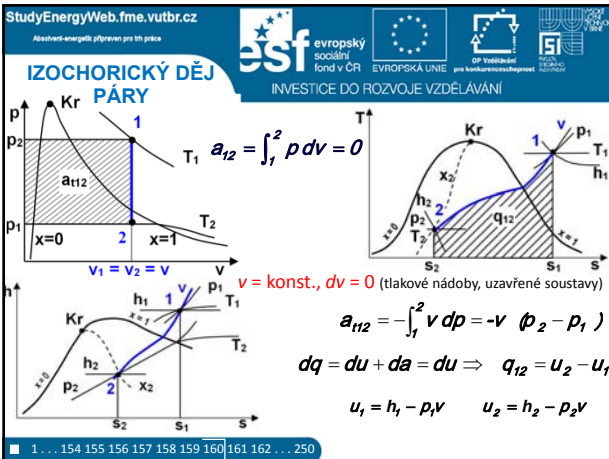
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

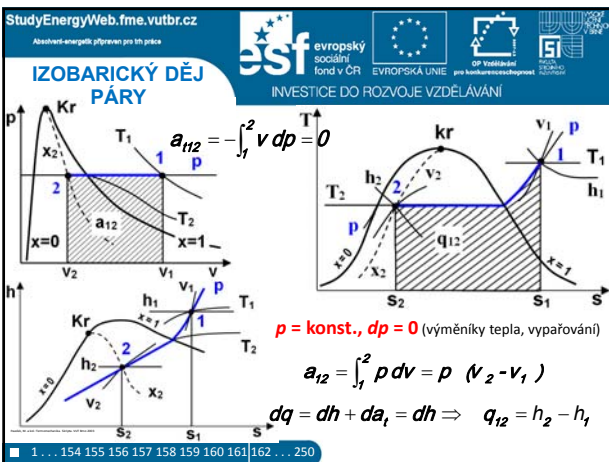
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

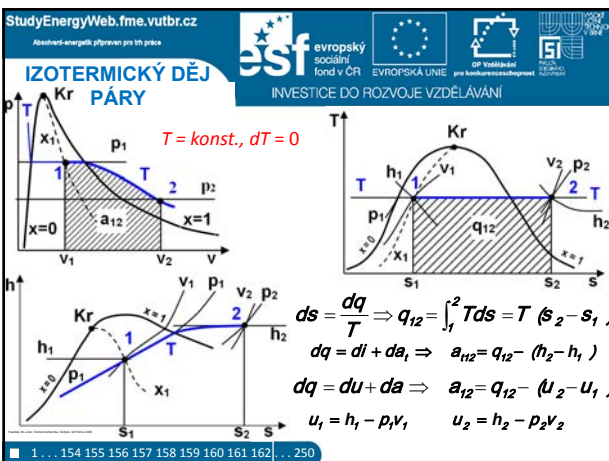
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetické přenosy pro ICh práce

**IZOENTROPICKÝ DĚJ PÁRY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$q_{12} = 0$

$ds = 0, dq = 0$ , adiabatický děj bez tření je vratný izoentropický děj (teoretické řešení komprese, expanze)

$dq = dh + da_1 \Rightarrow a_{h12} = -(h_2 - h_1)$

$dq = du + da \Rightarrow a_{u12} = -(u_2 - u_1)$

$u_1 = h_1 - p_1 v_1 \quad u_2 = h_2 - p_2 v_2$

$s_1 = s_2 = s$

1 ... 163 164 165 166 167 168 169 170 171 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetické přenosy pro ICh práce

**ADIABATICKÝ DĚJ PÁRY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$dq_{0K} = 0, q_{TT} > 0$ , adiabatický děj se třením je nevratný děj ( $s_2^* > s_1$ )

$q_{12}^* = q_{TT}^*$  ⇒ plocha pod křivkou 1-2\*

Termodynamická účinnost expanze

$\eta_{td-Ex} = \frac{a_{h12}^*}{a_{h12}} = \frac{h_1 - h_2^*}{h_1 - h_2} < 1$

1 ... 163 164 165 166 167 168 169 170 171 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetické přenosy pro ICh práce

**IZOENTROPICKÝ DĚJ PÁRY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$h = konst., dh = 0$  je nevratný děj, používá se pro řešení adiabatického ŠKRCENÍ par:

- ve ventilech při regulaci,
- v odpařovacích chladicích zřízeních

Smysl má počáteční a konečný stav.

$H_1 = H_2 \quad h_1 = h_2$

1 ... 163 164 165 166 167 168 169 170 171 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### PARNÍ STROJ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

1 ... 163 164 165 166 167 168 169 170 171 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### PAROSTROJNÍ ZÁŘIZENÍ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Parostrojní zařízení (parní turbína s příslušenstvím) se používá v **tepelných a jaderných elektrárnách** pro pohon elektrického generátoru. Jedná se o **velké stacionární turbíny** pro velké výkony, u kterých je pro nás významné i nepatrné zvýšení účinnosti. Pracovní látkou je **H<sub>2</sub>O**.

Vlastní **cyklus** je principiálně **nezávislý na zdroji tepla**, kterým může být kotel na pevná (uhlí, biomasa), kapalná či plynná paliva (zemní plyn, bioplyn) nebo jaderný reaktor.

Vynalezena roku **1884** švédem **Charlesem Parsonsem**

1 ... 163 164 165 166 167 168 169 170 171 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### LAVALOVA TURBÍNA

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Zakladatel švédské firmy **Alfa Laval AB**  
<http://www.alfalaval.com/>

**Gustaf de Laval**  
1875 - 1913

**1888**  
30000 ot/min

1 ... 163 164 165 166 167 168 169 170 171 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetický přenos pro 1 kWh práce

**CARNOTŮV CYKLUS V OBLASTI MOKRÉ PÁRY**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$q_H = T_H (s_1 - s_4)$   
 $q_C = T_C (s_3 - s_2)$   
 $\eta_{tc} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$   
 $\eta_t = 1 - |q_C|/q_H$

T Turbína  
 C Kondenzátor  
 NČ Napájecí čerpadlo  
 K Kotel  
 G Generátor

1 ... 163 164 165 166 167 168 169 | 170 171 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetický přenos pro 1 kWh práce

**RANKINEŮV-CLAUSIŮV CYKLUS S PŘEHŘEVEM PÁRY**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$q_H = h_1 - h_5$     $q_C = h_4 - h_2$   
 $a_T = h_1 - h_2$     $a_N = v \cdot (p_4 - p_5)$   
 $\eta_t = \frac{a_T - |a_N|}{q_H} = \frac{a_0}{q_H} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_4 - h_5)}{h_1 - h_5}$

E Ekonomizér  
 K Kotel  
 P Přehřívák  
 1 Ostrá pára 500-550 °C 13-15 MPa

1 ... 163 164 165 166 167 168 169 170 | 171 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetický přenos pro 1 kWh práce

**REÁLNÝ RANKINEŮV-CLAUSIŮV CYKLUS**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

(a) Skutečný Rankinův-Clausiusův oběh zahrnující nevratnost dějů a tlakové a tepelné ztráty  
(b) Pouze nevratnost dějů v napájecím čerpadle a turbíně

(a) (b)

1 ... 163 164 165 166 167 168 169 170 171 | ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetiké přípravené pro ICH práce

**VLIV SNIŽOVÁNÍ TLAKU V KONDENZÁTORU**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

1 ... 172 173 174 175 176 177 178 179 180 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetiké přípravené pro ICH práce

**CHLAZENÍ**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Chlazení lze provádět:**

- Chladnější látkou v chladicích (termodynamický děj)
- Pomocí strojního chladicího zařízení kompresorového či ejektorového (tepelný cyklus)
- Pomocí absorpčního chladicího zařízení (tepelný cyklus)
- Dalšími způsoby

**Cykly chladicích zařízení**  
 jsou obrácené, při nichž se práce spotřebovává. Jsou provozovány s chladivem, nejčastěji v oblasti par, kde se využívá teplo fázové přeměny.

**Vhodná chladiva:** NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, R134a, 407c, 410a, 600a, (11, 12, 22) ...

1 ... 172 173 174 175 176 177 178 179 180 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetiké přípravené pro ICH práce

**KOMPRESOROVÉ CHLADICÍ ZAŘÍZENÍ ODPAŘOVACÍ**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$T_x$  je teplota ochlazované látky  
 $T_y$  je teplota okolního prostředí

Teplo se předává izobaricky (v oblasti páry)  
 $dq = dh - v \cdot dp = dh$  a platí:

$q_H = h_3 - h_2$   $q_C = h_1 - h_4 = h_1 - h_3$

$\epsilon_{ch}$  - chladicí faktor - ro ideální cyklu chladicích zařízení

$$\epsilon_{ch} = \frac{q_C}{|q_H - q_C|} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1}$$

1 ... 172 173 174 175 176 177 178 179 180 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### KOMPRESOROVÉ TEPELNÉ ČERPADLO ODPAŘOVACÍ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Může mít stejné uspořádání a stejný cyklus jako chladicí zařízení, ale

- $T_x$  je teplota z nízkopotenciálního zdroje
- $T_y$  je teplota okolního prostředí

Teplu se předává izobaricky (v oblasti páry)  
 $dq = dh - v \cdot dp = dh$  a platí:

$$q_H = h_3 - h_2 \quad q_C = h_1 - h_4 = h_1 - h_3$$

$\epsilon_{top}$  - topný faktor pro ideální cyklus tepelného čerpadla

$$\epsilon_t = \frac{q_H}{q_H - q_C} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

1 ... 172 173 174 175 176 177 178 179 180 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### 1-ROZMĚRNÉ ADIABATICKÉ PROUDĚNÍ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Proudění plynů a par

- v potrubích
- ve zužujících se dýzách
- v Lavalových dýzách

vyskytujících se v lopatkových strojích apod. lze považovat za jednorozměrné. Pak nás zajímají jen střední rychlosti proudění v průtokových průřezech.

V této kapitole se zaměříme na proudění bez přenosu tepla, které řešíme jako **adiabatickou expanzi**.

Řešení vychází ze tří rovnic:

- Rovnice kontinuity
- Rovnice pohybové
- Rovnice energetické

1 ... 172 173 174 175 176 177 178 179 180 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

esf evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### ROVNICE KONTINUITY

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Rozlišujeme proudění

- Laminární
- Turbulentní

Rychlostní profily v kanále

Dynamická mezní vrstva

O laminárním či turbulentním proudění rozhoduje Reynoldsovo číslo.

Rovnice kontinuity pro stlačitelné tekutiny

$$\dot{m} = \frac{S \cdot w}{v} = S \cdot w \cdot \rho = konst.$$

$\dot{m}$ [kg·s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní tok
$w$ [m·s <sup>-1</sup> ]	střední rychlost
$S$ [m <sup>2</sup> ]	průřez

1 ... 172 173 174 175 176 177 178 179 180 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt energetik připravili pro tih práce

**CELKOVÉ PARAMETRY PROUDU**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Celkové parametry proudu (klidové) jsou parametry stojící tekutiny (adiabaticky zabrzděné tekutiny). Označují se obvykle indexem „0“

Spojená pohybová a energetická rovnice má tvar  $-dh = d \frac{w^2}{2}$

Po integraci bude  $-(h - h_0) = \frac{w^2 - w_0^2}{2}$

Pro klidovou entalpii platí:  $h_0 = h + \frac{w^2}{2}$

Pro klidovou teplotu ideálního plynu platí:  $T_0 = T + \frac{w^2}{2c_p}$

Klidový tlak, měrný objem a hustota ideálního plynu vypočteme ze vztahů:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad \frac{p}{p_0} = \left(\frac{v_0}{v}\right)^\kappa \quad \rho_0 = \frac{1}{v_0}$$

1 ... 181 182 183 184 185 186 187 188 189 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt energetik připravili pro tih práce

**MĚŘENÍ TEPLoty PROUDU**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$T_C = T_S + \frac{w^2}{2 \cdot c_p}$     $T_D = \frac{w^2}{2 \cdot c_p}$     $T_D = \frac{4 \cdot w^2}{2 \cdot c_p}$

$T_C = T_{S\infty} + \frac{w^2}{2 \cdot c_p}$     $T_S = T_C - 4 \cdot T_{D\infty}$

$T_C = T_i - (1 - \zeta) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot c}$

Restituční koeficient 0,8-0,95 určuje se cejchováním a závisí na zabudování a Machově čísle

1 ... 181 182 183 184 185 186 187 188 189 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt energetik připravili pro tih práce

**ZUŽUJÍCÍ SE DÝZA**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Spojená pohybová a energetická rovnice má tvar  $da_t = -dh = d \frac{w^2}{2}$

Po integraci od průřezu  $S_1$  do průřezu  $S$  bude  $h_1 - h = \frac{w^2 - w_1^2}{2} \Rightarrow w = \sqrt{2(h_1 - h) + w_1^2}$

Pro  $w_1 = 0$  a adiabatický děj ideálního plynu je

$$w = \sqrt{2(h_1 - h)} = \sqrt{2a_1} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}$$

Rychlost  $w$  dosadíme do rovnice kontinuity a dostaneme

$$\dot{m} = \frac{S}{v} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}$$

Do rovnice zavedeme a dostaneme ...  $v = v_1 \left(\frac{p_1}{p}\right)^{\frac{1}{\kappa}}$

1 ... 181 182 183 184 185 186 187 188 189 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik přípravení pro Ith práce  
 evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### ZUŽUJÍCÍ SE DÝZA INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Rovnici kontinuity můžeme nyní psát ve tvaru  $m = \frac{S}{v_1} \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]} = S \psi \sqrt{2 \frac{p_1}{v_1}}$

kde  $\psi$  je výtoková funkce, pro kterou platí

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[ \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[ (\beta)^{\frac{2}{\kappa}} - (\beta)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}$$

**$\beta = \frac{p}{p_1}$       $\psi = f\left(\kappa, \frac{p}{p_1}\right)$**

Provedeme-li 1. derivaci funkce  $\psi$  dle  $p/p_1$ , a položíme ji rovnu nule, dostaneme **kritický tlakový poměr, při kterém je dosažena kritická rychlost  $w_k$**

$$\beta_k = \frac{p_k}{p_1} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

1 ... 181 182 183 184 185 186 187 188 189 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik přípravení pro Ith práce  
 evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### ZUŽUJÍCÍ SE DÝZA – IZOENTALPICKÝ SPÁD INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Při proudění plynů nebo par konvergentní tryskou lze maximálně využít adiabatický spád daný rozdílem entalpií mezi body 1 a K (dosáhne rychlosti  $w_k$ ) a zbytek neužitečného adiabatického spádu se ztratí volnou expanzí plynu do okolí za ústím trysky.

1 ... 181 182 183 184 185 186 187 188 189 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik přípravení pro Ith práce  
 evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

### RYCHLOST ZVUKU INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Lze dokázat, že kritická rychlost  $w_k$  je rychlost zvuku  **$a = \sqrt{\kappa p v}$** .

**Kritickou rychlost dostaneme** pro kritický tlakový poměr

$$w_k = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}$$

$$w_k = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[\frac{\kappa+1-2}{\kappa+1}\right]}$$

kde  $\beta_k = \frac{p_k}{p_1} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$

Dále převeďme parametry  $p_1 v_1$  na  $p_k v_k$  v místě  $w_k$

$$w_k = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} p_1 v_1}$$

$$p_1 v_1^\kappa = p_k v_k^\kappa \Rightarrow p_1 v_1 = p_k v_k \left(\frac{v_k}{v_1}\right)^{\kappa-1} \text{ kde } \frac{v_k}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_k}\right)^{\frac{1}{\kappa}}$$

$$p_1 v_1 = p_k v_k \left(\frac{p_1}{p_k}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = p_k v_k \frac{\kappa+1}{2}$$

1 ... 181 182 183 184 185 186 187 188 189 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-technologie-pro-18h-prace

**KRITICKÁ RYCHLOST** INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$\kappa$

1,3     $\beta_k$   
 0,5457

1,4    0,5283

1,66   0,4881

V oblasti I je proudění podkritické  
 V oblasti II je proudění kritické (tekutina proudí na výstupu z dýzy rychlostí zvuku, signály se šíří též rychlostí zvuku,  $a$ , je ztrátová práce)

- Pro  $p_2 = p_1, p_2/p_1 = 1, w_2 = 0$
- Pro  $p_k < p_2 < p_1$  (oblast I)  
 $p_2/p_1 < p_2/p_1 < 1, w_2$  roste
- Pro  $p_2 = p_1, p_2/p_1 = p_2/p_1, w_2 = w_k$
- Pro  $p_2 < p_k$  (oblast II)  
 $p_2/p_1 < p_2/p_1, w_2 = w_k$  čárkovaná čára

1... 181 182 183 184 185 186 187 188 189 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-technologie-pro-18h-prace

**RYCHLOST ZVUKU** INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Při relativním pohybu tělesa vůči tekutině nadzvukovou rychlostí  $W$  vznikají rázové vlny.  
 Čelo rázové vlny se šíří ve volném prostoru rychlostí zvuku  $a$

MACHOVO ČÍSLO  $Ma = \frac{W}{a}$

*Mach = Rychlost objektu / Rychlost zvuku*

Prof. Dr. ERNST MACH  
 \* 18. 2. 1838  
 Brno-Chrlice, ČR  
 † 9. 2. 1916  
 Harr, Německo

$a = \sqrt{\kappa \cdot p \cdot v} = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T}$

1... 181 182 183 184 185 186 187 188 189 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-technologie-pro-18h-prace

**VÝPOČET ŽUŽUJÍCÍ SE DÝZY** INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- Stanovení režimu proudění:  
 Pro  $\beta = p_2/p_1 > \beta_k = p_k/p_1$  je podkritické proudění  
 Pro  $\beta = p_2/p_1 < \beta_k = p_k/p_1$  je kritické proudění
- Výpočet  $W_2$ : Pro ideální plyn

Oblast I podkritické proudění

$$W_2 = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}$$

Oblast II kritické proudění

$$W_2 = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left(\frac{p_k}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}$$

$\beta_k = \frac{p_k}{p_1} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$   
 Pro páru

$$W_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$$

Pro páru  
 Z diagramu / tab.  
 Z diagramu / tab.

- Výpočet  $V_2$ : Pro ideální plyn  
 Oblast I  $V_2 = v_1 (p_1/p_2)^{1/\kappa}$   
 Oblast II  $V_2 = v_1 (p_1/p_k)^{1/\kappa}$
- Výpočet  $\dot{m}$ :  $\dot{m} = S_2 W_2 / v_2$

1... 181 182 183 184 185 186 187 188 189 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

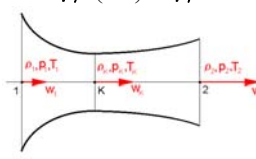
StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetik příprava pro ICH práce

**VÝPOČET LAVALOVY DÝZY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- Kontrola nutnosti Lavalovy dýzy:  
$$\frac{p_K}{p_1} = \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K}{K-1}} > \frac{p_2}{p_1}$$
- Rychlosti:  
Plyn  $w_K = \sqrt{\frac{2K}{K-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}\right]}$   
 $w_2 = \sqrt{\frac{2K}{K-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}\right]}$
- Pára  $w_K = \sqrt{2(h_1 - h_K)}$ ,  $w_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$
- Objemy:  
Plyn  $v_K = v_1 \left(\frac{p_1}{p_K}\right)^{\frac{1}{K}}$ ,  $v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{K}}$
- Pára Z diagramu / tabulek
- Průřezy:  $m = S_1 w_K / v_K = S_2 w_2 / v_2$



Délka:  $L = \frac{D_2 - D_K}{2 \cdot \tan \beta}$

1 . . . 190 191 192 193 194 195 196 197 198 . . . 250

---

---

---

---

---

---

---

---

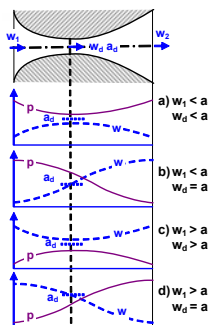
StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetik příprava pro ICH práce

**CHOVÁNÍ LAVALOVY DÝZY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Závěr pro fyzikální úvahy

$$\frac{dS}{S} = \frac{1 - Ma^2}{\kappa Ma^2} \frac{dp}{p}$$
$$\frac{dw}{w} = \frac{v dp}{w^2}$$


	$Ma < 1$	$Ma = 1$	$Ma > 1$
$dS < 0$	$dp < 0$	$dp > 0$	$dp > 0$
$w < a$	$dw > 0$	$dw < 0$	$dw < 0$
$Ma > 1$	$dp > 0$	$dp < 0$	$dp < 0$
$w > a$	$dw < 0$	$dw > 0$	$dw > 0$

1 . . . 190 191 192 193 194 195 196 197 198 . . . 250

---

---

---

---

---

---

---

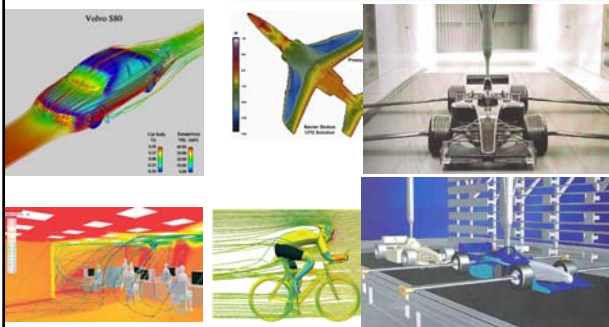
---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetik příprava pro ICH práce

**CFD – APLIKACE - EXPERIMENTY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



1 . . . 190 191 192 193 194 195 196 197 198 . . . 250

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi energetiky připravují pro Vás práci

**PŘENOS TEPLA – SAMOSTATNÁ DISCIPLÍNA**

Podobný rozdíl jako v mechanice mezi dynamikou a kinematikou.

Znamé pojmy: **TEPLO  $Q$  [J]**  $Q = \dot{Q} \cdot \tau = \dot{q} \cdot S \cdot \tau$

MĚRNÉ TEPLLO  $q$  [J.kg<sup>-1</sup>]

Nové pojmy: **TEPELNÝ TOK  $\dot{Q}$  [W]**  
**HUSTOTA TEPELNÉHO TOKU  $\dot{q}$  [W.m<sup>-2</sup>]**

1 ... 190 191 192 193 | 194 195 196 197 198 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi energetiky připravují pro Vás práci

**TŘI ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA**

- PŘENOS TEPLA VEDENÍM (KONDUKČÍ):** Kinetická energie neuspořádaného pohybu molekul se předává srážkami na sousední molekuly, a tak se přenáší tepelná energie. Vedení je v **pevných látkách**, ale i v kapalinách a plynech (především při vyloučení proudění). Přenos tepla vedením zvyšují volné elektrony (ionty v tekutinách).
- PŘENOS TEPLA KONVEKČÍ (PROUDĚNÍM):** Přemístěním molekul v prostoru v důsledku **nuceného či přirozeného proudění** se přenáší i jejich tepelná energie. Přenos tepla konvekcí tudíž probíhá v **tekutinách** (difúze v pevných látkách).
- PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM (RADIACÍ, SÁLÁNÍM):** Každý objekt s  $T > 0$  K vyzářuje fotony, které jsou nositeli energie včetně tepelné. Fotony se šíří v **průhledném prostředí** rychlostí světla.

1 ... 190 191 192 193 194 | 195 196 197 198 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi energetiky připravují pro Vás práci

**ZÁVISLOST V ČASE**

Rozlišujeme přenos tepla **STACIONÁRNÍ** a **NESTACIONÁRNÍ**

1 ... 190 191 192 193 194 195 | 196 197 198 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolvent-energetika přípraven pro trh práce

**DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE VEDENÍ TEPLA**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**KARTÉZSKÝ SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM**

Teplota [J] do elementu přivedené  
 $dQ_x + dQ_y + dQ_z$

Teplota [J] z elementu odvedené  
 $dQ_{x+dx} + dQ_{y+dy} + dQ_{z+dz}$

kde  
 $dQ_x = \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \cdot (dy \cdot dz) \cdot dt$

$dQ_{x+dx} = dQ_x + \frac{\partial}{\partial x} (dQ_x) dx$

Teplota [J], které zůstane v elementu v důsledku vedení ve směru x  
 $dQ_x - dQ_{x+dx} = -\frac{\partial}{\partial x} (dQ_x) dx = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz dt$

1 ... 199 200 201 202 203 204 205 206 207 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolvent-energetika přípraven pro trh práce

**DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE VEDENÍ TEPLA**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**I. zákon termodynamiky**

$dQ = dU + dA = dU + 0 \Rightarrow dQ = dU$   
 $dQ_y + dQ_z = dU$

Po dosazení za  $dQ_y, dQ_z, dU$  a pokrácení  $dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$  bude  
 $\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q^* = c \cdot \rho \cdot \frac{dT}{dt}$

kde  $\lambda = f(x, y, z, T)$   $c = f(x, y, z, T)$   $\rho = f(x, y, z, T)$

Pro izotropní látky jsou  $\lambda, c, \rho$  konstantní a dostaneme  
**OBECNOU DR VEDENÍ TEPLA - I. zákon termodynamiky**

$\frac{dT}{dt} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q^*}{c \cdot \rho}$  Platí pro homogenní tuhé látky s vnitřními zdroji (i tektiny)

$a \text{ [m}^2\text{s}^{-1}\text{]}$  je teplotová vodivost a platí definice  $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$

1 ... 199 200 201 202 203 204 205 206 207 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolvent-energetika přípraven pro trh práce

**POČÁTEČNÍ A OKRAJOVÉ PODMÍNKY**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- Řešením DR přímých úloh je **rozložení teplot v prostoru a čase** za pomoci počátečních (u nestacionárních úloh) a okrajových podmínek.
- Řešením DR nepřímých úloh je **určení okrajových podmínek (OP)** ze známého rozložení teplot v různých časových úrovních.

**POČÁTEČNÍ PODMÍNKA**

Určuje rozložení teplot na počátku děje pro  $\tau = 0$ .  $T(x, y, z, \tau = 0) = f(x, y, z)$   
Často je  $T_0 = \text{konst.}$

**OKRAJOVÁ PODMÍNKA**

- 1. druhu, Dirichletova** - Určuje rozložení teplot na povrchu tělesa (index w), a to v čase. Často je  $T_w = \text{konst.}$   $T_w = f(x_w, y_w, z_w, \tau)$
- 2. druhu, Neumannova** - Určuje rozložení hustot tepelného toku na povrchu tělesa v čase. Často je  $\dot{q}_w = \text{konst.}$   $\dot{q}_w = f(x_w, y_w, z_w, \tau)$

1 ... 199 200 201 202 203 204 205 206 207 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetik-řídění-pro-10h-práce

**OKRAJOVÉ PODMÍNKY**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

• **3. druhu, Newtonova** - Určuje rozložení součinitelů přestupu tepla na povrchu tělesa v čase.  
 Často bývá  $\alpha = konst.$

$\alpha = f(x_w, y_w, z_w, \tau)$

Rozdíly mezi OP 2. druhu a 3. druhu

- U podmínky 2. druhu  $\dot{q}_w = konst.$  má čárkovaná tečna stále stejný sklon
- U podmínky 3. druhu  $\alpha = konst.$  prochází čárkovaná tečna řídicím bodem R, viz důkaz:

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_w = \alpha (T_w - T_\infty)$$

$$-\left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_w = \frac{T_w - T_\infty}{\lambda / \alpha}$$

1 ... 199 200 201 202 203 204 205 206 207 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetik-řídění-pro-10h-práce

**OKRAJOVÉ PODMÍNKY**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

• **OP 4. druhu** - Ve styku dvou těles

a) Dokonalý styk těles

$$-\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial y} \right)_w = -\lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial y} \right)_w$$

b) Nedokonalý styk těles

$$\dot{q}_w = \frac{1}{R_K} (T_{w1} - T_{w2})$$

$R_K [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$   
 kontaktní tepelný odpor  
 Závisí na drsnosti, materiálu, tlaku mezi tělesy a druhu plynu v kontaktu.  
 $R_K$  bývá tabelován

• **OP 5. druhu** - S fázovou přeměnou látky na povrchu

1 ... 199 200 201 202 203 204 205 206 207 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetik-řídění-pro-10h-práce

**STACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA ROVINNOU STĚNOU NEBO TYČÍ**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vydeme z diferenciální rovnice vedení tepla

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Pro stacionární 1-D vedení platí:  $\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$

Řešení této DR je přímka  $T = a_0 + a_1 x$

kde konstanty  $a_0, a_1$  získáme z okr. pod.

$x = 0 \Rightarrow T = T_{w1}$

$x = \delta \Rightarrow T = T_{w2}$

dostaneme teplotní profil ve tvaru

$$T = T_{w1} + \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\delta} x$$

1 ... 199 200 201 202 203 204 205 206 207 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**STACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA ROVINNOU STĚNOU NEBO TYČÍ**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Derivací uvedeného teplotního profilu dle souřadnice  $x$  dostaneme

$$T = T_{w1} + \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\delta} x \Rightarrow \frac{dT}{dx} = \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\delta}$$

Pro tepelný tok platí

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\delta} \quad \dot{q} = -\lambda \cdot \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\delta}$$

Kratší odvození tepelného toku lze provést přímo z Fourierova zákona, kam dosadíme za  $dT$  a  $dx$  a dostaneme:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{T_{w2} - T_{w1}}{x_2 - x_1} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\delta}$$

Při tomto kratším odvození tepelného toku nezískáme bezprostředně informaci, že teplotní profil je přímka.

1 ... 199 200 201 202 203 204 205 206 207 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**STACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA VÁLCOVOU STĚNOU**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Konstanty  $a_0, a_1$  logaritmického teplotního profilu získáme z OP.

Pro OP 1. druhu  $r = r_1 \Rightarrow T_{w1} = a_0 + a_1 \ln r_1$   
 platí:  $r = r_2 \Rightarrow T_{w2} = a_0 + a_1 \ln r_2$

Po výpočtu konstant  $a_0, a_1$ , bude mít teplotní profil tvar

$$T = T_{w1} - \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\ln(r_2/r_1)} \ln r_1 + \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\ln(r_2/r_1)} \ln r$$

Derivace teplotního profilu dle  $r$  bude

$$\frac{dT}{dr} = \frac{1}{r} \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\ln(r_2/r_1)}$$

Pro tepelný tok platí

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{T_{w2} - T_{w1}}{r \ln(r_2/r_1)}$$

a po úpravách

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L \cdot (T_{w1} - T_{w2})}{\ln(r_2/r_1)}$$

1 ... 199 200 201 202 203 204 205 206 207 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-10h-prace

**STACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA VÁLCOVOU STĚNOU**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Hustota tepelného toku je na vnitřním a vnějším povrchu trubky různá (viz obrázky), a proto definujeme

tepelný tok na 1 m délky trubky  $\dot{q}_L$  [ $W \cdot m^{-1}$ ]

$$\dot{q}_L = \frac{\dot{Q}}{L} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (T_{w1} - T_{w2})}{\ln(r_2/r_1)}$$

Kratší odvození tepelného toku lze provést přímo z Fourierova zákona

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S(r) \cdot \frac{dT}{dr} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dT}{dr}$$

DR řešíme separací proměnných a dostaneme:

$$\int \dot{Q} \frac{dr}{r} = - \int \lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot dT \Rightarrow \dot{Q} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_{w2} - T_{w1})$$

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L \cdot (T_{w1} - T_{w2})}{\ln(r_2/r_1)}$$

Při tomto odvození nezískáme informaci o tvaru teplotního profilu.

1 ... 199 200 201 202 203 204 205 206 207 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

**ANALOGIE PŘI ŘEŠENÍ DR VEDENÍ TEPLA**

Mezi veličinami tepelnými a elektrickými existuje analogie, která nám můžeme pomoci při řešení úloh vedení tepla.

Pro vedení tepla platí Fourierův zákon  $\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\delta}$

Pro elektrické obvody platí Ohmův zákon  $I = \frac{U}{R}$

Je zřejmé, že:

- Elektrický proud je analogický hustotě tepelného toku
- Napětí či rozdíl napětí je analogický rozdílu teplot
- Elektrický odpor  $R$  je analogický tepelnému odporu  $R_{\lambda} = \delta / \lambda$

Poznatzky z řešení elektrických obvodů můžeme využít při řešení složitějších úloh vedení tepla, a to skládáním jednodušších exaktních řešení DR

1 ... 208 209 210 211 212 213 214 215 216 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

**STACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA SLOŽENOU ROVINNOU STĚNOU**

Hustota tepelného toku jednoduchou rovinnou stěnou je dána vztahem  $\dot{q} = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\frac{\delta_l}{\lambda}} = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{R_{\lambda 1}}$

Hustota tepelného toku složenou rovinnou stěnou s  $n$  vrstvami (tepelné odpory jsou řazeny sériově) je dána vztahem  $\dot{q} = \frac{T_{w1} - T_{w,n+1}}{\sum_{l=1}^n \frac{\delta_l}{\lambda_l}} = \frac{T_{w1} - T_{w,n+1}}{\sum_{l=1}^n R_{\lambda l}}$

**Tepelný odpor při vedení rovinnou stěnou  $R_{\lambda l}$  [ $K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$ ] je dán vztahem**  $R_{\lambda l} = \frac{\delta_l}{\lambda_l}$

1 ... 208 209 210 211 212 213 214 215 216 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

**STACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA SLOŽENOU VÁLCOVOU STĚNOU**

Tepelný tok jednoduchou válcovou stěnou na 1 m délky potrubí je dán vztahem  $\dot{Q}_L = \frac{2\pi \cdot \lambda_l (T_{w1} - T_{w2})}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\frac{1}{2\pi \cdot \lambda_l \ln \frac{r_2}{r_1}}}$

Tepelný tok složenou válcovou stěnou na 1 m délky potrubí (tepelné odpory jsou řazeny sériově) je dán vztahem  $\dot{Q}_L = \frac{T_{w1} - T_{w,n+1}}{\sum_{l=1}^n \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_l \ln \frac{r_{l+1}}{r_l}}} = \frac{T_{w1} - T_{w,n+1}}{\sum_{l=1}^n R_{\lambda l}}$

**Tepelný odpor při vedení válcovou stěnou  $R_{\lambda l}$  [ $K \cdot m \cdot W^{-1}$ ] je dán vztahem**  $R_{\lambda l} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_l \ln \frac{r_{l+1}}{r_l}}$

1 ... 208 209 210 211 212 213 214 215 216 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetiků připravili pro Vás práci

**ZÁKLADNÍ TYPY KONVEKCE**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Nucenou** - vyvozenou ventilátorem, kompresorem, větrem, čerpadlem  
**Přírozenou** - vyvozenou rozdílem hustot (v důsledku rozdílu teplot...)

**$\alpha$**

Proudění - konvekce

```

    graph TD
      A[Proudění - konvekce] --> B[bez změny skupenství]
      A --> C[se změnou skupenství]
      B --> D[přírozená konvekce]
      B --> E[nucená konvekce]
      C --> F[kondenzace]
      C --> G[var]
    
```

1 ... 208 209 210 211 212 213 214 215 216 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetiků připravili pro Vás práci

**TEPELNÝ TOK PŘI PŘENOSU TEPLA KONVEKČÍ**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

V potrubí (viz 1. zákon termodynamiky)

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p (T_{tek} - T_{ref})$$

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p (T_{tek} - T_{ref})$$

$$\dot{Q} = w \cdot S \cdot \rho \cdot c_p (T_{tek} - T_{ref})$$

Tok entalpie koridorem s pevnými hranicemi

**Ve volném proudu v prostoru**  
 Volné hranice a míšení tekutiny

**V obecném proudu v prostoru**  
 Složitě prostorové proudění

1 ... 208 209 210 211 212 213 214 215 216 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetiků připravili pro Vás práci

**TEPELNÝ TOK PŘI PŘESTUPU TEPLA MEZI PLOCHOU A TEKUTINOU**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Budeme se zabývat hlavně přestupem tepla, který je dán **Newtonovým vztahem**

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (T_w - T_\infty) \quad \dot{q} = \alpha \cdot (T_w - T_\infty)$$

**S** [m<sup>2</sup>] plocha obtékaného povrchu      **T<sub>w</sub>** [K] teplota povrchu  
 **$\alpha$**  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] součinitel přestupu tepla      **T<sub>∞</sub>** [K] teplota tekutiny

Součinitel přestupu tepla závisí na vlastnostech tekutiny, na tvaru obtékaného povrchu, na konkrétním místě na povrchu a především na **rychlosti proudění**

**Nehledá se v tabulkách**

**Přírozená konvekce**

Plyny       $\alpha = 2 - 25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$   
 Kapaliny       $\alpha = 50 - 1.000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

**Konvekce s fázovou přeměnou**       $\alpha = 2.500 - 100.000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

1 ... 208 209 210 211 212 213 214 215 216 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetika: příprava pro Ith práce

**VÝZNAM PODOBNOSTI**

evropský sociální fond v ČR  
EVROPSKÁ UNIE  
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

1 ... 208 209 210 211 212 213 214 215 216 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetika: příprava pro Ith práce

**PODOBNOST PŘI NUCENÉ KONVEKCI**

Upravená rovnice pro dílo podělena rovnicí pro model má tvar

$$c_D c_T = c_\lambda \frac{c_T}{c_L} \Rightarrow \frac{c_D c_L}{c_\lambda} = 1$$

Po dosazení za měřítka dostaneme

$$\frac{\alpha_D L_D}{\alpha_M L_M} = 1 \Rightarrow \frac{\alpha_D L_D}{\lambda_D} = \frac{\alpha_M L_M}{\lambda_M}$$

Podobný přestup tepla je pro  $\alpha L / \lambda$  stejný na modelu i díle. Tento podíl je označován jako **Nusseltovo číslo**

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$$

$Nu$  je bezrozměrné vyjádření  $\alpha$

$\alpha$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] součinitel přestupu tepla  
 $L$  [m] charakteristický rozměr  
 $\lambda$  [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] tepelná vodivost tekutiny

Zjednodušené odvození Nusseltova čísla z DR přestupu tepla

$$\alpha \cdot (T_w - T_\infty) = -\lambda \cdot \left( \frac{dT}{dy} \right)_w$$

W. Nusselt  
1882-1957

1 ... 208 209 210 211 212 213 214 215 216 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetika: příprava pro Ith práce

**PODOBNOST PŘI NUCENÉ**

**PODOBNOSTNÍ ČÍSLO Z DR ENERGETICKÉ**

Z levé strany rovnice a z pravé strany rovnice dostaneme **Pecletovo číslo**

$$w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

$$Pe = \frac{w \cdot L}{a}$$

$w$  [m.s<sup>-1</sup>] rychlost  
 $L$  [m] charakteristický rozměr  
 $a$  [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>] teplotová vodivost

$Pe$  je poměrem přenosu tepla prouděním a vedením při konvekcii

Výsledky řešení DR nebo experimentů se vyjadřují prostřednictvím **KRITERIÁLNÍCH ROVNIC**

$Nu = f(Re, Eu, Pe, X, Y, Z)$  Obecná kritériální rovnice pro nucenou konvekcii  
jsou bezrozměrné souřadnice

$X = x/L$   $Y = y/L$   $Z = z/L$

Rychlost je obsažena v  $Re$  a  $Pe$ , a proto je vhodné jedno z těchto kritérií vyloučit. Platí:

$$Pe = \frac{w \cdot L}{a} = \frac{w \cdot L}{\nu} \cdot \frac{\nu}{a} = Re \cdot Pr$$

1 ... 208 209 210 211 212 213 214 215 216 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetik-připraveni-pro-19h-prace

**PODOBNOST PŘI NUCENÉ KONVEKCI**

Je zřejmé, že Reynoldsovo číslo a Pecletovo číslo jsou navzájem vázány, tzv. **Prandtlovým číslem**

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

$\nu$  [m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>] kinematická viskozita  
 $a$  [m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>] teplotová vodivost

**Pr je fyzikální vlastnost**, jelikož je funkcí jen fyzikálních vlastností a lze jej nalézt v tabulkách.

- Pro plyny  $Pr \sim 1$ ,  $Pr_{VZDUCHU} = 0,72$
- Pro kapaliny  $Pr > 1$
- Pro tekuté kovy  $Pr \ll 1$

L. Prandtl  
 1875-1953

Pozn.: Při laminárním režimu proudění přibližně platí  $\delta/\delta_p \approx \sqrt{Pr}$

takže pro  $Pr = 1$  je tloušťka dynamické  $\delta$  a tepelné mezní vrstvy  $\delta_p$  stejná

$w = f(\Delta p)$ ,  $\Delta p = f(w)$  z dalších úvah lze vynechat Eulerovo číslo, jelikož  $Eu = f(Re)$

1 ... 217 218 219 220 221 222 223 224 225 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetik-připraveni-pro-19h-prace

**PODOBNOST PŘI NUCENÉ KONVEKCI**

Kriteriální rovnice pro nucenou konvekci je:  $Nu = f(Re, Pr, X, Y, Z)$

Kriteriální rovnice pro nucenou konvekci v podobné geometrické konfiguraci má tvar  $Nu = f(Re, Pr)$

Kriteriální rovnici vyjadřujeme často pomocí mocninné funkce  $Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n$

Pro stejnou tekutinu pak platí  $Nu = C \cdot Re^m$

Konstanty  $C, m, n$  (nebo také konstanty pro jiný typ funkce) jsou výsledkem řešení DR nebo předmětem experimentálního výzkumu a lze je obvykle nalézt pro konkrétní geometrické útvary v literatuře.

- Pro laminární proudění  $m = 0,5$
- Pro turbulentní proudění  $m = 0,8$

1 ... 217 218 219 220 221 222 223 224 225 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolventi-energetik-připraveni-pro-19h-prace

**PODOBNOST PŘI PŘIROZENÉ KONVEKCI**

Při přirozené konvekci jsou DR přestupu tepla, energetická a kontinuity stejné. Do DR pohybové je třeba definovat **zrychlení od vztlačkových sil**.

Pro vztlačkovou sílu na jednotku objemu  $G$  [N·m<sup>-3</sup>] lze psát

$$G = -(\rho - \rho_\infty) g = -\rho_\infty \left( \frac{\rho}{\rho_\infty} - 1 \right) g$$

Pro izobarický děj ideálního plynu platí  $\rho_\infty = p / (rT_\infty)$ ,  $\rho = p / (rT)$  a pak bude

$$G = -\rho_\infty \left( \frac{T_\infty}{T} - 1 \right) g = \rho_\infty \frac{1}{T} (T - T_\infty) g$$

kde  $1/T = \gamma$  [K<sup>-1</sup>] je objemová roztažnost

Pro zrychlení  $G$  [N·m<sup>-3</sup>] /  $\rho_\infty$  [kg·m<sup>-3</sup>] od vztlačkové síly platí vztah  $\frac{G}{\rho_\infty} = g \cdot \gamma \cdot \Delta T$

1 ... 217 218 219 220 221 222 223 224 225 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik připravuje pro Vaš práci

**PODOBNOST PŘI PŘIROZENÉ KONVEKCI**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Zrychlení od vztlakové síly dosadíme do DR pohybové a dostaneme

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} = \nu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \gamma \Delta T$$

Z levé strany rovnice pohybové a z posledního členu vpravo dostaneme

$$Ar = \frac{g \gamma \Delta T L}{w^2}$$

**Archimédovo číslo**

Ar vyjadřuje poměr sil vztlakových a setrvačných

Při přirozené konvekci nelze využívat rychlost proudění (je velice malá), proto je třeba Ar vynásobit  $Re^2$ , které je rovněž obsaženo v DR pohybové

$$Gr = \frac{g \gamma (T_w - T_\infty) L^3}{\nu^2}$$

Archimédes 287-212 př.n.l.

$$Ar \cdot Re^2 = \frac{g \gamma \Delta T L}{w^2} \cdot \frac{w^2 L^2}{\nu^2}$$

Výsledkem je **Grashofovo číslo**

Gr vyjadřuje vztah vztlakových, třecích a setrvačných sil

(F. Grashof 1826-1893)

1 ... 217 218 219 220 221 222 223 224 225 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik připravuje pro Vaš práci

**PODOBNOST PŘI PŘIROZENÉ KONVEKCI**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Obecná kriteriální rovnice pro přirozenou konvekci má tvar

$$Nu = f(Re, Eu, Pe, Gr, X, Y, Z)$$

- po nahrazení Pe čísla číslem Re a Pr ( $Pe=Re \cdot Pr$ ),
- po vynechání Eu čísla, které je funkce Re,
- po vynechání bezrozměrných souřadnic při řešení podobné geometrické konfigurace,
- a po vynechání Re čísla, které je funkci Gr čísla (rychlost proudění je funkcí teplotního rozdílu)

dostaneme kriteriální rovnici pro přirozenou konvekci ve tvaru:

$$Nu = f(Gr, Pr) \text{ často platí } Nu = C \cdot Gr^m Pr^n$$

J.W.S. Rayleigh 1842-1919

Pro stejnou tekutinu lze psát

$$Nu = f(Ra) \text{ kde } Ra \text{ je tzv. Rayleighovo číslo} \quad Ra = Gr \cdot Pr$$

Pozn.: Konstanty C, m, n lze obvykle pro konkrétní geometrické útvary nalézt v literatuře.

1 ... 217 218 219 220 221 222 223 224 225 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

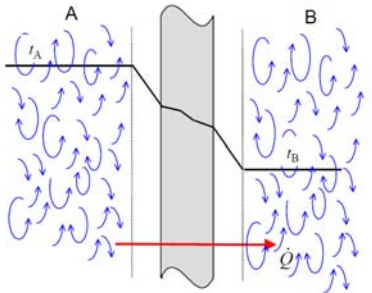
---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik připravuje pro Vaš práci

**PROSTUP TEPLA**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



1 ... 217 218 219 220 221 222 223 224 225 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetik přípraven pro tih práce

**ZÁKLADNÍ PROBLÉMY TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tepelný tok je přenášen tzv. **prostupem tepla** což představuje:

- **Přestup tepla** konvekcí z horké tekutiny *H* do stěny
- **Vedení tepla** ve stěně (někdy i složené)
- **Přestup tepla** konvekcí ze stěny do chladné tekutiny *C*

Tepelný tok přenášený ve výměníku je dán vztahem  $\dot{Q} = u \cdot S \cdot \Delta T_s$

*S* [m<sup>2</sup>] plocha výměníku (měla by být co nejmenší)  
*u* [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] součinitel prostupu tepla  
 $\Delta T_s$  [K] střední teplotní spád (mění se podél plochy výměníku)

Pro výpočet tepelného toku nebo pro návrh plochy výměníku tepla je třeba stanovit **součinitel prostupu tepla *u* a střední teplotní spád  $\Delta T_s$**

1 ... 226 227 228 229 230 231 232 233 234 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetik přípraven pro tih práce

**STŘEDNÍ TEPLOTNÍ SPÁD**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Výměník souproudý**

**Výměník protiproudý**

Tepelný tok uvolněný z teplejší tekutiny  $d\dot{Q}_H = \dot{m}_H c_H dT_H$   $dT_H < 0$  vždy  
 Tepelný tok dodaný chladnější tekutině  $d\dot{Q}_C = \dot{m}_C c_C dT_C$   $dT_C < 0$  pro protiproud  
 $dT_C > 0$  pro souproud

1 ... 226 227 228 229 230 231 232 233 234 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutní energetik přípraven pro tih práce

**STŘEDNÍ LOGARITMICKÝ TEPLOTNÍ SPÁD**  
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Výměník souproudý**

**Výměník protiproudý**

Tepelný tok platí:  $\dot{Q} = u \cdot S \cdot \Delta T_s$

kde **střední logaritmičkový teplotní spád** je dán vztahem:  $\Delta T_s = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$

1 ... 226 227 228 229 230 231 232 233 234 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

**POSTUP VÝPOČTU VÝMĚNÍKŮ TEPLA**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- Určení  $\alpha_H, \alpha_C$  např. z teorie podobnosti
- Určení  $\lambda$  a tloušťky stěny
- Výpočet součinitele prostupu tepla  $u$
- Návrh teplot tekutin pro daný průtok tekutin

- Stanovení středního logaritmického teplotního spádu  $\Delta T_S$
- Určení teplosměnné plochy výměníku  $S$

Návrh se řeší iteračně, předpoklady je třeba upřesňovat.

VIZUALIZACE PROUDĚNÍ V PLÁŠŤOVÝCH VÝMĚNÍCÍCH TEPLA



1 ... 226 227 228 229 | 230 231 232 233 234 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

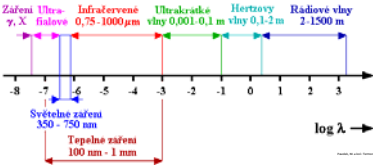
StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

**ŠÍŘENÍ ZÁŘENÍ**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Každý objekt je zdrojem **elektromagnetického záření**, které má vlnový charakter. Dle vlnové délky  $\lambda$  [m] rozlišujeme různé **typy záření**.



Pokud se většina zářivého toku přemění při dopadu na jiný objekt na tepelný tok, hovoříme o **tepelném záření**. To platí pro záření objektů o běžných teplotách včetně záření Slunce.

Záření se šíří **prostředím rychlostí  $c$** , která je závislá na druhu prostředí. **Rychlost šíření záření ve vakuu  $c_0$**  má hodnotu  $c_0 = (2,99792458 \pm 0,000000012) \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

1 ... 226 227 228 229 230 | 231 232 233 234 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolutně-energetik přípraven pro tih práce

**HUSTOTA ZÁŘIVÉHO TOKU**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**HUSTOTA ZÁŘIVÉHO TOKU = ZÁŘIVOST  $E$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]** je při úplné přeměně energie záření na teplo rovna **hustotě tepelného toku  $\dot{Q}$** .

Zářivý tok z určité plochy je pak dán součinem hustoty zářivého toku (zářivosti)  $E$  a plochy  $S$

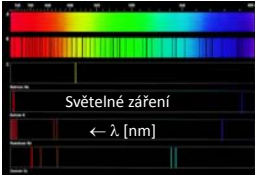
$$\dot{Q} = E \cdot S$$

Spektrální hustotu zářivého toku  $E_\lambda$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ] definujeme pro monochromatické záření ( $\lambda$  až  $\lambda+d\lambda$ )

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$$

Jedná se o hustotu zářivého toku (zářivost) pro danou vlnovou délku  $\lambda$

- Kontinuální spektrum záření
- Absorpční sluneční spektrum (absorpce v plynech sluneční atmosféry)
- Emisní spektra alkalických kovů



1 ... 226 227 228 229 230 231 | 232 233 234 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolventi-energetika-připraveni-pro-lh-práci

evropský sociální fond v ČR

EVROPSKÁ UNIE

OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost a zaměstnanost

TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V BRNĚ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## I. KIRCHHOFFŮV ZÁKON

Při dopadu zářivého toku na povrch může dojít k odrazu, pohlcení, nebo také k průchodu zářivého toku objektem. Pro energetickou bilanci platí

$$\dot{Q} = \dot{Q}_A + \dot{Q}_R + \dot{Q}_D$$

Úpravou dostaneme

$$1 = \frac{\dot{Q}_A}{\dot{Q}} + \frac{\dot{Q}_R}{\dot{Q}} + \frac{\dot{Q}_D}{\dot{Q}}$$

**I. KIRCHHOFFŮV ZÁKON** má tvar

$$\boxed{A + R + D = 1}$$

Jedná se o zákon zachování energie, kde značí:

- A** poměrnou pohltivost,  $A = 1$  je dokonale černé těleso
- R** poměrnou odrazivost,  $R = 1$  je dokonale bílé těleso
- D** poměrnou průteplivost,  $D = 1$  je dokonale průteplivé těleso

1 ... 226 227 228 229 230 231 232 233 234 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolventi-energetika-připraveni-pro-lh-práci

evropský sociální fond v ČR

EVROPSKÁ UNIE

OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost a zaměstnanost

TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V BRNĚ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## I. KIRCHHOFFŮV ZÁKON

$A = 1, R = 1$  nebo  $D = 1$  NEEEXISTUJE

**Téměř černé těleso** lze realizovat černými matnými dutinami

**Pevné látky** (kromě slída, křovice, kuchyňské soli ...) mají  $D = 0$

$$A + R = 1$$

**Dvouatomové plyny** ( $H_2, O_2, N_2$ , vzduch ...) mají  $D = 1$

**Víceatomové plyny** (vodní pára,  $CO_2, ...$ ) mají  $D < 1$

$$A + R + D = 1$$

1 ... 226 227 228 229 230 231 232 233 234 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Absolventi-energetika-připraveni-pro-lh-práci

evropský sociální fond v ČR

EVROPSKÁ UNIE

OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost a zaměstnanost

TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V BRNĚ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON

S rostoucí teplotou roste spektrální hustota zářivého toku černého tělesa a maximální hodnota se posouvá ke kratším vlnovým délkám.

**ZÁŘENÍ REÁLNÝCH ZDROJŮ**

- Šedý zářič má  $E_\lambda$  pro každé  $\lambda$  menší než černé těleso, maximum je při stejné teplotě na stejné vlnové délce. Ideální šedý zářič neexistuje.
- Reálný zářič má  $E_\lambda$  v závislosti na  $\lambda$  značně proměnnou.
- Selektivní zářič září pouze v některých oblastech  $\lambda$ .
- Plyny a lasery vyzařují jen úzké spektrální čáry

1 ... 226 227 228 229 230 231 232 233 234 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetiké připravuje pro tih práce

**WIENŮV POSUNOVACÍ ZÁKON**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Wienův posunovací zákon získáme z Planckova vyzářovacího zákona **derivací spektrální hustoty zářivého toku** černého tělesa  $E_{0\lambda}$  dle vlnové délky  $\lambda$  a tuto derivaci položíme rovnou nule. Tím získáme průběh poloh **maxim izotermem** v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa  $E_{0\lambda}$  na vlnové délce  $\lambda$ .

$$\frac{dE_{0\lambda}}{d\lambda} = 0$$

**MATEMATICKÁ FORMULACE WIENOVA ZÁKONA**  
 $\lambda_{MAX} \cdot T = konst.$

kde uvedená konstanta má hodnotu  $2.8978 \cdot 10^{-3} [m \cdot K]$

**SLOVNÍ FORMULACE WIENOVA ZÁKONA**  
 S rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám

1 ... 235 236 237 238 239 240 241 242 243 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetiké připravuje pro tih práce

**STEFANŮV - BOLTZMANNŮV ZÁKON**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Stefanův - Boltzmannův zákon získáme z Planckova vyzářovacího zákona **integrací spektrální hustoty zářivého toku** černého tělesa  $E_{0\lambda}$  přes celý rozsah vlnových délek  $\lambda$ , a to za konstantní teploty.

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0\lambda} d\lambda$$

**MATEMATICKÁ FORMULACE STEFANOVA-BOLTZMANNOVA ZÁKONA**  
 $E_0 = \sigma_0 \cdot T^4$

$\sigma_0 = 5,6697 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$   
 je Stefanova - Boltzmannova konstanta

**SLOVNÍ FORMULACE STEFANOVA - BOLTZMANNOVA ZÁKONA**  
 Hustota zářivého toku dokonale černého tělesa je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty

1 ... 235 236 237 238 239 240 241 242 243 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetiké připravuje pro tih práce

**STEFANŮV - BOLTZMANNŮV ZÁKON**  
 INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Pokud se přemění zářivý tok při dopadu na objekt na tepelný tok, lze **Stefanův - Boltzmannův zákon** psát ve tvaru

$$\dot{q}_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \quad \dot{Q}_0 = \sigma_0 \cdot S \cdot T^4$$

**Nedokonalé zářiče** - šedá tělesa mají tepelný tok menší než zářiče dokonalé - černá tělesa a platí:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \quad \dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot S \cdot T^4$$

$\varepsilon [-]$  poměrná zářivost - emisivita  
**Poměrná zářivost - emisivita**

- Nabývá hodnot od 0 do 1 ( $\varepsilon = 1$  je černé těleso,  $\varepsilon = 0$  je bílé těleso)
- Najdeme ji pro různé materiály v tabulkách
- Závisí také na úpravách povrchů, často i na směru vyzářování

**Termogram FSI VUT**

Změna barvy bývá způsobena teplotou, ale i emisivitou nebo odraženým zářením

1 ... 235 236 237 238 239 240 241 242 243 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik: příprava pro 1. ročník

**VZÁJEMNÉ ŽÁŘENÍ POVRCHŮ**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Výsledný tok zářivosti je dán rozdílem efektivních zářivosti  $E_{12} = E_{ef1} - E_{ef2}$

$$E_{12} = \frac{(E_1 + E_2 - \epsilon_1 E_2) \cdot (E_2 + E_1 - \epsilon_2 E_1)}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2}$$

$$E_{12} = \frac{\epsilon_2 E_1 - \epsilon_1 E_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2} = \frac{\epsilon_2 \epsilon_1 \sigma T_1^4 - \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma T_2^4}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2}$$

Pro hustotu tepelného toku záření mezi dvěma nekonečně rozlehlými paralelními stěnami lze psát

$$\dot{q}_{12} = \sigma \cdot \epsilon_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\epsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

$\epsilon_{12}$  [-] zde značí součinitel vzájemné emisivity pro paralelní stěny

1 ... 235 236 237 238 239 240 241 242 243 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik: příprava pro 1. ročník

**ZÁŘENÍ MEZI POVRCHY, KTERÉ SE OBKLOPUJÍ**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Povrch  $S_2$  obklopuje povrch  $S_1$

Povrch  $S_1$  musí být vypuklý

$$\dot{Q}_{12} = S_1 \cdot \sigma \cdot \epsilon_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\epsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left( \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}$$

Pro tepelný tok záření mezi povrchy, které se obklopují platí:

$\epsilon_{12}$  [-] je součinitel vzájemné emisivity pro povrchy, které se obklopují

1 ... 235 236 237 238 239 240 241 242 243 ... 250

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz

Abstrakt-energetik: příprava pro 1. ročník

**ZÁŘENÍ MALÉHO POVRCHU VE VELKÉM PROSTORU**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Povrch  $S_2$  obklopuje povrch  $S_1$

Povrch  $S_1$  by měl být vypuklý

Pro tepelný tok záření mezi povrchy, které se obklopují platí:

$$\dot{Q}_{12} = S_1 \cdot \sigma \cdot \epsilon_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$S_1 \ll S_2$$

$$\epsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left( \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} = \epsilon_1$$

Pro tepelný tok záření malého povrchu ve velkém prostoru platí:

$$\dot{Q}_{12} = \epsilon_1 \cdot \sigma \cdot S_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

1 ... 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244

---

---

---

---

---

---

---





---

---

---

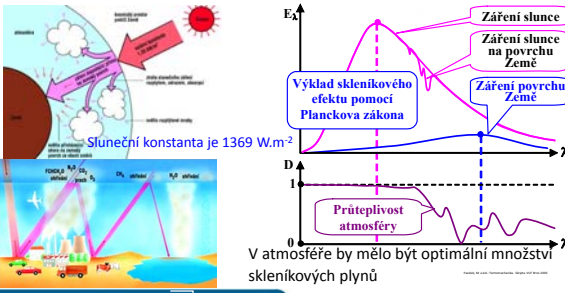


StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-12h-prace

**SKLENÍKOVÝ EFEKT**  evropský sociální fond v ČR  EVROPSKÁ UNIE  OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost  VUTBR

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Skleníkový efekt vzniká i u jiných materiálů. Známé jsou skleníkové plyny (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> ...) způsobující skleníkový efekt v atmosféře



Sluneční konstanta je 1369 W.m<sup>-2</sup>

V atmosféře by mělo být optimální množství skleníkových plynů

1 ... 235 236 237 238 239 240 241 | 242 243 244

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-12h-prace

**TERMORIZNÍ MĚŘENÍ**  evropský sociální fond v ČR  EVROPSKÁ UNIE  OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost  VUTBR

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Termovizní kamery pro bezdotykové měření povrchových teplot objektů na principu tepelného záření.



AMR AHLBORN VarioCAM bez chlazení

1 ... 235 236 237 238 239 240 241 242 | 243 244

---

---

---

---

---

---





---

---

---

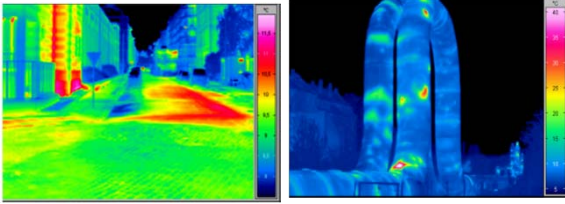
---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
 Absolvent-energetik-připraveni-pro-12h-prace

**TERMORIZNÍ MĚŘENÍ**  evropský sociální fond v ČR  EVROPSKÁ UNIE  OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost  VUTBR

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Termovizní měření v teplárenství umožní identifikovat podzemní uložení rozvodů tepla, vadná místa s únikem teplé tekutiny a vadná místa tepelné izolace



Identifikace uložení rozvodů tepla pod vozovkou Identifikace vadné tepelné izolace rozvodů tepla

1 ... 235 236 237 238 239 240 241 242 | 243 244

---

---

---

---

---

---

---

---

---

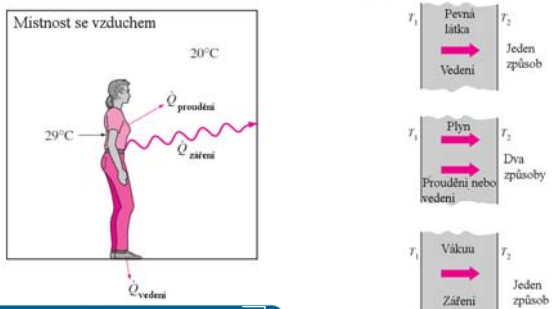
---

StudyEnergyWeb.fme.vutbr.cz  
Asistent energetiky přivítá vás pro 10h práce

**KOMBINACE ZPŮSOBŮ PŘENOSU TEPLA**

evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Místnost se vzduchem 20°C

29°C

$\dot{Q}_{\text{průdučí}}$

$\dot{Q}_{\text{záření}}$

$\dot{Q}_{\text{vedení}}$

$T_1$  Pevná látka  $T_2$   
Vedení  
Jeden způsob

$T_1$  Plyn  $T_2$   
Proudění nebo vedení  
Dva způsoby

$T_1$  Vákuu  $T_2$   
Záření  
Jeden způsob

1 ... 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244

---

---

---

---

---

---

---

---