

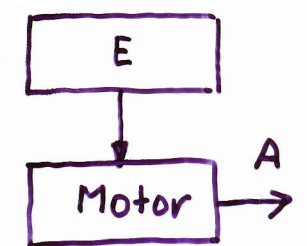
Prednáška č. Opakovanie pojmov Termodynamiky

1) Termomechanika a jej rozdelenie

- TM : nauka o teple
- Teplo je energia $Q [J]$; merné teplo $q_r [J/kg]$
 - možno ho získavať a akumulovať do pracovnej látky (plyn, kvapalina, tuhá látka)
 - možno ho premeniť na iný druh energie
 - možno ho premeniť na mechanickú prácu
 - možno ho prenášať akumulované do pracovnej látky
- Teplota - je vonkajším prejavom tepla
 - absolútna (termodynamická) : $T [K]$
 - relatívna : $t [^{\circ}C]$
- Termomechanika : - termodynamika < $\begin{matrix} \text{technická} \\ \text{energetická} \end{matrix}$
 - termokinetika - prenos tepla (heat transfer)
- Význam Termomechaniky v odbore AE
 - pre stavbu spalovacích motorov
 - pre automatické riadenie a diagnostiku
 - pre autoelektroniku

2) Premena tepla na mechanickú prácu

El. energia $\rightarrow$ Práca
(E) (A)

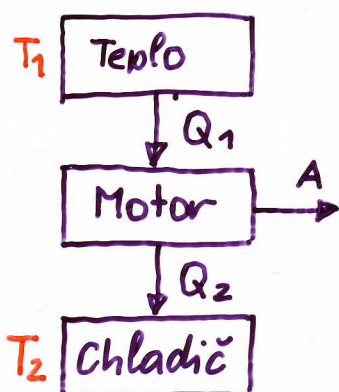


$\approx$ bez strát

Účinnosť:

$$\eta = \frac{A}{E} \approx 1$$

Tepla $\rightarrow$ Práca
(Q) (A)



$$Q_1 = Q_2 + A$$

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1$$

$$T_1 > T_2 !$$

Q_1 - teplo odobrané zo zásobníka (dodané do motora)

Q_2 - teplo odobrané ~~zo zásobníka~~ ^{z motora} chladením (straty)

A - práca získaná

Termická účinnosť premeny tepla na prácu:

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{A}{Q_1} < 1$$

- a) $\eta_t \approx \frac{1}{3}$ pri tepelnej elektrárni $\Rightarrow$ Ak $A=1$ potom $Q_1=3; Q_2=2$
 $\Rightarrow Q_2$ sa odvádza bez využitia do okolia

- b) $\eta_t = (0,5 \sim 0,6)$ - paroplynový cyklus

- c) $\eta_t = (0,6 \sim 0,7)$ - jednoduché spalovacie motory

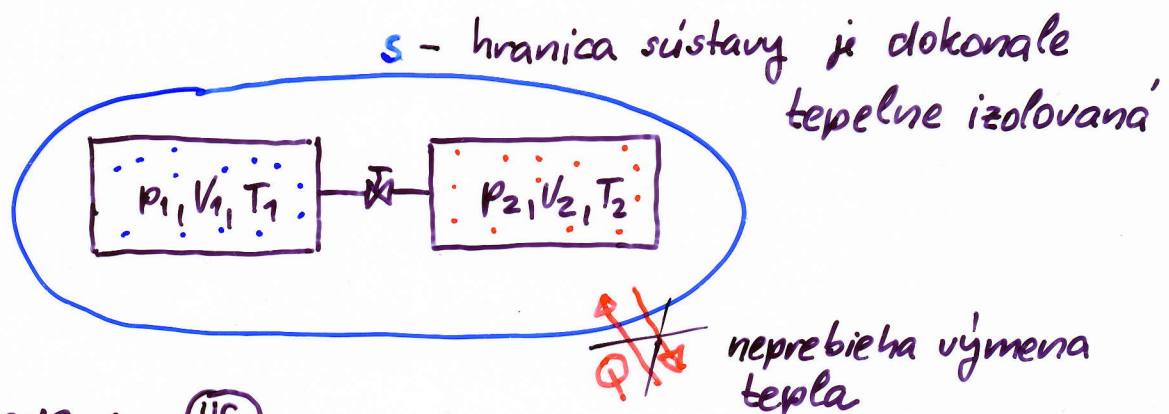
Záver: Premena tepla na prácu nemôže prebiehať bez chladienia ani teoreticky. Čím je $T_1 > T_2 \Rightarrow$ tým je účinnosť premeny vyššia !!

3) Termodynamické systémy

③

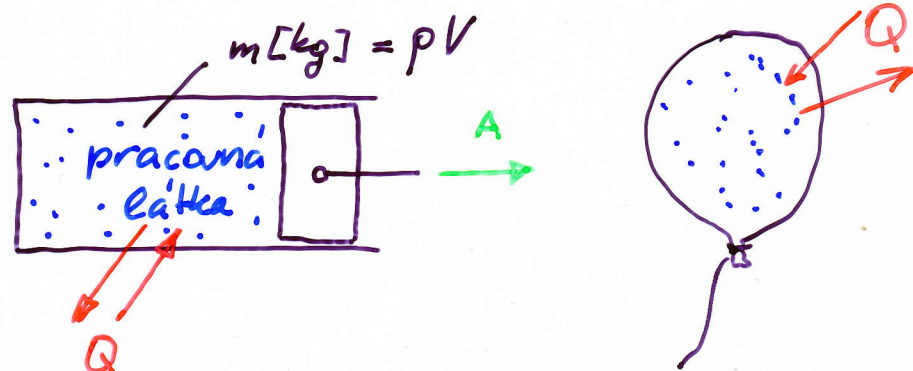
TD systém : priestor s objemom V a povrchom S kde prebieha TD-zmena (valec spal. motora, skriňa turbokompresora, čerpadlo, výmenníky tepla, radiátor, človek, ... vesmír) $\Rightarrow$ vyplnený pracovnou látkou.

Izolovaný systém : pracovná látka v systéme počas TD-zmeny nevyumiera, cez hranicu systému S neprebieha ani výmena tepla (ohrev, chladenie) medzi pracovnou látkou a okolím.



Uzavretý systém : (US)

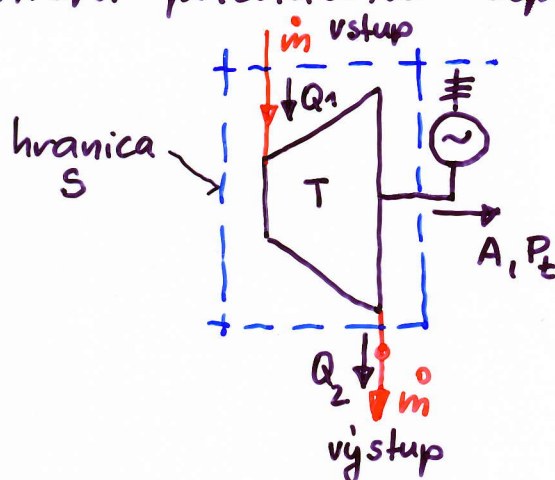
- hranicou môže prechádzať teplo, nie však pracovná látka



(US) - sú všetky telesá tuhej fázy, zásobníky, valce SM pri expanzii alebo kompresii, chladenie a ohrev vodičov a elektronických prvkov, ...

Otvorená TD sústava: (OS)

- hranicu prechádza teplo i pracovná látka



$$\frac{1}{\rho} = v \quad - \text{merný objem} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

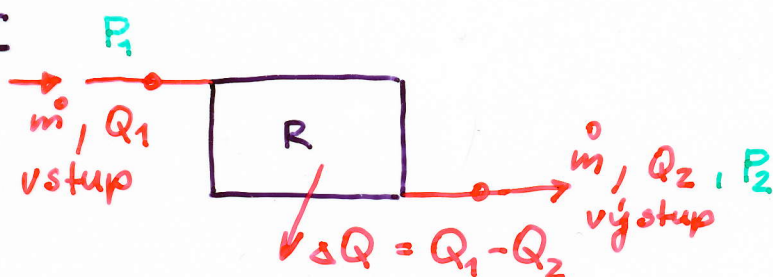
T - turbína

$\dot{m}$ - hmotnostný prietok
prac. látky $[\text{kg/s}]$

$\dot{V}$ - objemový prietok $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$

$$\dot{m} = \rho \dot{V} ; \quad \rho - \text{merná hmotnosť} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

radiátor



(tepelný výkon)

odvedené teplo do
vykurovaného priestoru

Pri tepelnej bilancii musíme rozlišovať medzi (US) a (OS)

V energetickej termodynamike sú hlavné (OS)

Valec spaľovacieho motora v rámci jednej TD zmeny považovať za (US). V rámci celkového pracovného cyklu motora však dochádza k výmene palivovej zmesi $\Rightarrow$ (OS)

Pracovná látka = reálny plyn $\cong$ ideálny plyn

Ideálny plyn $\Rightarrow$ abstrakcia reálnej pracovnej látky

- molekuly sú hmotné body s $dV \rightarrow 0$ ale s hmotnosťou $\rho = dm/dV$
- medzi hmotnými bodmi nepôsobia príťažlivé a odpudivé sily
- materiálové vlastnosti sú nezávislé na teplote

Reálny plyn:

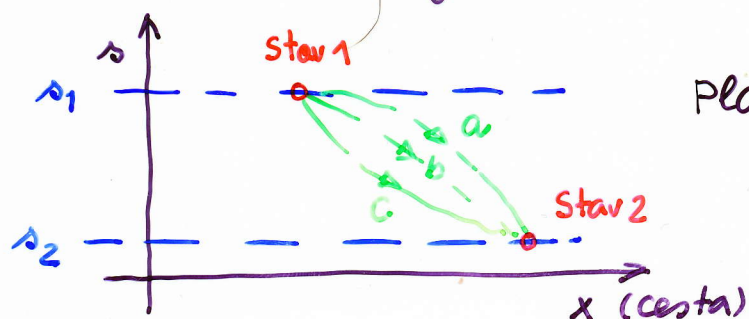
- molekuly majú konečnú veľkosť
- pôsobia medzimolekulové sily
- materiálové vlastnosti sú teplotne závislé

Zákony TD sa formulujú pre ideálny plyn, s určitým priblížením ich možno použiť aj pre reálne plyny

4) Stavová rovnica ideálneho plynu

Stavová veličina:

Každý (TD-systém) - jeho stav je daný termofyzikálnymi veličinami. Ak tieto veličiny nie sú závislé na ceste po ktorej sa ich stav dosiahol $\Rightarrow$ stavové veličiny



Platí: $\Delta s = s_1^a - s_2^a = s_1^b - s_2^b = s_1^c - s_2^c$
 $\oint ds = 0 !$

Základné stavové veličiny: p, v, T

a) tlak p [N/m^2] = 1 Pa (Pascal) – sila na jednotku plochy

Iné jednotky: $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$
 $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$

Atmosferický tlak (barometrický): $p_b \doteq 0,1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa} = 1 \text{ atm}$

$1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg} = 103,325 \text{ kPa} \doteq 0,1 \text{ MPa} = 1 \text{ atm}$

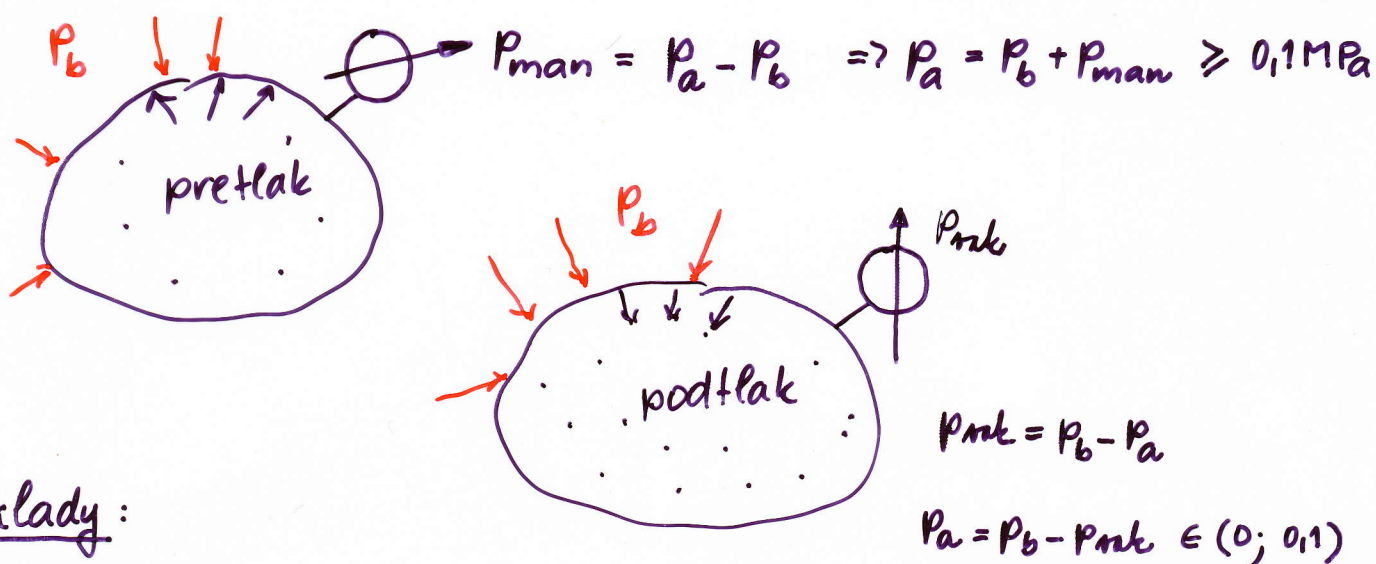
$1 \text{ torr} = 1 \text{ mm Hg} = 133,3 \text{ Pa}$

$0,1 \text{ MPa} = 10 \text{ m H}_2\text{O} \doteq 1 \text{ atm}$

Tlak: – absolútny: p_a

– relatívny: – pretlak: p_{man} (manometrický)

– podtlak: p_{vak} (vakuometrický)



Priklady:

100% vákuum: $p_a = p_b - p_{\text{vak}} = 0 \Rightarrow p_{\text{vak}} = p_b \doteq 0,1 \text{ MPa}$

93% — : $p_a = 0,007 \text{ MPa} = 7 \text{ kPa} \Rightarrow p_{\text{vak}} = 0,093 \text{ MPa}$

$p_a = 4 \text{ kPa} \Rightarrow 96\% \text{ vákuum} \Rightarrow p_{\text{vak}} = 0,096 \text{ MPa}$

Vzájomná závislosť p, v a $T \Rightarrow$ stavová rovnica plynov ^⑧

$$p \cdot v = RT \quad - \text{pre } m = 1 \text{ kg plyn}$$

plynová konštanta: $R = \frac{p \cdot v}{T} \left[\frac{\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{\text{K}} \right] = \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] =$
 $= \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$

Pre ideálny plyn: $R = \text{konšt.} \neq f(T)$

Stavová rovnica pre $m [\text{kg}]$ plyn:

$$\begin{aligned} m \cdot p \cdot v &= m \cdot R \cdot T \\ \Rightarrow pV &= mRT \end{aligned} \quad m \cdot v = V$$

Podmienky platnosti stavovej rovnice pre reálne plyny:

$$p \cdot v = RT \Rightarrow v = \frac{RT}{p}$$

a) ak $p \rightarrow 0 \Rightarrow v \rightarrow \infty$ - toto pre reálny plyn neplatí, lebo medzi molekulami sú príťažlivé sily

b) ak $p \rightarrow \infty \Rightarrow v \rightarrow 0$ - toto neplatí (hmota nemôže prechádzať sama do seba $\Rightarrow$ najmenší objem má plyn, ktorého molekuly sa dotýkajú).

$\Rightarrow$ Ak $p \neq 0$ a $p \neq \infty \rightarrow$ možno stavovú rovnicu používať aj pre reálne plyny.

Napr.: v spalovacích motore sú tlaky $p \in (5 \sim 16) \text{ MPa}$

5) Merná tepelná kapacita látky (špecifické teplo) $c \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$

Def.: je množstvo tepla potrebné dodať 1 kg látky aby sa zohriala o $\Delta T = 1 \text{ K}$.

Pre tuhé látky a kvapaliny je len jedno merné teplo c .

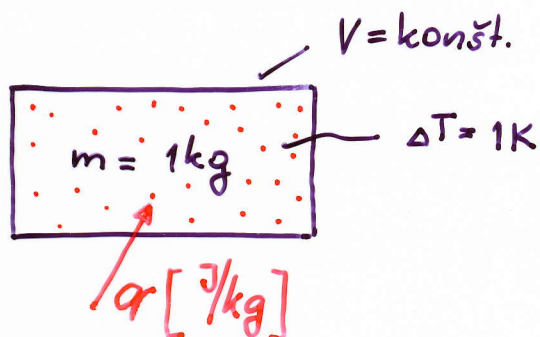
Pre plyny :- zohrievanie pri konštantnom tlaku :
(chladenie)

$$p = \text{konšt.} \Rightarrow c_p \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$$

- zohrievanie pri konštantnom objeme :

$$v = \text{konšt.} \Rightarrow c_v \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$$

a) Ohrev pri $v = \text{konšt.}$



Ohrevom sa zvýši kinetická energia látky $\Rightarrow$ zvýši sa teplota plynu

$$\Delta q = c_v \cdot \Delta T$$

$$\text{alebo: } dq = c_v \cdot dT$$

$$\Rightarrow q = \int_1^2 dq = \int_1^2 c_v \cdot dT = c_v (T_2 - T_1) \quad \text{ak } c_v = \text{konšt.}$$

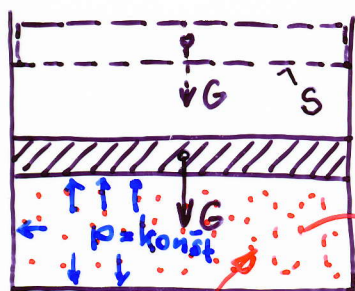
Pre $m \text{ [kg]}$

$$dQ = m \cdot dq = m \cdot c_v \cdot dT$$

$$\Rightarrow Q_v = m \cdot q = m \cdot c_v (T_2 - T_1) \quad [\text{J}]$$

Ak chceme látku zohriať o $\Delta T = T_2 - T_1 \text{ [K]}$, musíme $m \text{ - kg}$ látky dodať $Q_v \text{ [J]}$ tepla !!

b) ohrev pri konšt. tlaku $p = \text{konšt.}$



tlak: $p = \frac{G}{S} = \text{konšt} \text{ [Pa]}$

- prívodom tepla q sa ohreje $m = 1 \text{ kg}$ látky o $\Delta T = 1 \text{ K}$ a vykona' sa mechanická práca pohybom hmoty s tiažovou silou $G \text{ [N]}$

$m = 1 \text{ kg}$
 $\Delta T = 1 \text{ K}$

$q \hat{=} c_p$

$dq = c_p dT$

$dQ = m \cdot c_p \cdot dT$

$Q_p = m \cdot c_p \cdot \Delta T$

Látka sa oteplí tak ako pri $r = \text{konšt.}$, ale navyše sa vykoná práca $\Rightarrow c_p > c_r$

Platí Mayerová rovnica:

$c_p - c_r = R \text{ [J/kgK]}$

Ďalej platí fyzikálny zákon

$\frac{c_p}{c_r} = \kappa$ - Poissonova konštanta

$\kappa = 1,4$ - pre dvojatómové plyny ($\text{H}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{vzduch}$)

$\kappa = 1,3$ - pre trojatómové plyny

$\kappa = 1,6$ - pre jednatómové plyny

κ sa zisťuje experimentálne a uvádza sa v termofyzikálnych tabuľkách.

Příklad:

Aké množstvo tepla $Q = ?$ treba dodať el. ohrevom na zohriatie medeného vodiča dĺžky $l = 1\text{m}$; priemer $d = 10\text{mm}$, a $\Delta t = 10^\circ\text{C}$.

Dané je: $c_{cu} = 379\text{ J/kgK}$; $\rho_{cu} = 8930\text{ kg/m}^3$

Riešenie:

$$Q = m \cdot c_{cu} \cdot \Delta t = \rho \cdot V \cdot c_{cu} \cdot \Delta t = 8930 \frac{\pi \cdot 0,01^2}{4} \cdot 1 \cdot 379 \cdot 10$$

$$Q = 1328,4\text{ kJ} \quad - \text{ pri } v = \text{konšt.}!$$

(len jeden: $c_p = c_v = c_{cu}$)

Za aký čas sa vodič ohreje, ak jeho tepelný výkon je $P_t = RI^2 = 100\text{W}$? (bez odvodu tepla do okolia)

$$P_t = \frac{Q}{\Delta \tau} \Rightarrow \Delta \tau = \frac{Q}{P_t} = \dots 3,7\text{ hod}$$

Příklad:

$m = 1\text{kg}$ vzduchu zohrievame: a) $p = \text{konšt.}$, b) $v = \text{konšt.}$, koľkokrát treba dodať viac tepla pri $p = \text{konšt.}$, ak $c_p = 1\text{ kJ/kgK}$; $c_v = 0,7\text{ kJ/kgK}$.

Riešenie: $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$ krát viac pre $p = \text{konšt.}$

Merne teplo ako funkcia teploty:

$$c_p = a + b \cdot t$$

$$c_v = a' + b' \cdot t$$

(vid' tabuľky a grafy)

8. Tabuľky a diagramy

Na 2. netavine na stave

Fyzikálne parametre technických plynov pri tlaku
0,10133 MPa a teplote 0 °C

Tabuľka 1

Plyn	Chem. znač- ka	Mólová hmot- nosť M	Merná hmot- nosť ρ	Plynová konšt. r - R	Merné teploty pri p → 0		
					c _p	c _v	κ
					kJ/kg K		
Acetylén	C ₂ H ₂	26,036	1,171	319,60	1,529	1,323	1,23
Argón	Ar	39,944	1,784	208,49	0,532	0,316	1,67
Benzol	C ₆ H ₆	78,108	3,550	444,08	1,252	1,137	1,10
Čpavok	NH ₃	17,032	0,771	488,27	2,056	1,555	1,32
<u>Dusík</u>	N ₂	28,016	1,250	296,75	1,038	0,739	1,40
Etán	C ₂ H ₆	30,068	1,356	276,65	1,645	1,348	1,22
Etylén	C ₂ H ₄	28,052	1,260	296,65	1,474	1,181	1,25
Hélium	He	4,003	0,178	2 079,00	5,234	3,202	1,66
Chlór	Cl ₂	70,914	3,214	117,38	0,502	0,375	1,34
Chlorovodík	HCl	36,465	1,639	228,00	0,812	0,573	1,42
Kysl.siričitý	SO ₂	64,060	2,927	129,84	0,632	0,498	1,27
Kysl. uhličitý	CO ₂	44,010	1,977	188,97	0,821	0,628	1,31
Kysl. uhoľnatý	CO	28,010	1,250	297,04	1,043	0,743	1,40
<u>Kyslík</u>	O ₂	32,000	1,429	259,88	0,917	0,657	1,40
Metán	CH ₄	16,042	0,717	518,77	2,173	1,675	1,30
Neón	Ne	20,183	0,899	404,00	1,030	0,619	1,66
Propán	C ₃ H ₈	44,094	2,019	183,78	1,507	1,310	1,15
Sírovodík	H ₂ S	34,080	1,538	241,24	1,105	0,850	1,30
Vodík	H ₂	2,016	0,089 9	4 128,60	14,235	10,111	1,41
Vodná para	H ₂ O	18,016	(0,804)	461,60	1,855	1,390	1,33
<u>Vzduch</u>	O ₂ +N ₂	28,966	1,293	288,00	1,005	0,714	1,40

Fyzikálne parametre technických plynov

Tabulka 2

Plyn	Bod varu	Bod tope- nia	Výparné teplo l_v	Skup. teplo top. l_t	Kritické parametre		
					t_k	p_k	$v_k \cdot 10^3$
	°C	°C	kJ/kg	kJ/kg	°C	MPa	m ³ /kg
Acetylén	- 83,6	- 81,5	829,0	96,30	+ 35,9	0,634 5	4,33
Argón	-185,9	-189,3	157,4	29,30	-122,4	4,864 1	1,92
Benzol	+ 80,0	+ 5,45	386,8	127,28	+288,5	4,864 0	3,29
Čpavok	- 33,4	- 77,7	1 372,0	339,14	+132,4	11,297 3	4,25
Dusík	-195,8	-210,0	199,2	25,75	-147,1	3,393 1	3,22
Etán	- 89,0	-183,2	489,0	92,95	+ 35,3	4,962 2	4,93
Etylén	-103,7	-169,2	523,0	104,67	+ 9,5	5,138 7	4,63
Hélium	-268,9	-271,0	2 093,0	3,51	-267,9	0,229 5	14,50
Chlór	- 34,1	-103,0	259,5	188,41	+143,9	7,698 2	1,74
Chlorovodík	- 85,0	-115,5	444,0	56,10	+ 51,4	8,414 1	1,64
Kysl.uhličitý	- 10,0	- 75,7	402,0	116,81	+157,5	7,884 5	1,91
Kysl.uhličitý	- 78,4	- 56,6	574,0	184,22	+ 31,0	7,404 0	2,14
Kysl.uhoľnatý	-191,5	-205,1	216,0	30,14	-140,2	3,501 0	3,32
Kyslík	-183,0	-218,8	213,5	13,82	-118,2	5,040 6	2,33
Metán	-161,4	-182,6	506,2	58,61	- 82,9	4,643 4	6,17
Neón	-246,1	-248,6	104,6	16,74	-228,7	2,759 55	2,07
Propán	- 42,2	-187,1	426,0	79,97	+ 96,8	4,256 1	4,42
Sírovodík	- 60,5	- 85,5	549,0	69,50	+100,4	9,017 2	-
Vodík	-252,8	-259,2	460,5	58,19	-239,9	1,294 0	32,27
Vodná para	+100,0	0,0		333,95	+374,2	22,045 3	3,04
Vzduch	-192,2	-213,0	196,7		-140,7	3,765 7	3,23

Merné tepelné kapacity plynov v závislosti
od teploty, $c = a + bt$ v rozmedzí teplôt
0 - 1000 °C

Tabuľka 3

Plyn	$c_p = a + bt$	$c_v = a' + b't$
	[J/kg.K]	[J/kg.K]
O ₂	$c_p = 920,00 + 0,213 \ 4 \cdot t$	$c_v = 652,72 + 0,254 \ 4 \cdot t$
N ₂	$c_p = 1 \ 023,00 + 0,171 \ 0 \cdot t$	$c_v = 728,90 + 0,167 \ 6 \cdot t$
Vzduch	$c_p = 995,20 + 0,187 \ 0 \cdot t$	$c_v = 710,00 + 0,187 \ 0 \cdot t$
H ₂	$c_p = 14 \ 196,29 + 1,206 \ 8 \cdot t$	$c_v = 10 \ 071,88 + 1,206 \ 7 \cdot t$
CH ₄	$c_p = 2 \ 235,00 + 2,959 \ 5 \cdot t$	$c_v = 1 \ 709,60 + 2,974 \cdot t$
CO	$c_p = 1 \ 030,00 + 0,194 \ 0 \cdot t$	$c_v = 720,12 + 0,191 \ 5 \cdot t$
CO ₂	$c_p = 873,46 + 0,460,0 \cdot t$	$c_v = 684,62 + 0,459 \ 8 \cdot t$
H ₂ O	$c_p = 1 \ 833,00 + 0,622 \ 0 \cdot t$	$c_v = 1 \ 378,29 + 0,585 \ 5 \cdot t$
SO ₂	$c_p = 631,36 + 0,310 \ 8 \cdot t$	$c_v = 501,58 + 0,310 \ 8 \cdot t$
H ₂ S	$c_p = 989,79 + 0,453 \ 5 \cdot t$	$c_v = 742,52 + 0,456 \ 6 \cdot t$
NH ₃	$c_p = 2 \ 072,66 + 1,630 \ 1 \cdot t$	—

Stredné merné teplo plynov v rozmedzí teplôt t_1 až t_2

$$\bar{c} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c \, dt = a + b \frac{t_1 + t_2}{2}$$

Výhrevnosť tuhých a kvapalných palív

Tabuľka 6

Tuhé palivo	q Výhrevnosť kJ.kg^{-1}	Kvapalné palivo	q Výhrevnosť kJ.kg^{-1}
Brikety z čierneho uhlia	26 795	Alkohol	26 796
Čierne uhlie Ostrava	23 791	Benzín	42 035
Čierne uhlie Kladno	18 673	Benzén	40 403
Hnedé uhlie Most	16 580	Petrolej	39 775
Hnedé uhlie Handlová	17 961	Plyn, olej (nafta)	41 843
Hnedé uhlie Modrý Kameň	13 984	Skvapalnený plyn	46 055
Lignit - Morava	9 546	Ropa	40 193
Lignit - Slovensko	9 253	Olej vyhr. ľahký	42 077
Antracit	31 192	Olej vyhr. ťažký	41 784
Drevo	14 277	Hnedouhľový decht	40 235
Hutnícky koks	30 103	Kamenouhľový decht	37 681
Plynárenský koks	29 786	Toluén	40 528