TERMOMECHANIKA

1. ZÁKLADNÍ POJMY TERMOMECHANIKY

SYSTÉM (soustava, těleso)- určité množství látky, jejíž termofyzikální vlastnosti vyšetřujeme

OKOLÍ SYSTÉMU vše, co je vně systému

TERMODYNAMICKÝ DĚJ systém při něm mění svůj stav

TEPLOTA základní termodynamická veličina

T[K] teplota podle Kelvinovy teplotní stupnice **T[K] = t[°C] + 273,15**
t [°C] teplota podle Celsiovy teplotní stupnice

$$T_2 - T_1 = t_2 - t_1 \qquad (1.1)$$

$$\boxed{\frac{T_2}{T_1} \neq \frac{t_2}{t_1}} \text{ !!!}$$

T = 0 K – absolutní teplotní nula

TEPLO A TEPELNÝ VÝKON

TEPLO – forma energie, která přechází z tělesa teplejšího na chladnější

$$Q = m.c.(T_2 - T_1) \qquad (1.2)$$

$Q[J]$- množství dodaného (+) nebo odebraného (-) tepla tělesu

1 kcal = 4186,8 J – stará jednotka (1 kcal – množství tepla, které se spotřebuje k ohřátí 1 kg vody o jeden teplotní stupeň)

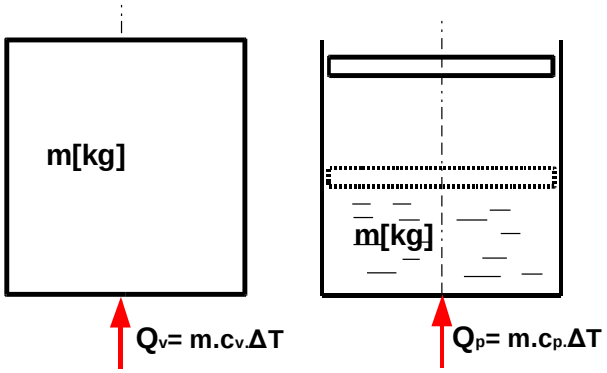
$$q = \frac{Q}{m} = c.(T_2 - T_1) \qquad (1.3)$$

$q[Jkg^{-1}]$- měrné teplo

c [J.kg^{-1}K^{-1}] **měrná tepelná kapacita** = množství tepla, které spotřebujeme k ohřátí 1 kg látky o jeden kelvin; závisí na druhu látky, u vzdušin na způsobu ohřevu

$$c = \frac{Q}{m.\Delta T} = \frac{K}{m} \qquad (1.4)$$

kde $K = \frac{Q}{\Delta T}$ [J.kg^{-1}] – tepelná kapacita



c_s[J.kg^{-1}K^{-1}] – střední měrné teplo (lze jej považovat za konstantní

Látka	c_s [J.kg^{-1}K^{-1}]
železo	465
voda	4187
vzduch	c_p = 1004
	c_v = 716

V = konst	p = konst
$p_2 > p_1$	$V_2 > V_1$
$T_2 > T_1$	$T_2 > T_1$

TEPELNÝ VÝKON (tepelný tok)

$$Q_\tau = \frac{Q}{\tau} = m_\tau.c.\Delta T \quad [Js^{-1} = W] \qquad (1.5)$$

TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST A ROZPÍNAVOST LÁTEK

Teplotní délková roztažnost

$$\Delta l = l_0.\alpha.t \qquad (1.6)$$

$\Delta l[mm]$ prodloužení

l_0 [mm] délka tyče při teplotě $t_0 = 0°C$

$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0.t}$ [K-1] součinitel délkové roztažnosti (Tab.)

t [°C] konečná teplota tyče

Celková délka tyče

$$l = l_0 + \Delta l = l_0(1+\alpha.t) \qquad (1.7)$$

Teplotní objemová roztažnost těles

$$V = V_0 + \Delta V = V_0(1+\gamma.t) \qquad (1.8)$$

$V_0[m^3]$ objem tělesa při teplotě $t_0 = 0°C$

$\gamma[K^{-1}]$ součinitel teplotní objemové roztažnosti (pro tuhé látky a kapaliny dosahuje malých hodnot – objemy se u těchto látek se změnou teploty mění nepatrně)

$\gamma = 3\alpha$

Teplotní objemová roztažnost plynů

- izobarická teplotní roztažnost (p = *konst*)

$$V = V_0 + \Delta V = V_0(1+\gamma.t)$$

$\gamma = \frac{1}{273}$ [K^{-1}] součinitel izobarické teplotní rozpínavosti (pro všechny druhy plynů)

- izochorická teplotní rozpínavost (v = *konst*)

$$p = p_0(1+\beta.t) \qquad (1.9)$$

$p[Pa]$ tlak plynu při teplotě t;

$p_0[Pa]$ tlak plynu při $t_0 = 0°C$

$\beta = \frac{1}{273}$ [K^{-1}] součinitel izochorické teplotní rozpínavosti

SKUPENSTVÍ LÁTEK

Skupenství – tuhé, kapalné, plynné
-dáno určitým rozsahem tlaků a teplot

Změna skupenství

- změna při stálém tlaku a teplotě (izobaricko – izotermická), při které dodáváme nebo odvádíme látce skupenské teplo L[J] – viz ST

L > 0 … přivedené
L < 0 … odvedené

Měrné skupenské teplo

- množství tepla, které musíme přivést nebo odvést jednomu kilogramu látky při jeho skupenské přeměně

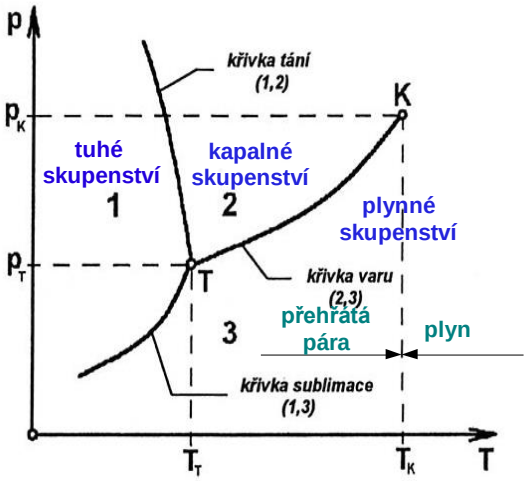
$$l = \frac{L}{m} \qquad (1.10)$$

$l\left[Jkg^{-1}K^{-1}\right]$ měrné skupenské teplo pro 1 kg látky

$L = m.l \ \ [J]$ skupenské teplo

Rovnovážný (fázový) diagram

V každém skupenství může daná látka existovat jen v určitém rozsahu tlaků a teplot



t – křivka tání (tání, tuhnutí)
v – křivka napětí (var, kondenzace)
s – sublimační křivka (sublimace, desublimace)

T – trojný bod – v jednom prostoru jsou v rovnováze všechna tři skupenství

K – kritický bod – mizí rozdíl mezi kapalným a plynným skupenstvím látky (nad K.b.)

Voda

Trojný bod:
$p_{Tb} = 6{,}1.10^2$ Pa $T_{Tb}.= 273{,}16$ K

Kritický bod:
$p_{Kb} = 2{,}21.10^7$ Pa $T_{Kb}= 647$ K

Fyzikální hodnoty uvedených tuhých látek

Látka	Hustota ϱ (kg m^{-3})	Měrná tepelná kapacita c (kJ kg^{-1} K^{-1})	Teplota tavení t (°C)	Měrné skupenské teplo tavení $l_{1,2}$ (kJ kg^{-1})	Tepelná vodivost λ (W m^{-1} K^{-1})
Antimon	6 690	0,209	631		21,0
Bronz	8 700 až 8 900	0,385	900		25,6
Cín	7 200	0,234	232	58,6	62,8
Dural	2 750 až 2 870	0,913			165,0
Hliník	2 700	0,921	658	394,0	209,0
Chrom	7 100	0,502	1 800	316,0	116,0
Kadmium	8 640	0,230	231	54,4	92,5
Křemík	2 330	0,703	1 410		
Litina	7 250	0,54	1 150 až 1 300	96,3	50,0
Mangan	7 300	0,486	1 250	251,0	
Měď	8 930	0,394	1 083	209,0	394
Molybden	10 200	0,231	2 600		137
Mosaz	8 400 až 8 700	0,385	900	184	112
Nikl	8 800	0,461	1 450	264	87
Ocel	7 850	0,461	1 350 až 1 450	205	47
Olovo	11 320	0,13	327	25,1	34,4
Platina	21 450	0,134	1 773	113,0	71,0
Rtuť	13 600	0,138	−39	11,7	9,3
Stříbro	10 500	0,234	960	105,0	418,0
Wolfram	19 300	0,134	3 380	251,0	158,0
Zinek	6 860	0,389	420	113,0	110,0
Zlato	19 290	0,134	1 063	67,5	310,0
Fenolplasty	1 300 až 1 500	1,3 až 1,5	0,18 až 0,79		
Polyamid	1 020 až 1 150	1,67	0,22 až 0,31		
Polyethylen	930	1,465	0,35		
Polypropylen	890 až 1 120	1,90	0,22 až 0,30		
Polyvinylchlorid	1 350 až 1 450	1,0 až 1,1	0,13 až 0,29		
Umakryl	1 170 až 1 200	1,45	0,16 až 0,26		
Umaplex	1 170 až 1 180	1,45	0,19 až 0,23		
Teflon	2 100 až 2 300	1,04	0,24		

Teplotní součinitel objemové roztažnosti α_V kapalin

Kapalina	α_V (K^{-1})	Kapalina	α_V (K^{-1})
Aceton	0,001 49	Kyselina sírová	0,000 54
Benzín	0,001 00	Methylalkohol	0,001 19
Benzen	0,001 22	Olej strojní	0,000 76
Dehet	0,001 80	Pentan	0,001 60
Ether	0,001 65	Petrolej	0,000 96
Ethylalkohol	0,001 10	Rtuť	0,000 181
Glycerin	0,000 50	Toluol	0,001 08
Heptan	0,001 24	Voda	0,000 18

Teplotní součinitel délkové roztažnosti α_l tuhých látek

Látka	α_l (K^{-1})	Látka	α_l (K^{-1})
Bronz	0,000 0175	Bakelit	0,000 018
Cín	0,000 0267	Beton	0,000 012
Cínová kompozice	0,000 0220	Cihla	0,000 005
Dural	0,000 0230	Čedič	0,000 010
Elektron	0,000 0235	Led při 0 °C	0,000 054
Hliník	0,000 0238	Křemen	0,000 0134
Chrom	0,000 0084	Porcelán	0,000 003
Invar	0,000 0015	Pryž tvrdá	0,000 077
Konstantan	0,000 0152	Sklo obyčejné	0,000 008
Měď	0,000 0170	Sklo křemenné	0,000 0006
Mosaz	0,000 0184	Slída	0,000 0135
Nikl	0,000 0145	Žula	0,000 008
Ocel chromová	0,000 0110	Fenolplasty	0,000 03 až 0,000 05
Ocel niklová	0,000 0180	Polyamid	0,000 07 až 0,000 15
Ocel uhlíková	0,000 0120	Polyethylen	0,000 09 až 0,000 33
Olovo	0,000 0292	Polypropylen	0,000 10 až 0,000 19
Platina	0,000 0090	Polyvinylchlorid	0,000 05 až 0,000 18
Stříbro	0,000 0197	Umakryl	0,000 05 až 0,000 13
Zinek	0,000 0290	Umaplex	0,000 065 až 0,000 07
Spékané kovy	0,000 0110	Teflon	0,000 10

Fyzikální hodnoty kapalin

Kapalina	Hustota ϱ (kg mm^{-3})	Měrná tepelná kapacita c (kJ kg^{-1} K^{-1})	Teplota tuhnutí t (°C)	Měrné skupenské teplo tuhnutí $l_{2,1}$ (kJ kg^{-1})	Bod varu t' (°C)	Měrné skupenské teplo výparné $l_{2,3}$ (kJ kg^{-1})	Tepelná vodivost λ (W m^{-1} K^{-1})
Aceton	790	2,156	−94,6	96	56,2	523	0,180
Benzin	700 až 750	2,10	−150,0		90 až 100		0,150
Benzol	879	1,73	5,5	127	80,4	396	0,154
Ether	720	2,26	−118,0		34,5	377	0,220
Ethylalkohol	790	2,50	−115,0	102	78,3	862	0,183
Glycerin	1 260	2,45	18,6	200	290,0	825	0,285
Methylalkohol	790	2,47	−94	682	64,7	1 100	0,212
Olej strojní	850 až 930	1,67					0,140
Petrolej	760 až 860	2,14	−70		150		0,151
Rtuť	13 600	0,138	−39	11,7	357	301	0,300
Toluol	866	1,68	−95	72,0	111	358	0,151
Voda	1 000	4,186	0	334,0			0,580

Měrné skupenské teplo výparné se označuje též r

Fyzikální hodnoty technických plynů

Plyn	Chemická značka	Molová hmotnost M (kg kmol^{-1})	Plynová konstanta r (J kg^{-1} K^{-1})	Teplota varu t' (°C)	Teplota tání t (°C)	Měrná tepelná kapacita c_p (kJ kg^{-1} K^{-1})	Měrná tepelná kapacita c_v (kJ kg^{-1} K^{-1})	Adiabatický exponent $\varkappa$ (l)	Kritické hodnoty: teplota t_k (°C)	Kritické hodnoty: tlak p_k (MPa)	Kritické hodnoty: měrný objem v_k (m^3 kg^{-1})
Acetylen	C_2H_2	26,036	319,6	−83,6	−81,8	1,529	1,323	1,23	35,90	0,634 5	4,330
Argon	Ar	39,944	208,49	−185,9	−189,3	0,532	0,316	1,67	−122,40	4,864 1	1,920
Benzen	C_6H_6	78,108	444,08	80,0	5,45	1,252	1,137	1,10	288,50	4,864 1	3,290
Čpavek	NH_3	17,032	488,27	−33,4	−77,7	2,056	1,555	1,32	132,40	11,297 3	4,255
Dusík	N_2	28,016	296,75	−195,8	−210,0	1,038	0,739	1,401	−147,10	3,393 1	3,218
Ethan	C_2H_4	30,068	276,65	−89,0	−183,2	1,645	1,348	1,22	35,27	4,962 2	4,930
Ethylen	C_2H_4	28,052	296,65	−103,7	−169,2	1,474	1,181	1,25	9,50	5,138 7	4,628
Helium	He	4,003	2 079,00	−268,9	−271,0	5,234	3,202	1,66	−267,90	0,229 5	14,500
Chlor	Cl_2	70,914	117,36	−34,1	−103,0	0,502	0,375	1,34	143,90	7,698 2	1,745
Chlorovodík	HCl	36,465	228,00	−86,0	−115,5	0,812	0,573	1,42	51,40	8,414 1	1,640
Oxid uhelnatý	CO	28,010	297,04	−191,5	−205,1	1,043	0,743	1,401	−140,20	3,501 0	3,222
Oxid uhličitý	CO_2	44,010	188,97	−78,4 (subl.)	−56,6 –	0,821	0,628	1,31	31,04	7,404 0	2,143
Oxid siřičitý	SO_2	64,060	129,84	−10,0	−75,7	0,632	0,498	1,271	157,50	7,884 5	1,910
Kyslík	O_2	32,000	64,06	−183,0	−218,8	0,917	0,657	1,40	−118,20	5,040 6	2,325
Methan	CH_4	16,042	518,77	−161,4	−182,6	2,173	1,675	1,30	−82,90	4,643 4	6,176
Propan	C_3H_8	44,094	183,78	−42,2	−187,1	1,507	1,31	1,15	96,81	4,256 1	4,420
Sirovodík	H_2S	34,080	241,24	−60,5	−85,5	1,105	0,85	1,30	100,4	9,017 2	–
Vodík	H_2	2,016	4 128,60	−252,8	−259,2	14,235	10,111	1,407	−239,9	1,294 0	32,27
Vzduch	$O_2 + N_2$	28,966	287,04	−192,2	−218,2	1,005	0,714	1,402	−140,7	3,765 7	3,227

Spalná tepla ve výhřevnosti paliv

Palivo	Spalné teplo q_v (kJ kg^{-1})	Výhřevnost q_n (kJ kg^{-1})	Palivo	Spalné teplo q_v (kJ kg^{-1})	Výhřevnost q_n (kJ kg^{-1})
Tuhá paliva					
Dřevo čerstvé	10 070	8 160	Uhlí černé	31 400	30 520
Dřevo suché	17 120	15 620	Antracit	33 100	32 530
Rašelina čerstvá	3 015	712	Koks černouhelný	29 700	29 560
Rašelina suchá	15 110	13 650	Uhlík	33 830	33 830
Uhlí hnědé	20 880	19 180			
Kapalná paliva					
Benzín	45 220	42 080	Methanol	22 480	19 550
Benzen	42 290	40 400	Petrolej	41 870	39 775
Hexan	48 190	44 500	Topný olej lehký	44 800	42 080
Ethylalkohol	29 900	22 170	Topný olej těžký	43 960	41 780
Nafta motorová	44 175	41 840	Pentan	48 360	44 590
Plynná paliva					
Acetylen	50 370	48 650	Svítiplyn	38 940	34 670
Oxid uhelnatý	10 140	10 140	Vodík	141 970	119 610
Methan	55 600	49 950	Vodní plyn	17 000	15 700
Propan	50 280	46 300	Kychtový plyn	3 220	3 160

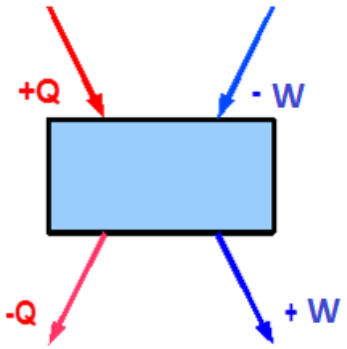
2. TERMODYNAMIKA PLYNŮ

2.1 základní pojmy termodynamiky plynů

Pracovní látka – ideální plyn
– bez vnitřního tření, ideálně stlačitelný, nelze jej zkapalnit, jeho měrná tepla c_p, c_v jsou konstantní (nezávisí na teplotě)

Termodynamická soustava
- část prostoru omezená kontrolním objemem obsahujícím určité množství látky (plynu)

Okolí soustavy - vše, co je mimo kontrolní prostor



V termodynamické soustavě probíhají **termodynamické děje**, při nichž se vyměňuje práce W nebo teplo Q mezi soustavou a okolím.

Izolovaná soustava - nedochází-li k výměně tepla a práce mezi kontrolním prostorem a okolím
Neizolovaná soustava – dochází k přestupu tepla a práce mezi kontrolním prostorem a okolím

Podle toho, zda přes hranice termodynamické soustavy dochází k výměně látky (plynu), rozdělujeme soustavy na *otevřené* a *uzavřené*.

Termodynamické veličiny
- charakterizují termodynamické vlastnosti soustavy a její vztah k okolí.
Stavové veličiny – popisují stav termodynamické soustavy.

Základní stavové veličiny jsou:

Tlak p [Pa]

Teplota T [K]

Objem V[m^3]

měrný objem $v = \frac{1}{\rho}$ [$m^3.kg^{-1}$], kde $V = m.v$

Vzájemnou závislost stavových veličin vyjadřuje *stavová rovnice (viz dále)*

Veličiny popisující změnu stavu plynu (nestavové)
Nestavové veličiny jsou ty, které popisují změnu stavu plynu, např. sdělené teplo Q [J], objemová práce ***W [J]***
Při termodynamických výpočtech se často veličiny vztahují na 1 kg plynu, pak jim říkáme ***měrné veličiny*** *a označujeme je písmeny malé abecedy, např.* $v = \frac{V}{m}$ *- měrný objem*

Termodynamická rovnováha

Plyn během změny svého stavu je v každém okamžiku v rovnováze termodynamické, neboli v rovnovážném stavu. Prakticky to znamená, že v každém okamžiku je v prostoru celého systému stejný tlak a stejná teplota, i když se obě tyto veličiny v průběhu děje postupně mění

Termodynamické děje - posloupné děje, při nichž se mění termodynamické proměnné veličiny.
Idealizované děje (vratné)
Skutečné děje (nevratné)

Energie termodynamické soustavy

Z různých druhů energií (mechanická, elektrická atd.) se v termodynamice zajímáme o *energii tepelnou*, která je dána součtem energií částic (molekul, atomů) látky

Práce

- způsob, kterým reaguje termodynamická soustava s okolím. Její velikost závisí stavu termodynamické soustavy a způsobu změny stavu. Není tedy veličinou stavovou
Dohoda:

$W > 0$	práce, kterou soustava při změně koná (expanze plynu)
$W < 0$	práce, kterou soustava při změně spotřebuje (komprese plynu)

Teplo

-změna energie vyvolaná působením mikroskopických neusměrněných sil. Stejně jaké práce se jedná o způsob reakce soustavy a okolí, a protože velikost sděleného tepa závisí nejen na stavu termodynamické soustavy, ale i na způsobu změny stavu, není stavovou veličinou
Dohoda:

$Q > 0$	teplo přiváděné do soustavy
$Q < 0$	teplo odváděné ze soustavy

2.2 Ideální plyny

Model ideálního plynu je výhodný proto, že rovnice, které jej popisují, jsou jednoduché a lze na nich demonstrovat fyzikální závislosti a vztahy, které s přípustnou nepřesností lze použít pro řadu technických aplikací.

Rovnice popisující chování ideálních plynů jsou východiskem pro odvození vztahů popisujících chování plynů skutečných

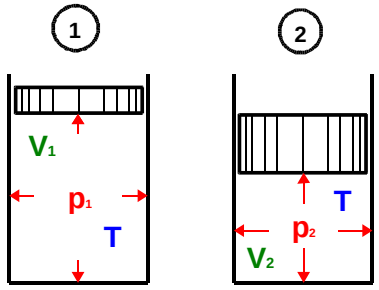
2.2.1 Zákony ideálních plynů

- vyjadřují závislost mezi základními stavovými veličinami

Dva různé stavy ideálního plynu se od sebe liší hodnotami stavových veličin *p, T, v*. Na základě laboratorních pokusů pro ně platí:

$T_1 = T_2 = konst$

Boyle – Mariotův zákon - při konstantní teplotě platí



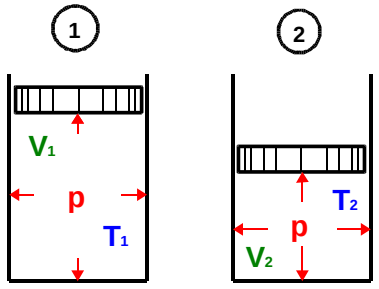
$$p_1V_1 = p_2V_2 = pV = konst. \qquad (2.1a)$$

$$p_1v_1 = p_2v_2 = pv = konst. \quad \text{pro 1 kg plynu} \qquad (2.1b)$$

Součin tlaku a objemu je při konstantní teplotě stálý

$p_1 = p_2 = konst$

Gay-Lussacův zákon vyjadřuje vztah mezi objemem a teplotou plynu při konstantním tlaku

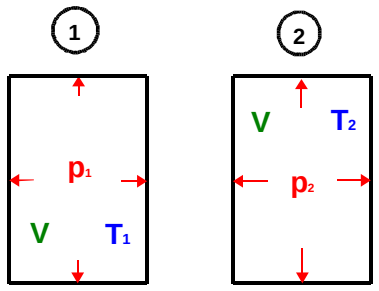


$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \qquad (2.2)$$

Poměr absolutních teplot a objemů je při stálém tlaku stejný (vyšší teplotě odpovídá větší objem a naopak)

$V_1 = V_2 = konst$

Charlesův zákon



$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \qquad (2.3)$$

Při stálém objemu je poměr absolutních tlaků roven poměru absolutních teplot (větší teplotě odpovídá větší tlak a naopak)

2.2.2 Stavová rovnice plynů

Na základě předchozích zákonů lze odvodit vztah

$$\frac{p_1.V_1}{T_1} = \frac{p_2.V_2}{T_2} = konst = r \qquad (2.4)$$

Hodnota $\frac{p.V}{T}$ závisí pro libovolný stav pouze na druhu plynu.
Tuto hodnotu nazýváme měrnou plynovou konstantou – ***r***

$\boldsymbol{r}\left[Jkg^{-1}K^{-1}\right]$ její hodnoty uvedeny v technických tabulkách

Z rovnice (2.4) dostaneme stavovou rovnici pro m kg ideálního plynu

$$\boxed{p.V = m.r.T} \qquad (2.5a)$$

Stavová rovnice ideálního plynu pro 1 kg plynu

$$\boxed{p.v = r.T} \qquad (2.5b)$$

2.2.5 První zákon termodynamiky (první termodynamická věta)

Vyjadřuje zákon zachování energie v termodynamice: **Teplo a mechanická práce jsou ekvivalentní a lze je tedy vzájemně přeměňovat**

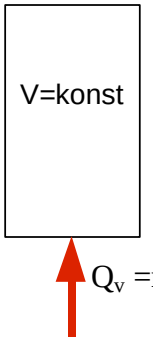
Sdělené teplo $Q[J]$, $q\left[Jkg^{-1}\right]$

- **množství tepelné energie převedené z látky s vyšší teplotou látce s teplotou nižší**

$Q = mc\Delta T$
$q = c\Delta T$

Vnitřní energie $U[J]$, $u\left[Jkg^{-1}\right]$

- **kinematická energie částic plynu (atomů, molekul, iontů). Přiváděním tepla vnitřní energie se zvyšující se teplotou narůstá**

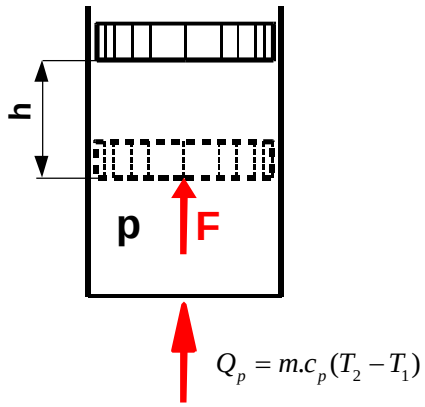


Při teplotě $T_1 \rightarrow U_1 = mc_vT_1$

Při teplotě $T_2 \rightarrow U_2 = mc_vT_2$

$$Q_v = mc_v(T_2 - T_1) = U_2 - U_1 = \Delta U \qquad (2.6.a)$$
$$q_v = c_v(T_2 - T_1) = u_2 - u_1 = \Delta u \qquad (2.6.b)$$

Entalpie $I[J]$, $i[Jkg^{-1}]$



Při ohřevu plynu za stálého tlaku se kromě nárůstu vnitřní energie vykoná i mechanický (objemová) práce W_V

$$W_V = F.h = p.S.h = p.V = p(V_2 - V_1)$$

Pro 1 kg plynu $w_V = p(v_2 - v_1)$

$$Q_p = m.c_p(T_2 - T_1) = \Delta U + p(V_2 - V_1) = \Delta U + W_V = \Delta I \qquad (2.7.a)$$

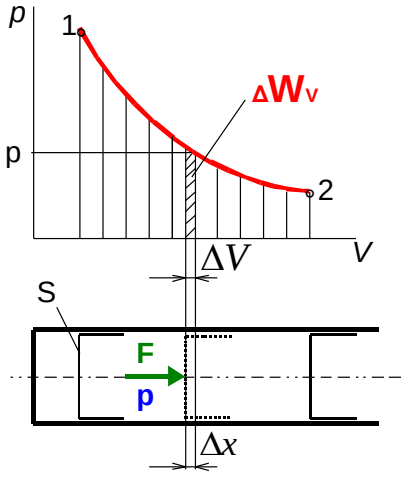
$$q_p = c_p.(T_2 - T_1) = \Delta u + p(v_2 - v_1) = \Delta u + w_V = \Delta i \qquad (2.7.b)$$

Výraz $I = U + pV$ představuje entalpii a $i = u + pv$ měrnou entalpii plynu

I.termodynamická věta
Sdělené (přivedené) teplo za stálého tlaku se zčásti přemění na zvýšení vnitřní energie a částečně na mechanickou objemovou práci. Toto teplo se nazývá **entalpií**

Tlakový diagram umožňuje lépe pochopit

- proces přeměny tepelné energie v mechanickou práci
- činnost tepelného stroje

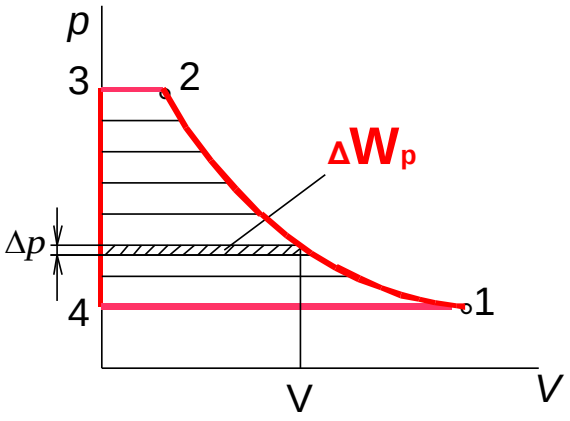


$$\Delta W_V = F.\Delta x = pS\Delta x = pS\frac{\Delta V}{S} = p\Delta V$$

$$W_V = \sum_{V_1}^{V_2} \Delta W_V \Rightarrow$$

Objemová práce je v ***p - v*** diagramu dána plochou pod křivkou změny stavu plynu

Máme-li vyjádřit práci tepelného stroje, např. kompresoru, musíme vzít v úvahu několik změn, které přivedou soustavu do původního stavu



$$\Delta W_p = V.\Delta p$$

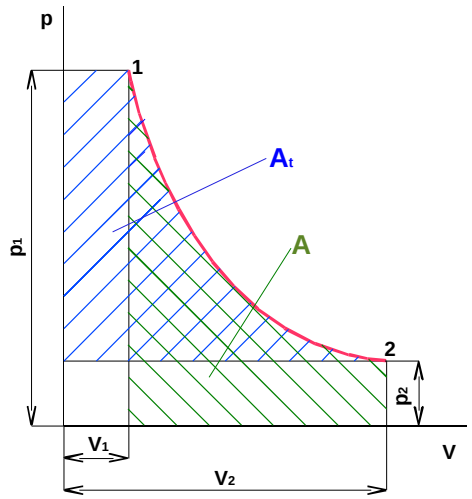
$$W_p = \sum_{p_1}^{p_2} \Delta W_p = \sum V \Delta p,$$

kde

$W_p[J]$ - tlaková (technická)práce

$w_p = \frac{W_p}{m}\left[Jkg^{-1}\right]$ - měrná technická práce

Vztah mezi tlakovou (technickou) a objemovou (absolutní) prací



Případ tep. motoru

$$\boxed{W_t = W_V + p_1V_1 - p_2V_2} \qquad (2.8a)$$

$$w_t = w_V + p_2v_2 - p_1v_1 \text{ , kde} \qquad (2.8b)$$

W_V objemová práce získaná při expanzi plynu

$W_{V1} = p_1V_1$ objemová práce pístu při přivádění plynu do válce (získaná)

$W_{V2} = p_2V_2$ objemová práce spotřebovaná při zpětném pohybu pístu

Objemová práce se vztahuje k jednorázovému ději
Tlaková (technická) práce se vztahuje k oběhu (řada změn, které přivedou soustavu do původního stavu)

Mechanický výkon stroje

$$P = \frac{W_t}{\tau} = \frac{m.w_t}{\tau} = m_\tau.w_t[W] \qquad (2.9)$$

Formulace I.termodynamické věty pomocí entalpie

(vycházíme z definice antalpie a p-V diagramu)

$I = U + pV$

$Q = \Delta U + W_V$

Dosadíme-li do předchozího vztahu za $W_v = W_t + p_2V_2 - p_1V_1$, dostaneme

$Q = \Delta U + W_V = U_2 - U_1 + W_t + p_2V_2 - p_1V_1$

$Q = U_2 + p_2V - (U_1 + p_1V_1) + W_t = I_2 - I_1 + W_t$

$Q = \Delta I + W_t$

$q = \Delta i + w_t$

Z předchozího výkladu je zřejmé, že $c_p > c_v$

Poměr $\frac{c_p}{c_v} = \kappa$ je adiabatický exponent

κ - adiabatický exponent(poissonova konstanta)– závisí na počtu atomů molekuly plynu:

Jednoatomové plyny	κ = 1,66
Dvouatomové plyny (vzduch)	κ = 1,40
Víceatomové plyny	κ = 1,33

Přírůstek entalpie lze vyjádřit dvěma způsoby

$\Delta I = mc_p(T_2 - T_1)$

$\Delta I = \Delta U + p\Delta V$

Z rovnosti pravých stran rovnic

$mc_p(T_2 - T_1) = \Delta U + p\Delta V$

$mc_p(T_2 - T_1) = mc_v(T_2 - T_1) + pV_2 - pV_1$, kde ze stavových rovnic

$pV_2 = mrT_2$ a $pV_1 = mrT_1$

Po dosazení

$mc_p(T_2 - T_1) = mc_v(T_2 - T_1) + mr(T_2 - T_1)$ /: $m(T_2 - T_1)$

$c_p = c_v + r$ Mayerova rovnice (2.10)

$c_p - c_v = r$

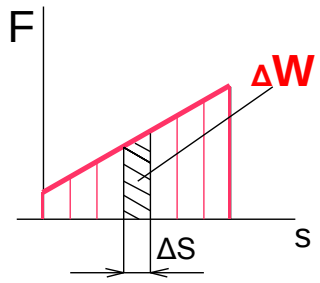
Z předchozích vztahů vyplývá:

$c_v = \frac{1}{\kappa - 1}.r$ (2.11)

$c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1}.r$ (2.12)

2.2.7 Entropie plynu $S\left[JK^{-1}\right]$, $s\left[Jkg^{-1}K^{-1}\right]$

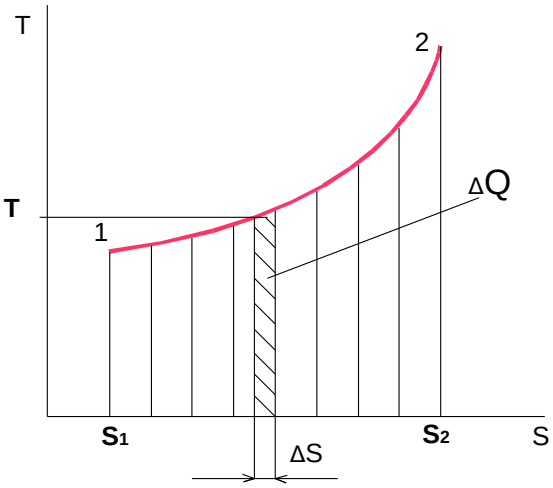
Množství sděleného tepla při změně stavu závisí na teplotě, při které děj probíhá.
Entropie vyjadřuje vztah mezi množstvím přestupujícího tepla a teplotou .
Entropii považujeme za další stavovou veličinu



Pozn.
V mechanice tuhých těles jsme zobrazovali mechanickou práci plochou v diagramu závislosti síly na dráze.

Budeme-li obdobně chtít vyjádřit plochou diagramu velikost sděleno tepla $Q(q)$ v závislosti na teplotě T , pak na vodorovnou souřadnici musíme vynášet uměle vytvořenou veličinu $S(s)$ - entropii (měrnou entropii)

Entropický diagram – umožňuje zobrazit sdělované teplo při termodynamických změnách



$$\Delta Q = T\Delta S \qquad (2.13a)$$

$$\Delta q = T\Delta s \qquad (2.13b)$$

Entropii vztaženou na 1 kg hmotnosti plynu nazýváme měrnou entropií $s\left[J.K^{-1}.kg^{-1}\right]$

Při zahřívání $(q\rangle 0)$*entropie roste* $s_2\rangle s_1$

Při ochlazování entropie klesá $s_2\langle s_1$

Z I.termodynamické věty lze odvodit vztahy pro výpočet rozdílu entropie Δs 1 kg plynu

$$s = f(T,v)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln\frac{T_2}{T_1} + r\ln\frac{v_2}{v_1} \qquad (2.14)$$

$$s = f(T,p)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - r\ln\frac{p_2}{p_1} \qquad (2.15)$$

$$s = f(p,v)$$

$$\Delta s = c_v \ln\frac{p_2}{p_1} + c_p \ln\frac{v_2}{v_1} \qquad (2.16)$$

Pro m kg plynu platí:

$$\Delta S = m.\Delta s \qquad (2.17)$$

- Tepelná energie (teplo) má (oproti jiným druhům energie) tu zvláštnost, že pro její využití není rozhodující jen její množství v látce obsažené, ale i teplota této látky.
- Při sestrojování tepelných diagramů je účelné vyjadřovat množství sděleného tepla v závislosti na teplotě.
-

Pozn.
Absolutní hodnotu entropie neznáme, pracujeme vždy jen s její změnou.

Její vypočtené hodnoty jsou vyneseny na stupnicích diagramů T-s, i-s, kde ji podle potřeby odečteme (tepelné diagramy par)

VRATNÉ ZMĚNY IDEÁLNÍHO PLYNU

Skutečné děje v tepelných strojích nahrazujeme základními **vratnými** změnami stavu. Jedná se o idealizované termodynamické děje, které probíhají za termodynamické rovnováhy.
Nevratné změny – skutečné změny doprovázené ztrátami třením, netěsnostmi, ztrátami tepla atd.

Změny se znázorňují v diagramech p–v a T-s . Při rozboru změn se dále určují:

- rovnice změny stavu
- průběh změn v p-v a T-s diagramu
- změna vnitřní energie
- absolutní práce
- technická práce
- sdělené teplo
- změna entropie
- energetická bilance změny

Základní vratné změny stavu:

v = konst	izochorická
p = konst	izobarická
T = konst	izotermická
S = konst	adiabatická (izoentropická)- bez výměny tepla s okolím
	polytropická – obecná vratná změna

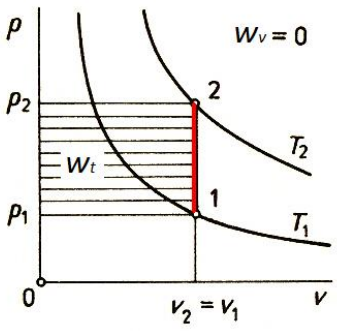
http://www.walter-fendt.de/ph14cz/gaslaw_cz.htm

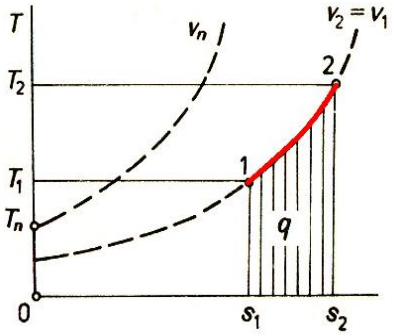
Vratná změna – může probíhat obousměrně

Změna za stálého objemu – izochorická

$v_1 = v_2 = v = konst.,\ dv = 0$

Příklad: Spalování (přívod tepla) směsi benzinu se vzduchem v konstantním objemu kompresního prostoru válce zážehového motoru
Ohřev nebo ochlazení plynu v uzavřené nádobě o konstantním objemu





Stavové rovnice počátečního a konečného stavu

(1) $p_1 v = rT_1$

(2) $p_2 v = rT_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$ Charlesův zákon

Absolutní práce:

$W = 0$
$w = 0$

Technická práce:

$w_{t1,2} = v.(p_2 - p_1)$
$w_t < 0$ při ohřevu
$w_t > 0$ při ochlazování

Sdělené teplo:

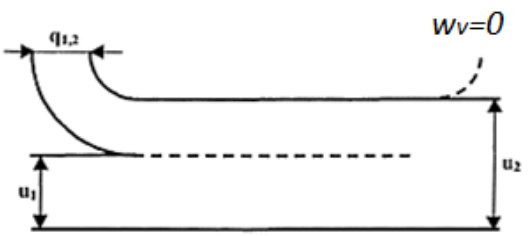
$Q_{1,2} = w + \Delta U = U_2 - U_1 = mc_v(T_2 - T_1)$

$q_{1,2} = \Delta u = c_v(T_2 - T_1)$
q > 0 při ohřevu
q < 0 při ochlazování

$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$

$\Delta S = \Delta s.m$

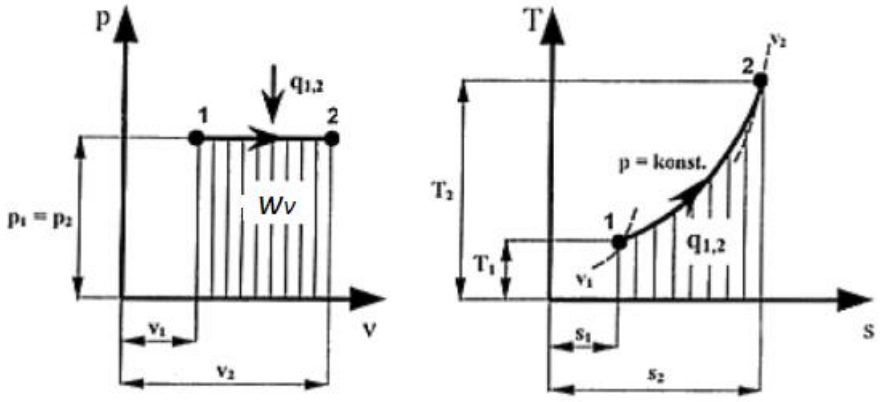
Energetická bilance změny pro 1 kg plynu



Změna za stálého tlaku – izobarická

$p = konst$

Ohřev nebo ochlazení plynu při jeho průtoku ohřívačem nebo chladičem (výměníkem tepla)



Stavové rovnice počátečního a konečného stavu

(1) $pV_1 = mrT_1$

(2) $pV_2 = mrT_2$

$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ Gay – Lussacův zákon

Absolutní práce je rovna $dW = pdV$, tedy

$Wv = p(V_2 - V_1) = mr(T_2 - T_1)$

Technická práce

$Wt = 0$

Sdělené teplo:

(z I.zákona termodynamiky):

Sdělené teplo lze vyjádřit rovněž vztahem

$Q = W_t + \Delta I = I_2 - I_1 = m.c_p(T_2 - T_1)$

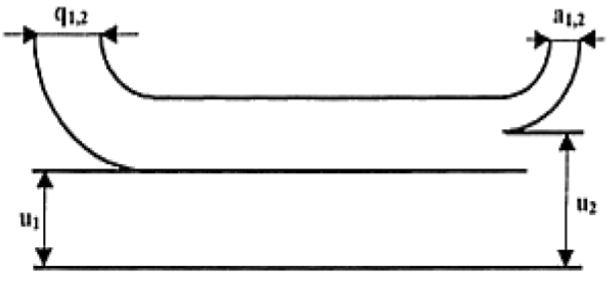
Při izobarické změně je sdělené teplo rovno změně entalpií a způsobuje změnu vnitřní energie i absolutní práce

Změna entropie při $p_1 = p_2$

$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$

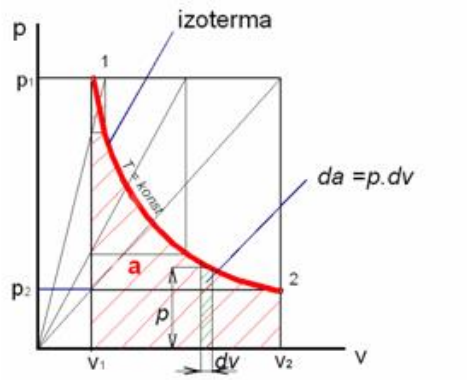
$\Delta S = m.\Delta s$

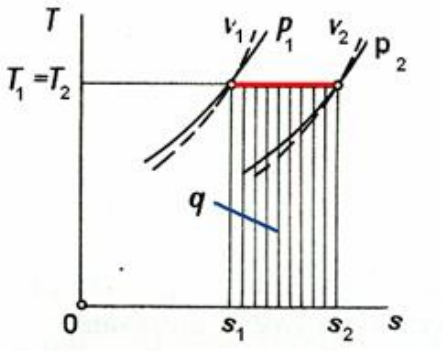
Energetická bilance změny



Změna při stálé teplotě – izotermická

$T = konst$
Změna probíhá tak pomalu, že se teplota plynu stačí vyrovnávat s okolím
Izotermická změna je teoretický děj, jehož praktický význam spočívá v tom, že vypočtené veličiny při expanzní nebo kompresní izotermické práci využíváme jako porovnávací veličiny při posuzování oběhů skutečných strojů





Stavové rovnice počátečního a konečného stavu

$p_1 V_1 = mrT$
$p_2 V_2 = mrT$

$p_1 V_1 = p_2 V_2$ Boyle-Mariotteův záko
v p – v diagramu je izotermou rovnoosá hyperbola

Sdělené teplo, práce absolutní a technická:

Protože $\Delta u = c_v.(T_2 - T_1) = 0$ a také $\Delta i = c_p.(T_2 - T_1) = 0$, plyne z I.termodynamického zákona)

$$q = w_v = w_t = T.\Delta s = rT \ln \frac{v_2}{v_1} = rT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

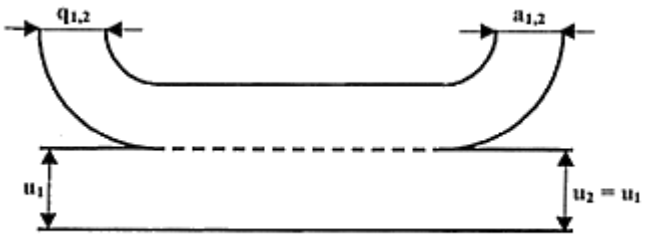
$$\boxed{Q = W_V = W_t}$$

Z odvozeného vztahu plyne, že při izotermické změně stavu se veškeré sdělené teplo přemění na absolutní práci a vnitřní energie plynu zůstává konstantní

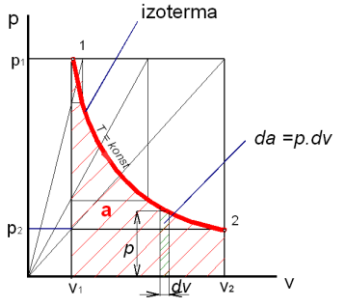
Změna entropie

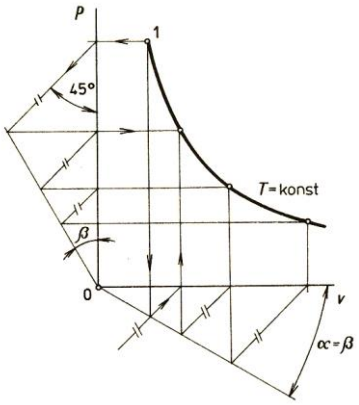
$$\boxed{s_2 - s_1 = r \ln \frac{v_2}{v_1} = r \ln \frac{p_1}{p_2}}$$

Energetická bilance izotermické změny



Konstrukce rovnoosé hyperboly



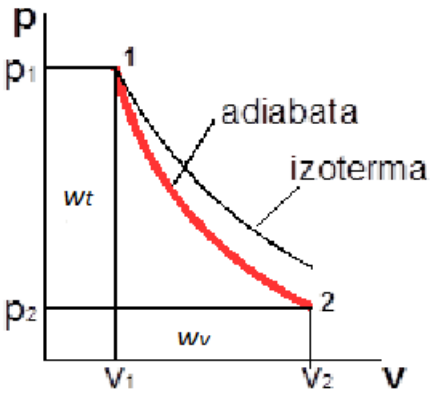


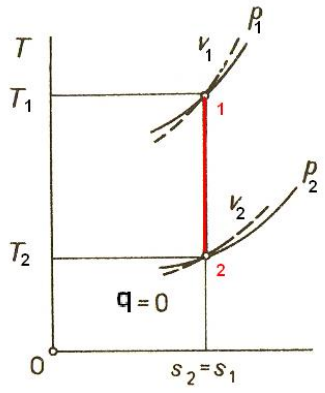
Změna bez sdílení tepla – adiabatická

$s_1 = s_2 = konst$

$q = 0$

- změna, při které se pracovní látce teplo nepřivádí ani se z ní neodvádí
- probíhá v dokonale tepelně izolovaném prostoru (válci)
-teoretická změna – k zobrazení většiny kompresí a expanzí v tepelných strojích





V p– v diagramu adiabatu představuje hyperbola vyššího řádu, která je strmější než izoterma (rovnoosá hyperbola)

Stavové rovnice počátečního a konečného stavu

(1) $p_1 v_1 = rT_1$

(2) $p_2 v_2 = rT_2$

$$\Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2.v_2}{p_1.v_1}$$

$\boxed{p_1 v_1^{\kappa} = p_2 v_2^{\kappa}}$ - rovnice adiabaty

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

Sdělené teplo

$q = 0$

$Q = 0$

Absolutní práce

Z rovnice $q = \Delta u + w_v = 0$ plyne:

$u_2 - u_1 = -w_v$, a tedy:

$w_v = u_1 - u_2 = c_v \Delta T$, po dosazení za $c_v = \frac{r}{\kappa - 1}$ dostaneme

$$\boxed{w_{1,2} = \frac{r}{\kappa - 1}(T_1 - T_2) = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{\kappa - 1}}$$

Jiný výraz pro absolutní práci dostaneme po úpravách a pomocí rovnice adiabaty

$$\boxed{w_{1,2} = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa - 1}\right] = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}\right]}$$

Technická práce

Z výše uvedených rovnic vyplývá poměr mezi absolutní a technickou prací:

$\frac{c_p}{c_v} = \kappa = \frac{w_t}{w_v} =$ Z toho

$\boxed{w = \kappa . w_v}$

Vyjdeme-li pro stanovení technické práce z 2.tvaru I.termodynamického zákona, dostaneme pro technickou práci vztah :

$\boxed{w_t = i_1 - i_2}$

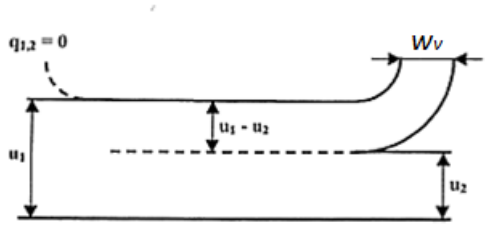
Rozdílu entalpií říkáme adiabatický tepelný spád

Změna entropie

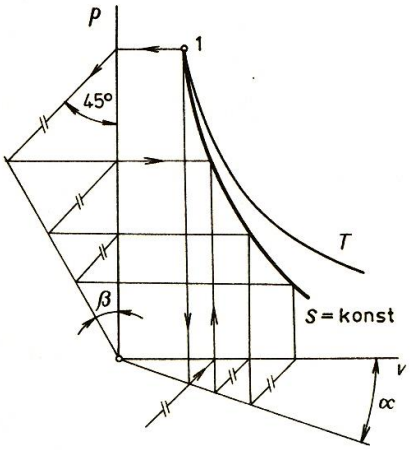
$\Delta s = 0$

Adiabatická změna tedy probíhá při konstantní entropii, proto se jí také říká izoentropická

Energetická bilance adiabatické změny



Konstrukce adiabaty – Bauerova

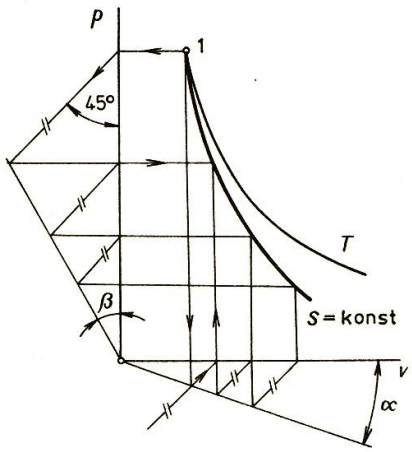


$$1 + tg\beta = (1 + tg\alpha)^{\kappa}$$

Např.:

$$tg\alpha = 0{,}25 \Rightarrow tg\beta = 0{,}367$$

Konstrukce adiabaty - Brauerova



$$1 + tg\beta = (1 + tg\alpha)^{\kappa}$$

Např.:

$$tg\alpha = 0{,}25 \Rightarrow tg\beta = 0{,}367$$

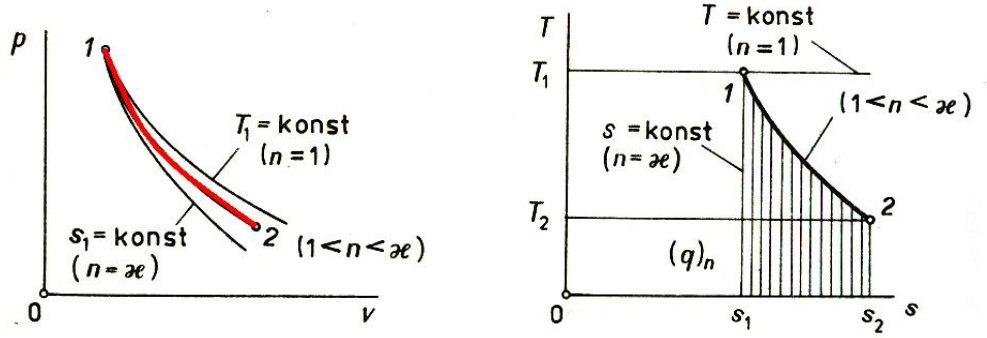
Změna polytropická

Je to komprese nebo expanze provázená sdílením tepla a změnou teploty.
V praxi jí nahrazujeme skutečné komprese a expanze ve strojích

$c_n = konst$

c_n - měrná polytropická tepelná kapacita (polytropické měrné teplo)

$c_n = \frac{n-\kappa}{n-1}.c_v$ n = 1,2 až 1,3 – polytropický exponent



Stavové rovnice počátečního a konečného stavu

$p_1 v_1 = rT_1$

$p_2 v_2 = rT_2$

$p_1.v_1^{\,n} = p_2.v_2^{\,n}$ rovnice polytropy

Absolutní práce

Absolutní objemovou práci vypočítáme buď z 1.matematického tvaru I.termodynamického zákona

$$w = \frac{p_1 v_1}{n-1}\left[1-\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{1-n}\right] = \frac{rT_1}{n-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$$

Technická práce

Srovnáním rovnic dospějeme k závěru, že

$$w_t = n.w$$

Sdělené teplo

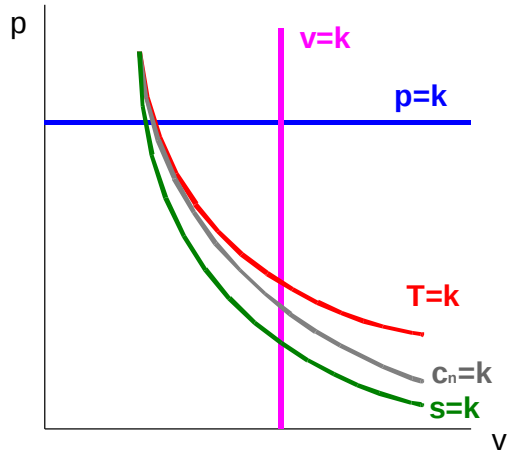
$$q = c_n.(T_2 - T_1) = \frac{n-\kappa}{n-1}.c_v(T_2 - T_1)$$

Pozn.
Polytropickou změnou můžeme nahradit všechny předcházející změny:

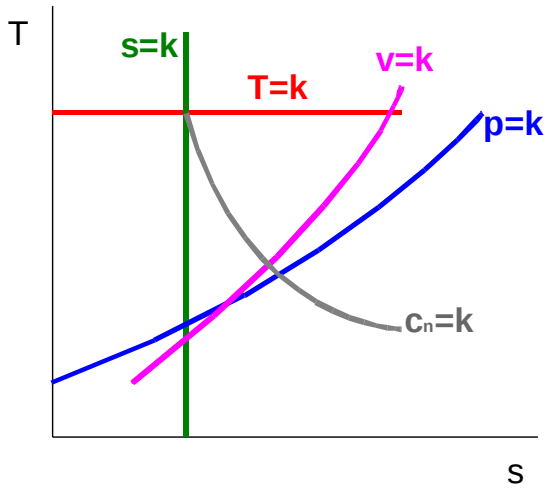
- *změna izobarická* $n = 0 \quad c_n = c_p \quad pv^0 = p = konst$
- *změna izotermická* $n = 1 \quad c_n = \pm \infty \quad pv = konst$
- *změna adiabatická* $n = \kappa \quad c_n = 0 \quad pv^\kappa = konst$
- *změna izochorická* $n \to \infty \quad c_n \to c_v \quad v = konst$

Vratné změny id. plynu – srovnání

p – v diagram



T – s diagram



Stavové rovnice pro výchozí a konečný stav plynu

Pro 1 kg plynu

(1) $p_1 v_1 = r T_1$
(2) $p_2 v_2 = r_1 T_2$

Pro m kg plynu

(1) $p_1 V_1 = mr T_1$
(2) $p_2 V_2 = mr T_2$

I.zákon termodynamiky

Vnitřní energie

Pro 1 kg plynu

$q = \Delta u + w$

$\Delta u = c_v (T_2 - T_1)$

Pro m kg plynu

$Q = \Delta U + W$

$\Delta U = m c_v (T_2 - T_1)$

Entalpie

$q = \Delta i + w_t$

$\Delta i = c_p . (T_2 - T_1)$

$Q = \Delta I + W_t$

$\Delta I = m . c_p . (T_2 - T_1)$

II.zákon termodynamiky

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 2{,}3.c_p.\log\frac{T_2}{T_1} - 2{,}3.r.\log\frac{p_2}{p_1}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 2{,}3.c_v.\log\frac{T_2}{T_1} + 2{,}3.r.\log\frac{v_2}{v_1}$$

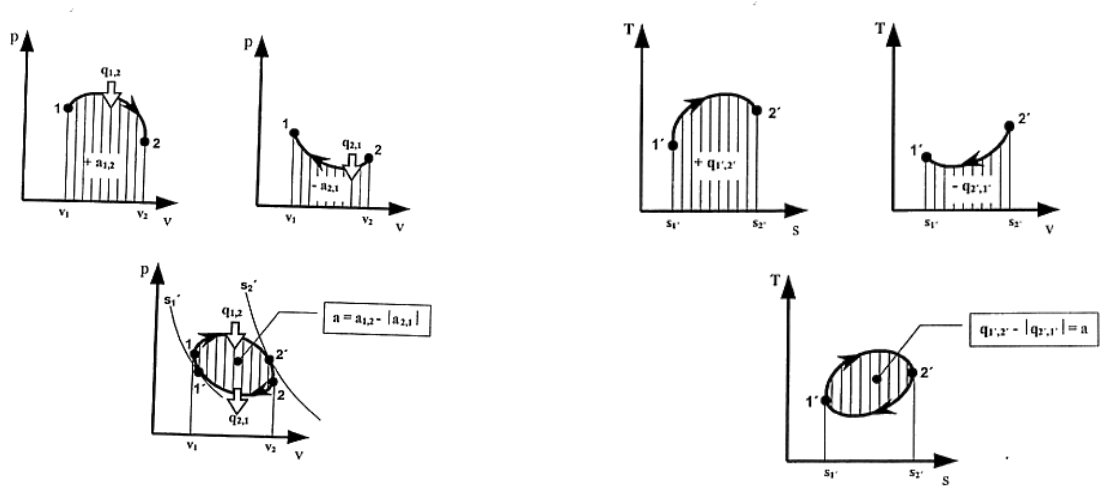
$$\Delta S = m\Delta s$$

II.ZÁKON TERMODYNAMIKY

Uzavřený kruhový cyklus – látka opakovaně prochází účelně sestavenými změnami tak, že se vrací do původního stavu jinou cestou (ve skutečných cyklech se látka po každém cyklu mění, má však stejný počáteční termodynamický stav)

Hnací stroje (motory) *- pravotočivý smysl oběhu cyklu*

- získáme práci z tepelné energie



Absolutní práce cyklu

$a = a_{1,2} - |a_{2,1}| > 0$

Sdělené teplo z I.zákona termodynamiky

$dq = du + pdv$, kde $du = 0$ (cyklus začíná i končí ve stejném bodě

$q_{1,2} - |q_{2,1}| = a_{1,2} - |a_{2,1}| a > 0$

Tepelná účinnost motorů

- podíl energie získané k energii přivedené

$$\eta_t = \frac{a}{q_{1,2}} = \frac{a_{1,2} - |a_{2,1}|}{q_{1,2}} = \frac{q_{1,2} - |q_{2,1}|}{q_{1,2}} = 1 - \frac{|q_{2,1}|}{q_{1,2}} < 1$$

$\eta_t = 1 - \frac{q_o}{q_p}$, kde

q_p teplo přivedené

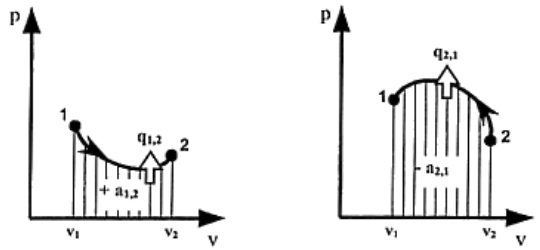
q_o teplo odvedené

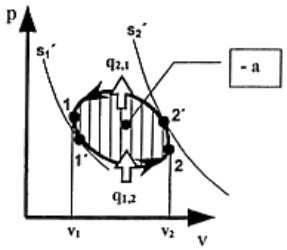
Pracovní stroje *(levotočivé)*

- práci přeměňují na teplo (výsledná práce je záporná a musíme ji cyklu dodat)

Práce cyklu

$$a_{1,2} - |a_{2,1}| = q_{1,2} - |q_{2,1}| = a < 0$$

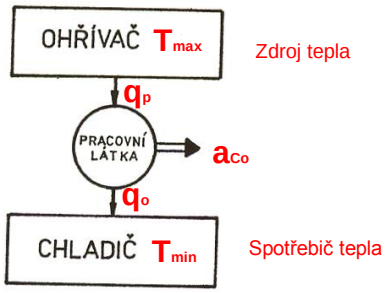




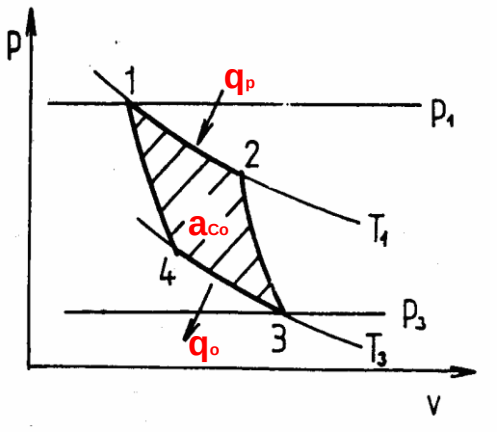
Carnotův oběh – *cyklus ideálního tepelného stroje*

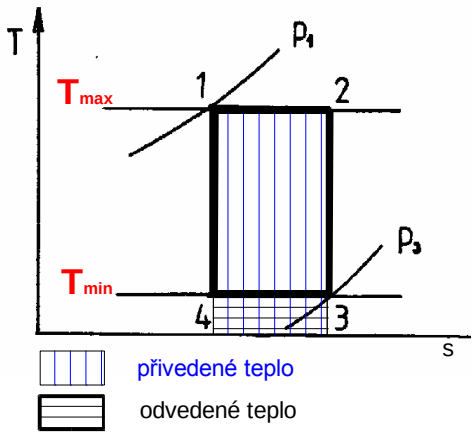
- k získání maximální práce z tepla přivedeného pracovní látkou

Ze všech oběhů mezi týmiž extrémními teplotami T_{max} a T_{min} má největší tepelnou účinnost



Carnotův cyklus – přímý oběh





1 – 2 izotermická expanze $q_p = q_{1,2} = a_{1,2} = T_{\max}\left(s_{\max} - s_{\min}\right) = rT_{\max}\ln\frac{v_2}{v_1}$ - největší množství přivedeného tepla

2 – 3 adiabatická expanze $q_{2,3} = 0$

3 – 4 izotermická komprese $q_{od} = q_{3,4} = a_{3,4} = T_{\min}\left(s_{\max} - s_{\min}\right) = rT_{\min}\ln\frac{v_3}{v_4}$ - nejmenší množství odvedeného tepla

4 – 1 adiabatická komprese $q_{4,1} = 0$

Termická účinnost

$$\eta_{tC} = 1 - \frac{q_o}{q_p} = 1 - \frac{T_{\min}\left(s_{\max} - s_{\min}\right)}{T_{\max}\left(s_{\max} - s_{\min}\right)} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

Chceme-li zvyšovat účinnost Carntova cyklu, musíme
- zvyšovat T_{max} (technologicky omezeno)
- zmenšovat T_{min} (praktická nemožnost dosáhnout 0K)

$\eta_{tC} \leq 1$

Práce Carnotova cyklu

$$a = q_p - q_o = rT_{\max}\ln\frac{v_2}{v_1} - rT_{\min}\ln\frac{v_3}{v_4} = r\ln\frac{v_2}{v_1}\left(T_{\max} - T_{\min}\right)$$

Pro adiabat.změny platí:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_3}{v_2}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_4}{v_1}\right)^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4}$$

Carnotův cyklus se používá k porovnávání technické dokonalosti tepelného stroje pracujícího mezi týmiž teplotami

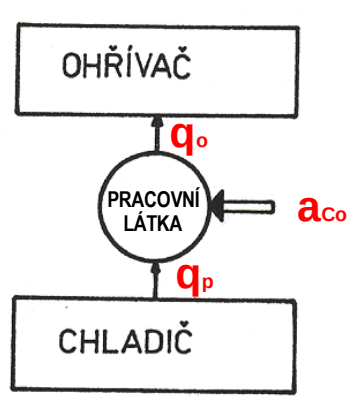
Účinnost Carnotova cyklu je tím větší, čím větší je rozdíl $T_{max} - T_{min}$. Aby měl stroj nějakou účinnost (mohl vůbec pracovat) musí mít možnost využít teplotního spádu. Teplo tedy musí být přiváděné při vyšší teplotě, než při které je odváděné
Formulace II.termodynamického zákona
Žádný tepelný stroj nemůže konat periodicky práci bez rozdílu teplot

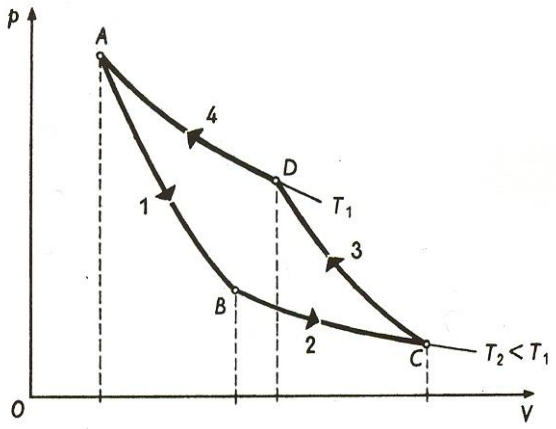
Clausius:
Teplo nemůže samo o sobě přecházet z látky o teplotě nižší na látku o teplotě vyšší

Matematická formulace II.zákona termodynamiky

V celém rozsahu cyklu platí $\int \frac{dq}{T} = 0$, kde $dq = Tds$

Obrácený oběh (ideální chladnička)





a_{co} – spotřebovaná práce

Chladicí faktor

$$\varepsilon_{ch} = \frac{T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$$

POROVNÁVACÍ TEPELNÉ OBĚHY

Tepelný oběh je sled termodynamických změn za sebou řazených tak, že po jeho proběhnutí se pracovní látka vrací do původního stavu

Základní pojmy

Obecné děje probíhající v tepelných strojích lze nahradit změnami stavů plynu

Tepelné stroje – stroje, ve kterých se mění energie tepelná v energii mechanickou a naopak

Stroje hnací
- spalovací motory
- plynové turbíny
- proudové motory
- parní stroje

Stroje hnané
- kompresory
- kompresorová chladící zařízení

Pracovní látka
prochází ve stroji řadou účelně seřazených změn tak, že se po každém cyklu vrací do původního stavu
Pracovní látce může být teplo přiváděno buď mimo stroj (parní korel) nebo spalování probíhá přímo v pracovním válci stroje (spalovací motor)

Uzavřený oběh – opakuje se se stále stejným množstvím téže látky (parní turbína s kondenzací)

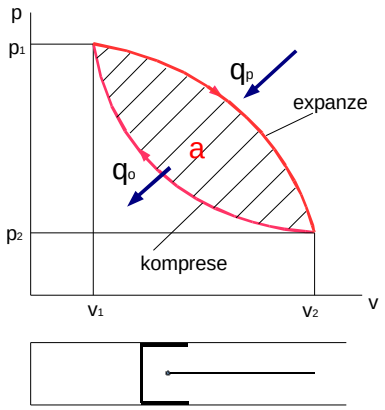
Otevřený oběh – po každém cyklu přivádíme novou pracovní látku o stejném počátečním stavu (spalovací motory)

Jednotlivé změny stavu v tepelném stroji mohou probíhat buď v jednom uzavřeném prostoru (válec spalovacího motoru) nebo v několika vzájemně propojených prostorech (tepelná elektrárna – kotel, turbína, kondenzátor, čerpadlo)
Pro zjednodušení početního řešení předpokládáme, že se oběhu zúčastní 1 kg pracovní látky

Skutečný cyklus se svým průběhem pouze přibližuje teoretickému idealizovanému **cyklu porovnávacímu** (u skutečného cyklu jsou mezi jednotlivými změnami plynulé přechody)

Pro posouzení dokonalosti cyklu vyjadřujeme **termickou účinnost cyklu** η_t **,** která udává, jaká část přivedeného tepla se promění v užitečnou práci oběhu (poměr využitého tepla k teplu přivedenému) $\eta_t = \frac{w_o}{q_p}$

Zjednodušující předpoklady pro početní řešení porovnávacích cyklů:
- cyklus je periodický a opakuje se se stejnou látkou
- pracovní látkou je ideální plyn
- stroj pracuje bez tření a bez tepelných ztrát způsobených sdílením tepla

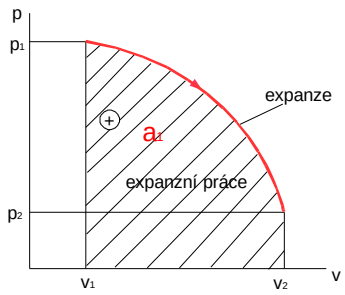


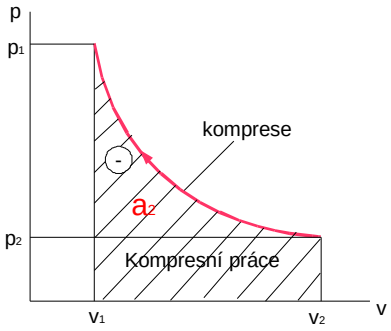
Přímý oběh (tepelný motor)

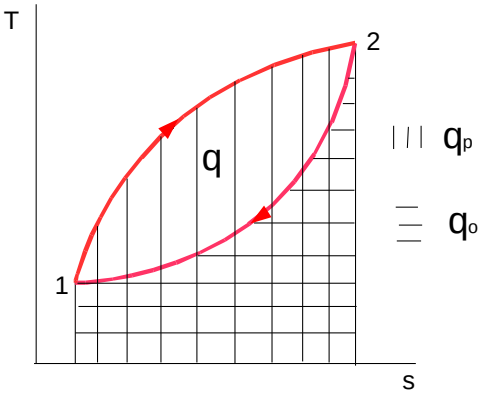
Obrácený oběh (tepelný stroj)

$$w_{id} = w_1 - w_2$$

motor $w_1 \rangle w_2$







q_p teplo přivedené

q_o teplo odvedené (odpadní)

$$w_o = q = q_p - q_o$$

a_o užitečná (technická) práce

Termická účinnost

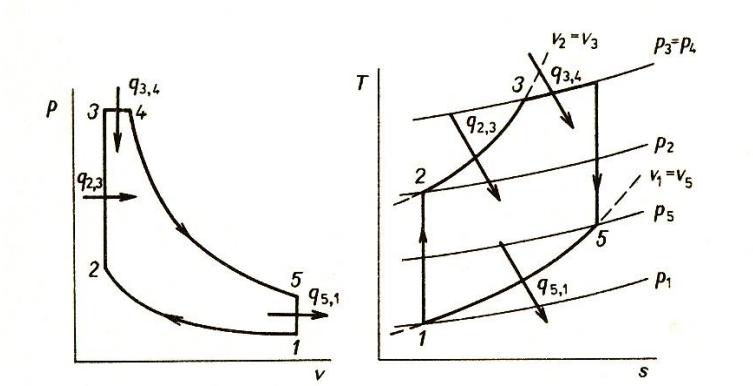
$$\eta_t = \frac{a_o}{q_p} = \frac{q}{q_p} = \frac{q_p - q_o}{q_p} = 1 - \frac{q_o}{q_p}$$

OBĚHY PÍSTOVÝCH SPALOVACÍCH MOTORŮ

Pístový spalovací motor je dnes nejrozšířenějším pohonným agregátem. Historicky rozlišujeme dva základní oběhy (pojmenované podle autorů) – zážehový motor (oběh Ottův) a motor vznětový (oběh Dieselův)
Současné motory již pracují s oběhy, které se od obou původních značně odlišují

Smíšený cyklus (kombinovaný nebo také Sabateův nebo Seiligerův)

- porovnávací oběh pro rychloběžný naftový motor, bezkompresorový, s přímým vstřikováním paliva čerpadlem do spalovacího prostoru.
Palivo přiváděno za vysokých tlaků ($p \rangle 20 MPa$), přičemž dochází k rozptýlení jemných kapiček paliva, které reagují prudce se vzduchem



Cyklus je tvořen pěti navazujícími stavovými změnami:

1 – 2 adiabatická komprese (stlačování) vzduchu – využití setrvačnosti mechanismu

$$q_{1,2} = 0$$

Spalování paliva probíhá při následujících dvou změnách:
2 – 3 izochorická změna – přívod tepla za stálého objemu – v bodě 2 dojde ke vstřiku paliva, jeho vznícení a prudkému zvýšení tlaku

$$q_{2,3} = c_v.(T_3 - T_2)$$

3 – 4 izobarická změna – pokračuje vstřikování paliva, které se dále spaluje při stálém tlaku

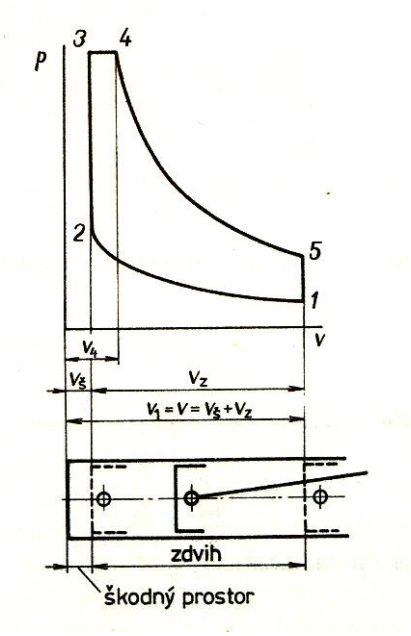
$$q_{3,4} = c_p.(T_4 - T_3)$$

4 – 5 adiabatická expanze – motor koná užitečnou práci

$$q_{4,5} = 0$$

5 – 1 izochorická změna – v bodě 5 otevření výfukového ventilu nebo kanálu-výfuk spalin do atmosféry

$$q_{5,1} = c_v.(T_5 - T_1)$$



Pro vyjádření charakteristik oběhu jsou zavedeny následující bezrozměrové veličiny:

Kompresní poměr

$$\varepsilon = \frac{V}{V_š} = \frac{V_š + V_z}{V_š} = \frac{v_1}{v_2}$$

Z konstrukčních důvodů a z nutnosti potřeby určité velikosti spalovacího prostoru vzniká mezi dnem pístu při horní úvrati a víkem válce prostor, který u spalovacích motorů nazýváme spalovací prostor, u parních strojů a kompresorů škodlivý prostor.

Stupeň izochorického zvýšení tlaku – tlakový poměr

$$\psi = \frac{p_3}{p_2}$$ poměr taků na počátku a konci přivádění tepla pracovní látce za stálého objemu

Stupeň izobarického zvýšení objemu – plnění

$$\varphi = \frac{v_4}{v_3}$$

Tepelná bilance

Přivedené teplo: $q_p = q_{2,3} + q_{3,4}$

Odvedené teplo: $q_o = q_{5,1}$

Práce oběhu

$w_o = w_{3,4} + w_{4,5} - w_{1,2}$

$w_o = q_{2,3} + q_{3,4} - q_{5,1}$

Dosazením a po úpravě $$w = c_v T_1 \left\{ \frac{T_4}{T_1} \left[\kappa - \frac{1}{\varphi}(\kappa - 1) - \frac{\varphi^{\kappa-1}}{\varepsilon^{\kappa-1}} \right] - \varepsilon^{\kappa-1} + 1 \right\}$$

Termická účinnost:

$$\eta_t = \frac{q_p - q_0}{q_p} = 1 - \frac{q_o}{q_p} = 1 - \frac{q_{5,1}}{q_{2,3} + q_{3,4}} = 1 - \frac{c_v(T_5 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\psi.\varphi^{\kappa} - 1}{\kappa.\varphi.\psi - \psi(\kappa - 1) - 1}$$

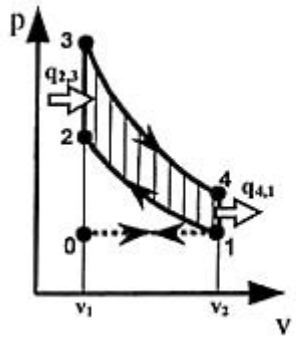
Z předchozí rovnice vyplývá, že termická účinnost
-roste s rostoucím ε (ψ - malý vliv)
- roste s klesajícím φ

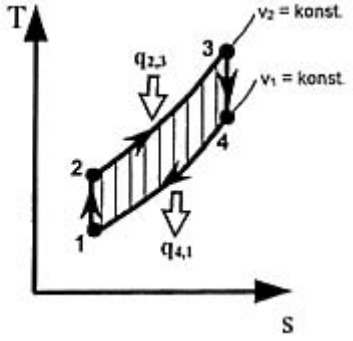
Příklady konkrétních hodnot platných pro skutečný cyklus:

$\varepsilon = 12 \div 25$	kompresní poměr
$p_2 = 3 \div 7 MPa$	tlak na konci komprese
$p_{max} = 10 MPa$	maximální spalovací tlak
$\eta_p = 0{,}65 \div 0{,}70$	porovnávací účinnost (viz Carnotův cyklus)

Výbušný cyklus Ottův (zážehový)

Do válce se nasává směs benzínových par nebo plynu se vzduchem, která je adiabaticky stlačována tak, aby konečná kompresní teplota byla nižší než teplota vznícení směsi. Před koncem kompresního zdvihu se směs zažehne elektrickou jiskrou, čímž dojde k rychlému izochorickému zvýšení tlaku. Následuje adiabatická expanze a izochorický odvod tepla.





kompresní poměr

$$\varepsilon = \frac{V}{V_š} = \frac{V_š + V_z}{V_š} = \frac{v_1}{v_2}$$

1 uzavření sacího ventilu

1 – 2 adiabatická komprese prac. látky (směs paliva se vzduchem) $q_{1,2} = 0$

2 zapálení směsi jiskrou svíčky

2 – 3 izochorické hoření směsi (výbuch) $q_{2,3} = c_v(T_3 - T_2)$

3 - 4 adiabatická expanze plynu $q_{3,4} = 0$

4 otevření výfukového kanálu

4 – 1 expanze spalin (výfuk) z válce $q_{4,1} = c_v(T_4 - T_1)$

1 zavření sacího ventilu

Při další otáčce pokračuje vytlačování spalin z válce a po otevření sacího ventilu nasátí plynné směsi vzduchu a paliva válce

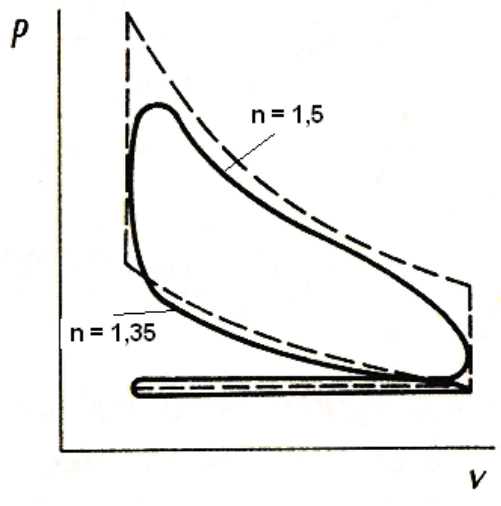
Termická účinnost

$$\eta_t = 1 - \frac{q_o}{q_p} = 1 - \frac{c_v(T_5 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{\psi - 1}{\varepsilon^{\kappa-1}(\psi - 1)}$$

Práce oběhu

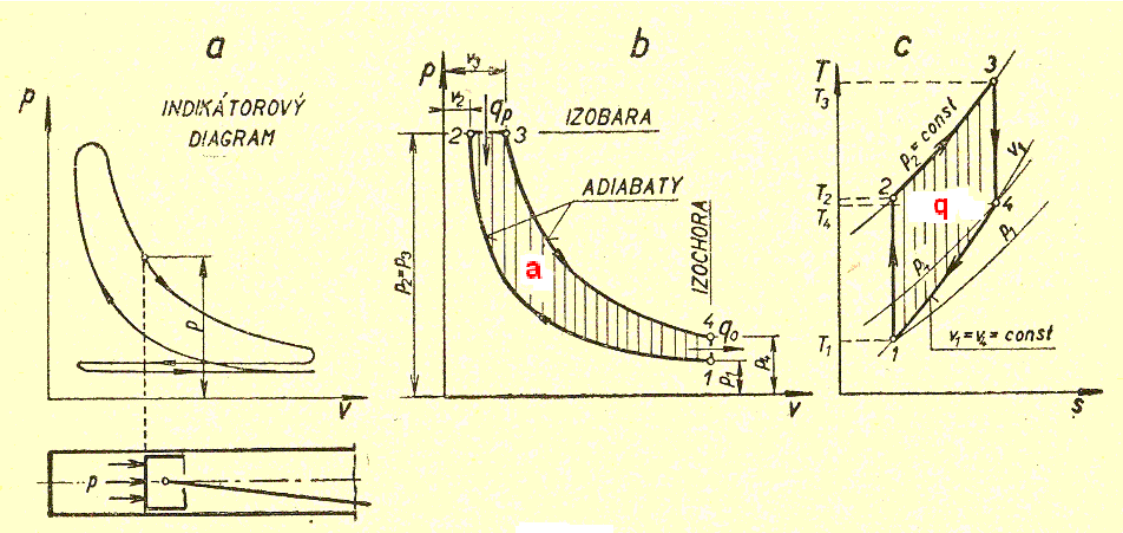
$$w_o = w_{3,4} - w_{1,2} = q_{2,3} - q_{4,1}$$

Skutečný oběh – komprese a expanze nejsou adiabatické, ale polytropické a změny 2-3 a 3-5 nejsou izochorické



DIESLŮV ROVNOTLAKÝ OBĚH

Podle tohoto oběhu pracují pomaloběžné vznětové motory na těžší kapalná paliva, především naftu, která se rozprašuje do horkého vzduchu ve válci, kde se palivo samo vznítí.



1 – zavření sacího ventilu

1 – 2 adiabatické stlačování čistého vzduchu $q_{1,2} = 0$

2 – vstříknutí paliva do válce

2 – 3 izobarické (motor proto označován za rovnotlaký) hoření vstřikovaného paliva, přívod tepla $q_{2,3} = i_3 - i_2 = c_p.(T_3 - T_1)$

3 – 4 adiabatická expanze $q_{3,4} = 0$

4 – otevření výfukového ventilu

4 – 1 izochorické vypouštění horkých plynů z válce do výfuku $q_{4,1} = u_4 - u_1 = c_v.(T_4 - T_2)$

při dalším pohybu pístu se z válce vytlačí zbytky spalin a poté nasaje nový vzduch a motor může celý oběh opakovat

Kompresní poměr

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

Stupeň izobarického zvýšení objemu – plnění

$$\varphi = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

Práce oběhu

$$w_o = w_{2,3} + w_{3,4} - w_{1,2}$$

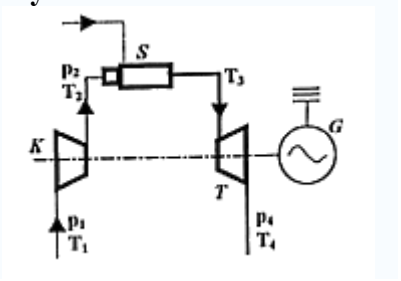
$$w_0 = q_{2,3} - q_{4,1}$$

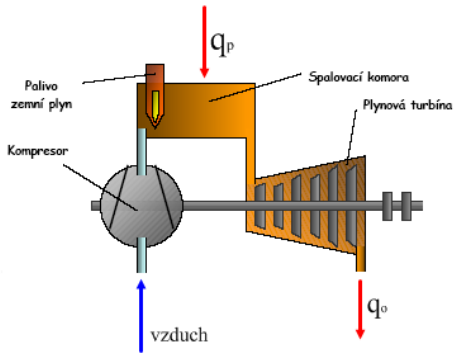
$$w_o = c_p T_1 \left[(\varphi - 1)\varepsilon^{\kappa - 1} - \frac{1}{\kappa}(\varphi^{\kappa} - 1) \right]$$

Termická účinnost

$$\eta_t = 1 - \frac{q_o}{q_p} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{\kappa(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa - 1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\kappa(\varphi - 1)}$$

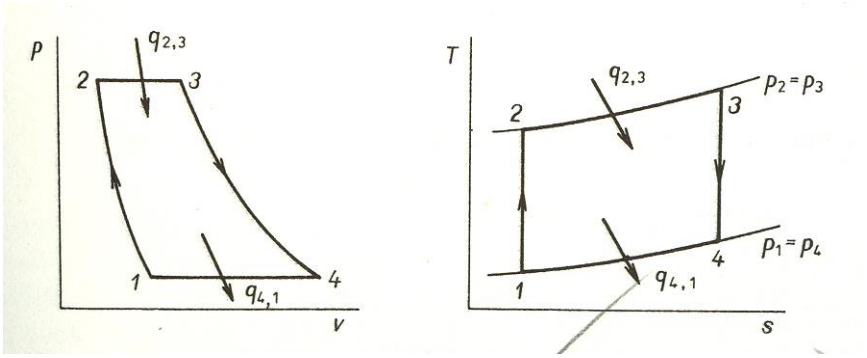
Plynová turbína





Princip:
Vzduch se adiabaticky stlačuje kompresorem (1 – 2), ve spalovací komoře se do vzduchu rozprašuje palivo, které hoří při p=konst , nastává zvýšení teploty na T_3
Následuje adiabatická expanze spalin (3-4) v plynové turbíně, která pohání jednak kompresor, jednak např. elektrický generátor.

Změnu 4-1 si v uzavřeném oběhu představujeme jako izobarické ochlazení, při kterém se odvede teplo. Ve skutečnosti spaliny odcházejí do vzduchu



1 – 2 adiabatická komprese $q_{1,2} = 0$

2 – 3 izobarické hoření – přívod tepla $q_{2,3} = i_2 = i_1 = c_p(T_3 - T_2)$

3 – 4 adiabatická expanze $q_{3,4} = 0$

4 – 1 izobarický výfuk spalin – odvod tepla $q_{4,1} = i_4 - i_1 = c_p(T_4 - T_1)$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_0}{q_p} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon_p^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}, \text{ kde } \varepsilon_p = \frac{p_2}{p_1}$$

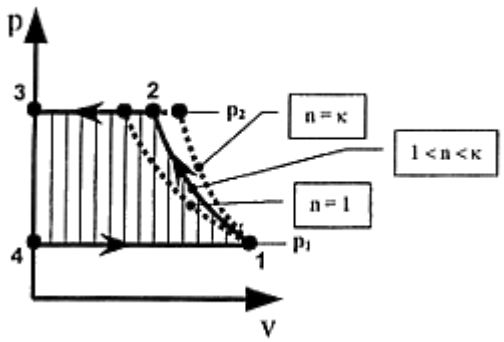
Práce oběhu

$$w = q_{2,3} - q_{4,1}$$

$$w = c_p T_1 \left[\frac{T_3}{T_1} \left(1 - \frac{1}{(\frac{p_2}{p_1})^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \right) + 1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$

KOMPRESOR

Idealizovaný jednostupňový kompresor (bez škodlivého prostoru)



Průběh komprese 1 - 2:
- adiabatická ($n = \kappa$)– bez výměny tepla (velmi rychlý průběh)
- izotermická ($n = 1$) – pomalý průběh
- polytropická ($1 < n < \kappa$) – nejvíc se přibližuje realitě

1– 2 po zavření sacího ventilu nastává komprese plynu, je nutno dodat práci $a = \int_1^2 p dv$

2 – 3 po dosažené požadovaného tlaku p_2 se otvírá výfukový ventil a nastává izobarický výtlak plynu, je nutno dodat práci $w_{2,3} = p_2 v_2$

3 – 4 píst po dosažení levé úvrati zcela vytlačí stlačované médiu, po uzavření výtlačného ventilu dojde k poklesu tlaku z p_3 na p_4. Protože v horní úvrati není nad pístem žádný plyn, není změna považována za termodynamický děj $w_{3,4} = 0$

4 – 1 izobarické sání (píst se začíná pohybovat směrem doprava, při čemž se současně otvírá sací ventil a prostor pod pístem se plní médiem při konstantním tlaku p_1, píst vykonává práci $w_{4,1} = p_1 v_1$

Celková práce kompresoru

$$w = w_{4,1} - w_{1,2} - w_{2,3}$$

Práce ideálního kompresoru je rovna technické práci vynaložené na kompresi ze stavu 1 na stav 2
Při izotermické kompresi

$$w = r T_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

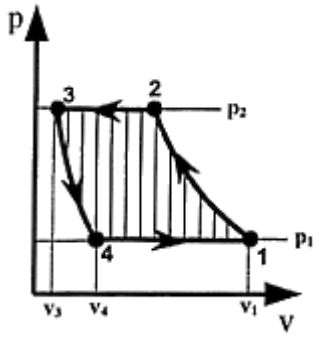
Při adiabatické kompresi bude práce

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

Při polytropické kompresi

$$w = p_1 v_1 \frac{n}{n - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n - 1}{n}} \right]$$

Skutečný kompresor



U skutečného kompresoru musí z technických důvodů (tepelná dilatace, pohyb ventilů) zůstat nad pístem v horní úvrati určitý prostor. Tento prostor nazýváme škodným prostorem. Aby mohlo dojít k nasávání nového plynu, musí plyn ze škodného prostoru nejprve vyexpandovat na sací tlak a pak se může teprve otevřít sací ventil a nastat vlastní sání.

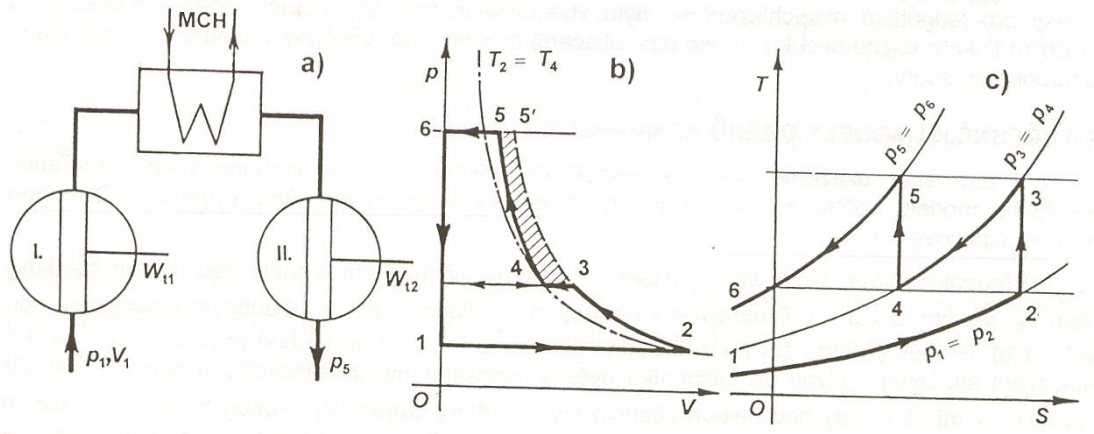
Objemová účinnost – poměr nasátého objemu plynu a zdvihového objemu

$$\eta_o = \frac{v_1 - v_4}{v_1 - v_3} = 1 - \varepsilon\left(\frac{v_4}{v_3} - 1\right) = 1 - \varepsilon\left[\left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{1}{\kappa}} - 1\right],$$

kde $\varepsilon = \frac{v_3}{v_1 - v_3}$

Z důvodu zabránění samovznícení kompresorového oleje je výtlačný tlak p_2 omezen maximální možnou kompresní teplotou T_2. Komprese na vyšší tlaky se řeší rozdělením na několik sériově řazených stupňů. Mezi jednotlivé stupně se zařazují mezichladiče

Vícestupňová komprese

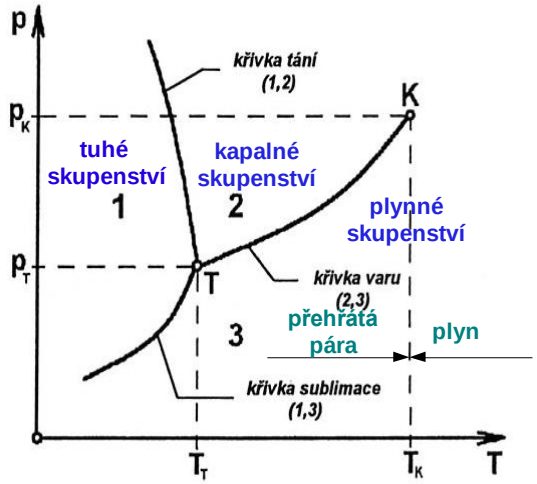


TERMODYNAMIKA PAR

Základní pojmy

Vzdušiny dělíme na plyny a páry. Hranicí mezi nimi kritická teplota.

Pára – plynné skupenství látky, které při daném tlaku a teplotě je blízko stavu, kdy začíná zkapalňovat



Pára = pracovní látka
Vodní pár v tepelných elektrárnách
Páry čpavku, CO_2 – v chladících zařízeních

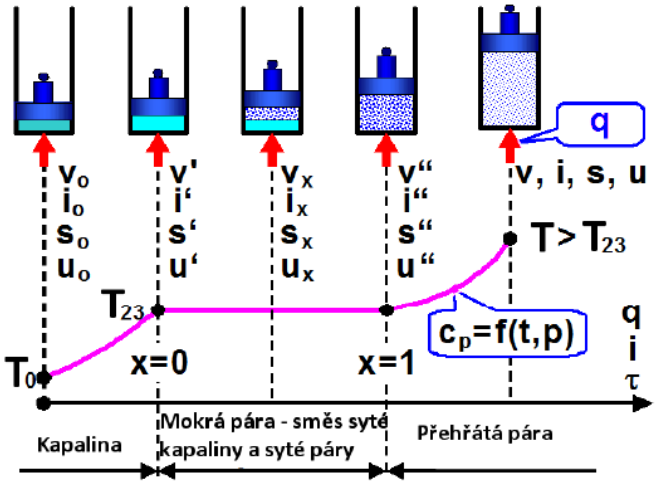
Všeobecně pro páry nelze použít vztahů platných pro ideální plyny

Voda
Trojný bod:
$p_{Tb} = 6{,}1.10^2$ Pa $T_{Tb.} = 273{,}16$ K

Kritický bod:
$p_{Kb} = 22{,}5$ MPa $T_{Kb} = 647$ K

Pára vzniká z kapaliny odpařováním (na hladině kapaliny) a vypařováním (při teplotě varu v celém objemu kapaliny)

m=celková hmotnost vody,
m'=hmotnost syté kapaliny,
m''=hmotnost syté páry



Výroba vodní páry
Přívodem tepla se kapalina ohřívá, až dosáhne při daném tlaku určité teploty T_v, kdy začne vřít, tj. bodu varu. Kapalině, která dosáhla počátku varu, říkáme sytá kaplina. Dalším přívodem tepla se teplota kapaliny nemění, probíhá skupenská změna, var.
Během varu (vypařování) se tlak a teplota nemění (izotermicko-izobarický děj), objem narůstá. Mezi počátkem a koncem varu jsou některé částice látky ve stavu syté kapaliny (drobné kapičky), ostatní již ve stavu syté páry, tj. stavu látky na konci vypařování (varu), při kterém se již veškerá kapalina přeměnila v páru.
Sytá kapalina a sytá pára mají při daném tlaku tutéž teplotu varu – teplotu sytosti.
Dalším přívodem tepla začne teplota páry opět stoupat – pára se stává přehřátou.

Druhy par, stavové veličiny

Pára mokrá – směs syté páry a rozptýlených kapiček syté kapaliny. Množství rozptýlené syté kapaliny v mokré páře vyjadřuje její ***suchost*** $x = \frac{m''}{m_x}$

Pára sytá – při stejném tlaku a teplotě jako má vroucí (sytá) kapalina již neobsahuje rozptýlené kapičky této kapaliny. Určitému tlaku odpovídá určitá teplota syté páry

Pára přehřátá – pára o stejném tlaku jako sytá, ale o vyšší teplotě (případně o stejné teplotě jako pára sytá, ale nižším tlaku). Přehřáté páry se liší stupněm přehřátí

Pro výpočet ***u, i, s*** *musíme dohodou stanovit, od kterého jejich stavu je začínáme měřit. V technických výpočtech nepočítáme s jejich absolutními hodnotami. Pro vodu je dohodnutým počátkem pro měření těchto veličin stav vody při 273,15 K. V tomto stavu pokládáme vnitřní energii vody* $u_0=0$, *entalpii* $i_0 = 0$ *a entropii vody* $s_0=0$.

Kapalina

$p_0, v_0, T_0 = 273K$

$u_0 = 0 \qquad i_0 = 0 \qquad s_0 = 0$

Sytá kapalina x = 0

$q_k = c_{ks}(T_v - T_0)$

q_k … kapalinné teplo

$c_{ks} = 4186{,}8 Jkg^{-1}K^{-1}$ … střední izobarické měrné teplo

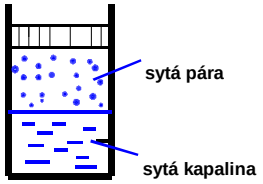
$p', T' = T_v, v'$

$u' = q_k$

$i' = q_k$

$s' = c_{kc}.\ln\frac{T_v}{T_0}$

Mokrá pára = sytá pára + sytá kapalina



1 kg mokré páry

Suchost mokré páry $x = \frac{m''}{m_x} = \frac{m''}{m'' + m'}$

$p_x, T_x = T_v$

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

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

$i_x = i' + x(i'' - i') = i' + x.l_v$

$s_x = s' + x(s'' - s') = s' + x.\frac{l_v}{T_v}$, kde

m'' … množství syté páry

m_x … množství mokré páry

l_v … výparné teplo

Sytá pára x = 1

Hodnoty p, T, v', v'', l_v experimentálně změřeny a dle nich vypočteny $i', i'', u', u'', s', s'' \rightarrow ST$

$p'', v'', T'' = T_v$

$u'' = q_k + l_v - pv''$

$i'' = i' + l_v = q_k + l_v$

$s'' = s' + \frac{l_v}{T_v}$

Přehřátá pára

$q_p = c_{ps}(T - T_v)$ přehřívací teplo

c_{ps} …střední měrná tepelná kapacita přehřáté páry (izobarické měrné teplo) **přeh.páry, závisí na T, p**

p, v, T

$u = i - p.v$

$i = i'' + q_p = q_k + l_v + q_p$

$s = s'' + c_{ps}.\ln\frac{T_{pp}}{T_v} = c_{ks}\ln\frac{T_v}{T_0} + \frac{l_v}{T_v} + c_{ps}.\ln\frac{T}{T_v}$

Pozn.

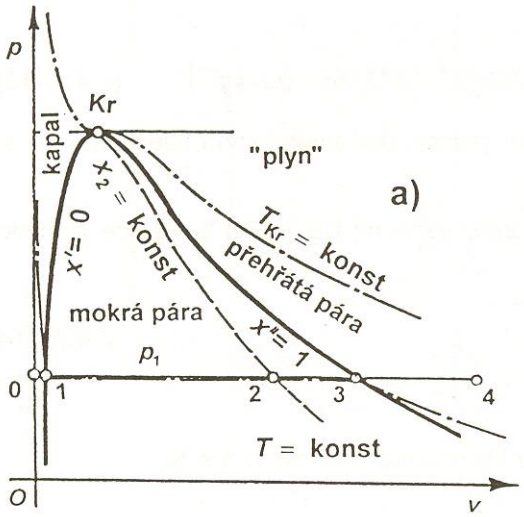
Stavovou rovnici pro ideální plyny lze použít jen pro vysoce přehřátou páru (pro vodní páru je r = 462 $J.kg^{-1}K^{-1}$

TEPELNÉ DIAGRAMY PAR

- grafické zobrazení tabulkových hodnot pro 1 kg látky

Diagram p-v (tlakový)

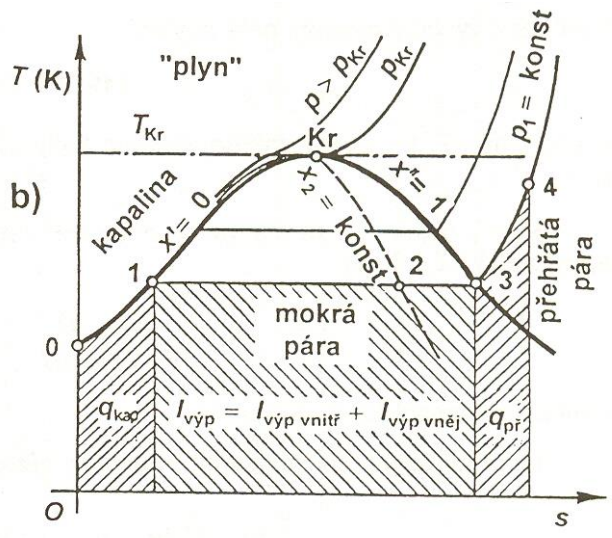
- pro různé tlaky vynášíme hodnoty objemů v', v'', při nichž začíná a končí vypařování vody
Kritický bod – voda se mění přímo v přehřátou páru
$T_k = 647{,}1K,\ p_k = 22{,}5MPa, v_k = v' = v'' = 0{,}00325 m^3 kg^{-1}$



Levá mezní křivka – spojnice bodů varu - voda v sytém stavu, $x = 0$
Pravá mezní křivka – spojnice bodů stavu syté páry (vypařování látky ukončeno), $x = 1$

Levá a pravá mezní křivka se spojují v kritickém bodě K.
Plocha mezi kritickou izotermou Tk a pravou mezní křivkou $x = 1$ odpovídá přehřáté páře. Nad kritickou izotermou je plyn.
Plocha mezi oběma mezními křivkami odpovídá mokré páře

Diagram T-s (entropický)



Izotermy – v celém rozsahu diagramu přímky rovnoběžné s osou entropie s

Izobary – v oblasti kapalné fáze se prakticky shodují s levou mezní křivkou, v oblasti mokré páry se shodují s izotermami a v oblasti páry přehřáté jsou to exponenciální křivky s rostoucí strmostí ve směru entropie

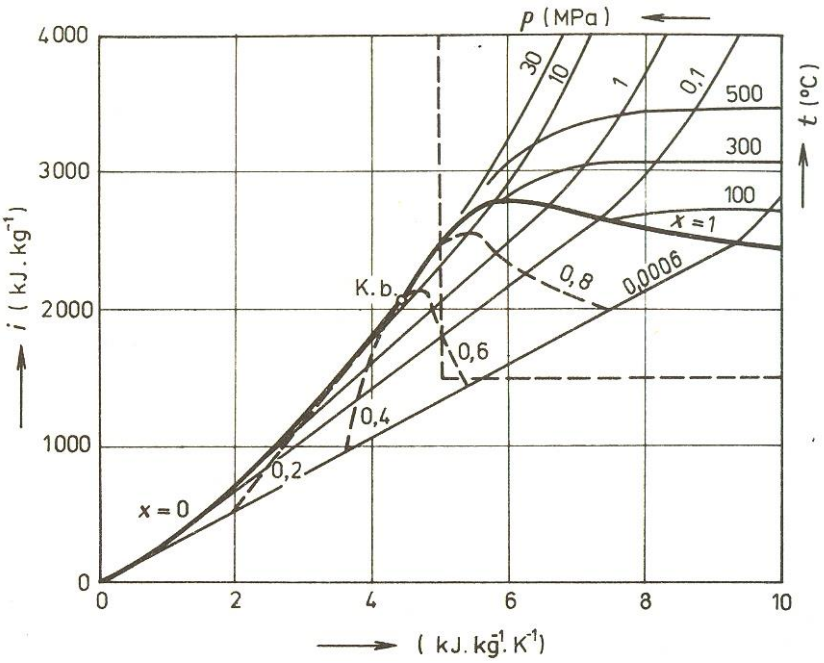
Izochory – v oblasti mokré páry jsou exponenciální křivky, na pravé mezní křivce se lomí a s rostoucí entripií stoupající strměji než izobary
Adiabaty – přímky rovnoběžné s osou teplot T

V T-s diagramu zobrazujeme plochou pod křivkou změny sdělené teplo, můžeme jej proto požít k zobrazení výrobního tepla páry

- q_k kapalinové teplo
- l_v výparné teplo
- q_{pp} přehřívací teplo

Mollierův i-s diagram

U vodní páry potřebujeme v technické praxi pouze oblast v okolí pravé mezní křivky



Izotermy – v oblasti mokré páry přímky shodné s izobarami, na pravé mezní křivce se lomí v křivky rovnoběžné s osou entropie

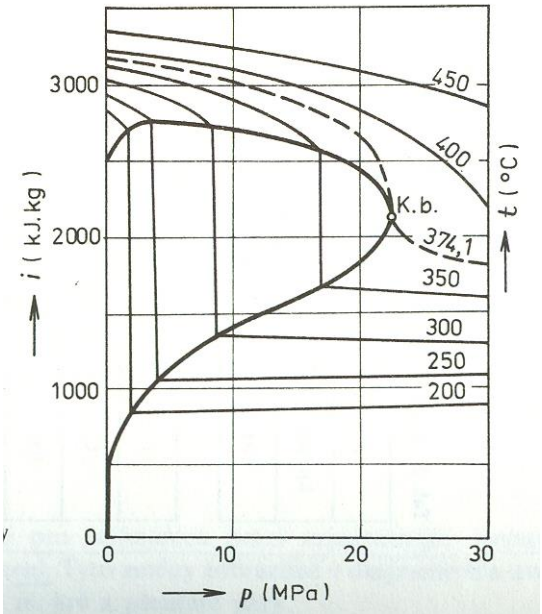
Izobary – v oblasti kapaliny se téměř shodují s levou mezní křivkou, v oblasti mokré páry jsou totožné s izotermami, na pravé mezní křivce přecházejí v exponenciální křivky

Izochory – křivky celém rozsahu diagramu strmější než izobary

Adiabaty- přímky kolmé k ose entropie

p-v diagram

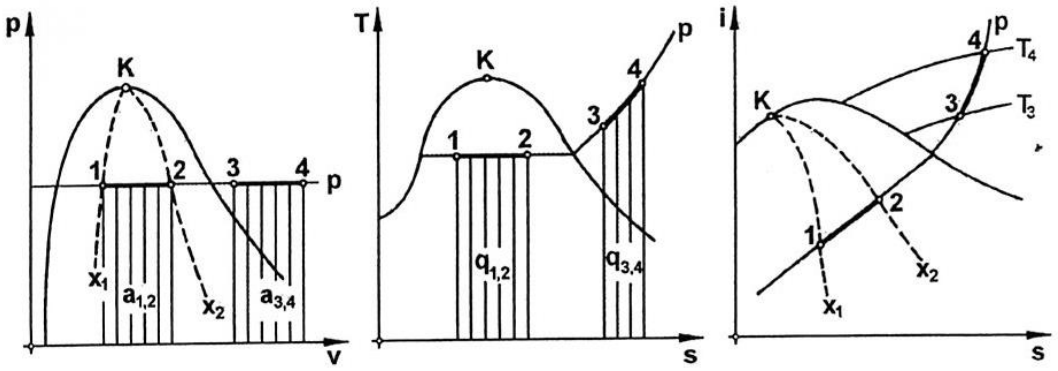
-používá se v chladírenské technice a kotlářské praxi



Vratné stavové změny vodní páry (pro technickou praxi nejdůležitější)

Izobarická změna **p = konst.**

- výroba nebo ohřev páry, anebo ochlazování a kondenzace páry



Měrná absolutní práce

- v oblasti mokré páry

$$w_{1,2} = p(v_{x2} - v_{x1}) = p(v'' - v')(x_2 - x_1)$$

- v oblasti páry přehřáté

$$w_{3,4} = p(v_4 - v_3)$$

Z prvního zákona termodynamiky

$q = \Delta i + w_t$, kde $w_t = 0$

vyplývá vztah pro výpočet sděleného tepla

v oblasti mokré páry

$$q = i_{x2} - i_{x1} = (x_2 - x_1).(i'' - i') = (x_2 - x_1).l_{2,3} = (s'' - s')T'(x_2 - x_1)$$

-

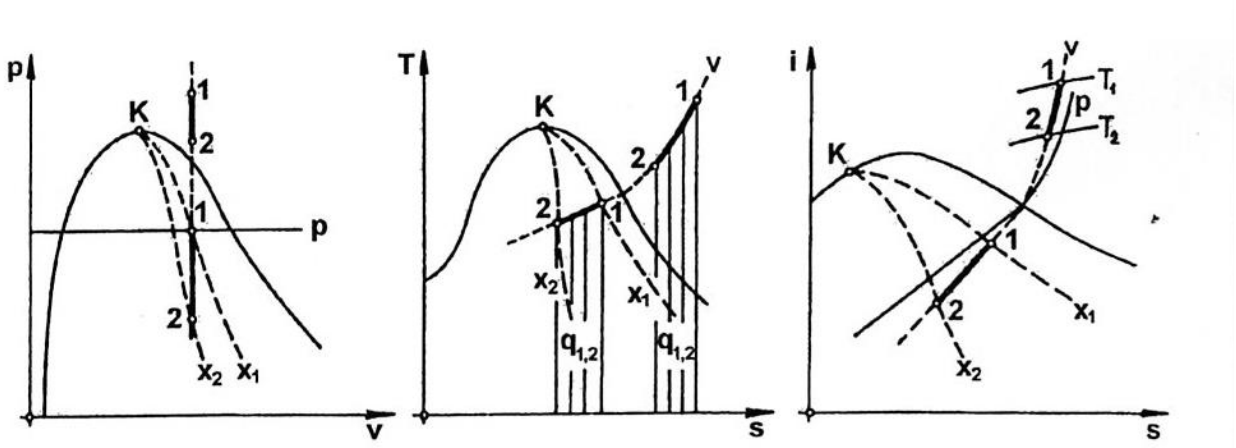
pro oblast přehřáté páry

$$q = i_4 - i_3 = c_{pps}(T_4 - T_3)$$

Hodnoty veličin potřebné pro tepelné výpočty zjistíme buď v tepelných diagramech nebo v termodynamických tabulkách

Izochorická změna

Izochorická změna $v_1 = v_2 = konst.$ probíhá v uzavřené nádobě (např. v parním kotli)



Měrná absolutní práce

$w = 0$

Měrná technická práce v mokré i přehřáté páře

$w_{t1,2} = v(p_2 - p_1)$

Měrné sdělené teplo (u izochor.změny zvýší jen vnitřní energii)

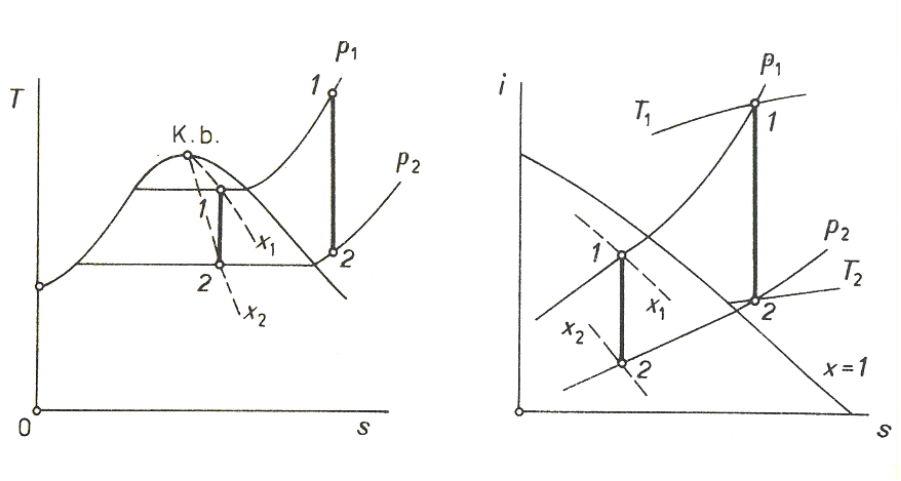
$q_{1,2} = u_{x2} - u_{1x}$ **resp**. $q_{1,2} = u_2 - u_1$

Z 1.zákona termodynamiky lze pro *v=konst* změnu vnitřní energie rovněž vyjádřit jako

$\Delta u = i_2 - i_1 - v(p_2 - p_1)$

Změna adiabatická – bez sdílení tepla q = 0

- komprese a expanze par ve strojích pokládáme za adiabatické



Z I.zákona termodynamiky $i_2 - i_1 = q - a_t$ získáme vztah pro technickou práci

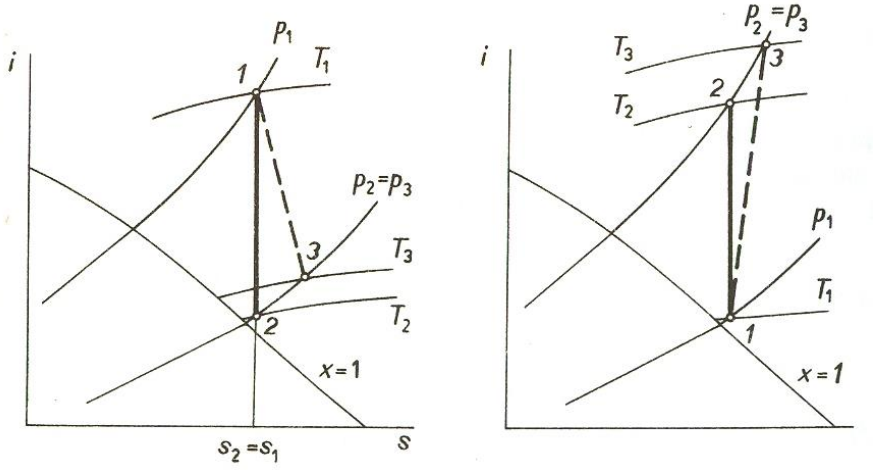
- **oblast mokré páry**

$w_t = i_{x1} - i_{x2} = i_1' - x_1(i_1'' - i_1') - i_2' - x_2(i_2'' - i_2')$

- **oblast přehřáté páry**
- $w_t = i_1 - i_2$

Hodnoty entalpie najdeme v diagramech i – s nebo v termodynamických tabulkách

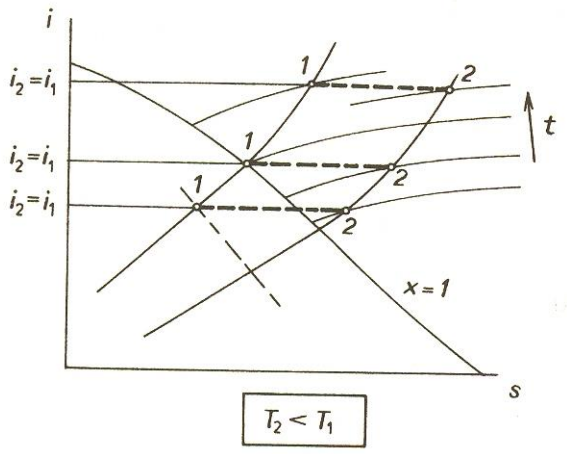
Skutečné komprese a expanze ve strojích jsou nevratné, entropie se během skutečných adiabatických dějů zvětšuje, skutečnou technickou práci proto při nevratné expanzi získáme menší a při kompresi spotřebujeme větší



Škrcení páry

V technických zařízeních, např. v uzavíracích armaturách, regulačních ventilech, clonách apod. nastává při průtoku škrcení páry – snižuje se její tlak aniž bychom získali užitečnou (technickou) práci

Při adiabatickém škrcení $i_2 = i_1$

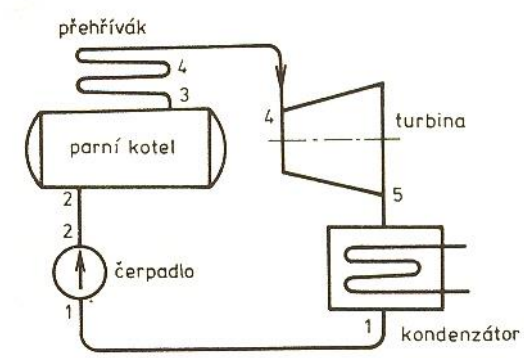


Ve všech případech škrcení páry dochází ke snížení její teploty

- mokrá pára se vysušuje, nebo se stává sytou, případně přehřátou
- sytá pára se škrcením stává přehřátou
- přehřátá pára zvětšuje stupeň přehřátí (posuzuje se podle vzdálenosti stavu přehřáté páry od stavu sté páry při téže hodnotě tlaku, jaký má pára v konečném stavu)

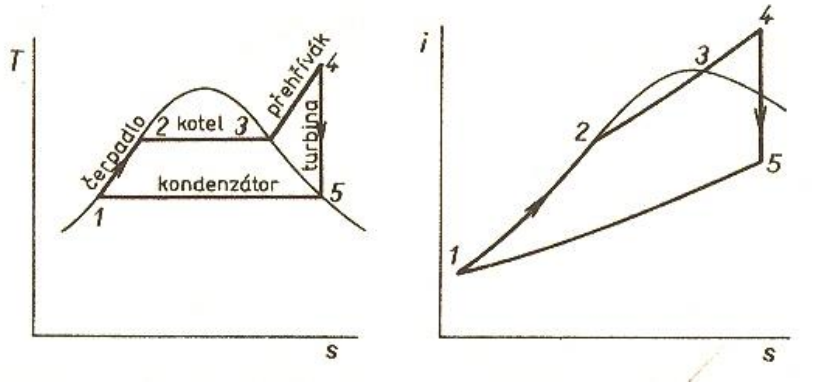
PARNÍ TURBÍNY

(Clausiův – Rankinův oběh klasické parní kondenzační elektrárny)



Oběh parní turbíny

- otevřený s odběrem – pára po vykonané práci v turbíně použita k dalším účelům (vytápění)
- uzavřený – pára po vykonané práci kondenzuje a vrací se zpět do oběhu (tepelná elektrárna)



Princip

Čerpadlem je voda dopravována do parního kotle ($p_2 \rightarrow p_1$). V kotli nastává izobaricko-izotermické vypařování (stálý tlak udržují pojistné ventily). Sytá pára (3) proudí do přehřívače, kde je za p=konst přehřívána na T_4 a stává se přehřátou. Poté je vedena do parní turbíny, kde adiabaticky expanduje a koná tam práci, kterou pohání např.el. generátor. Mokrá pára proudí do kondenzátoru, kde dochází k izobaricko-izotermické kondenzaci a celý děj se opakuje

Přivedené teplo $q_p = i_4 - i_1$

Odvedené teplo $q_0 = i_5 - i_1$

Práce získané v parní turbíně $w = q_p - q_o = i_4 - i_5$

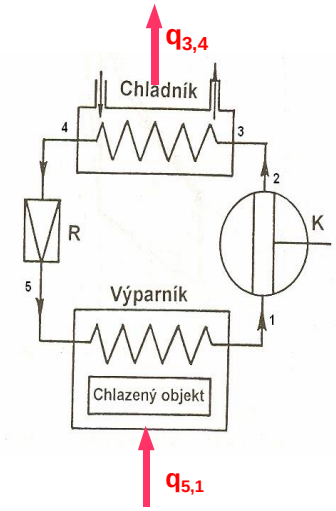
Termická účinnost $\eta_t = \dfrac{i_4 - i_5}{i_4 - i_1}$

KOMPRESOROVÉ CHLAZENÍ

Chlazení látek je založené na II. zákonu termodynamiky, podle kterého teplo může samovolně přecházet z vyšší teplotní hladiny na nižší. Chceme-li nějakou látku chladit, musíme ji zapojit do termodynamického procesu, k jehož realizaci je třeba dodat teplo. Zdrojem tohoto tepla je látka, kterou chceme chladit.
Jednoduché termodynamické děje, k jejichž realizaci je třeba dodat teplo, jsou změny skupenství. ***Nejvýhodnější změnou skupenství se pro účely chlazení jeví vypařování látky****, protože výparné teplo je výrazně větší než skupenské teplo tání. Má-li se ke chlazení při nízkých teplotách využít výparného tepla nějaké látky (chladiva), musí mít tato* ***látka bod varu při požadovaných nízkých teplotách****. Bodu varu různých chladiv odpovídají různé látky. Např. teploty varu -10°C se dosahuje u čpavku při 0,3Mpa, při tlaku 0,1 MPa je teplota varu -33°C*

Uzavřený oběh – většina

Chladící médium – plyn (SO_2, CO_2, NH_3,CH_3CL-metylchlorid) – teplota varu při p_b pod 0°C, lze je za normální teploty snadno zkapalnit



Princip

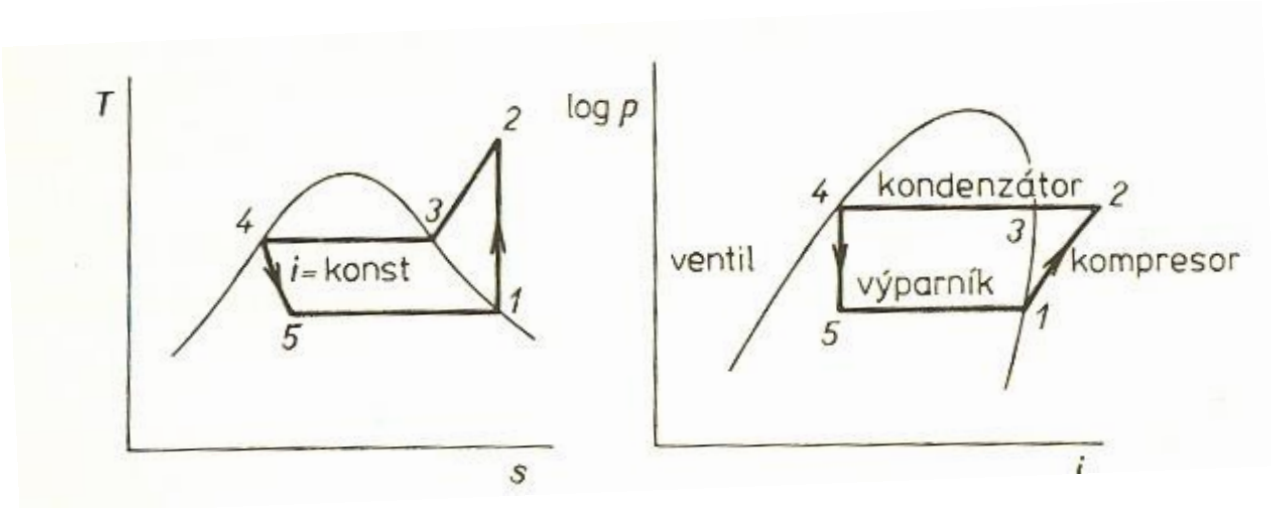
1 – 2 Kompresor nasává chladící médium, adiabaticky je stlačuje $q_{1,2} = 0$

2 – 3 - 4 v kondenzátoru (chladníku)dochází k izobarickému ochlazení a kondenzaci – zkapalnění chladiva - párám se odvádí při p=konst měrné teplo $q_{2,4} = i_2 - i_4$

4 - 5 Ve škrtícím ventilu dojde při konst. entalpii ke snížení tlaku kapalného chladiva opět na tlak p_1 a teplotu T_1

5 - 1 mokrá pára se vede do výparníku, kde se prudce vypařuje, přičemž odnímá okolí teplo $q_{5,1} = i_1 - i_5$

Děj se dále periodicky opakuje



Chladící faktor (namísto účinnosti)

$$\varepsilon_{ch} = \frac{T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} > 1$$

V diagramu **i – log p** pro oběhy skutečných chladících zařízení lze přímo zjistit množství energie předávané v jednotlivých částech zařízení

kompresor $q_{komp} = i_2 - i_1$

kondenzátor $q_{kond} = i_2 - i_4$

výparník $q_o = i_1 - i_5$

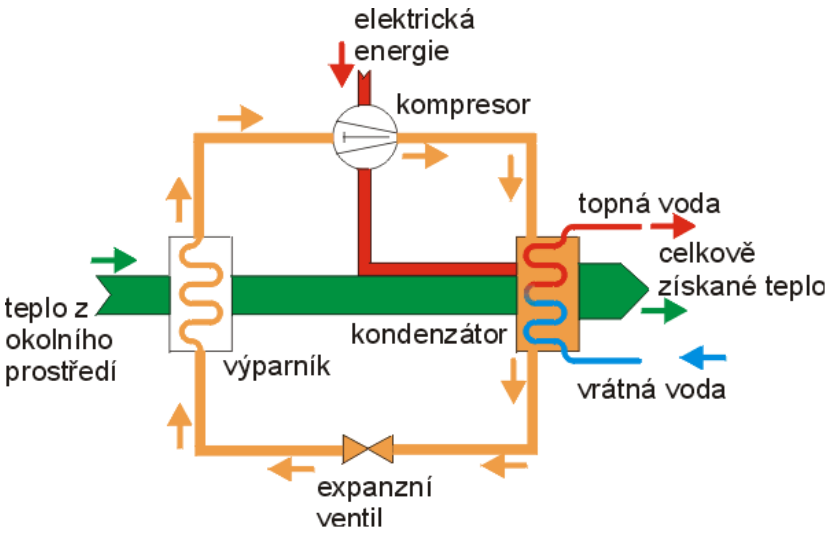
Chladící faktor pro skutečné zařízení

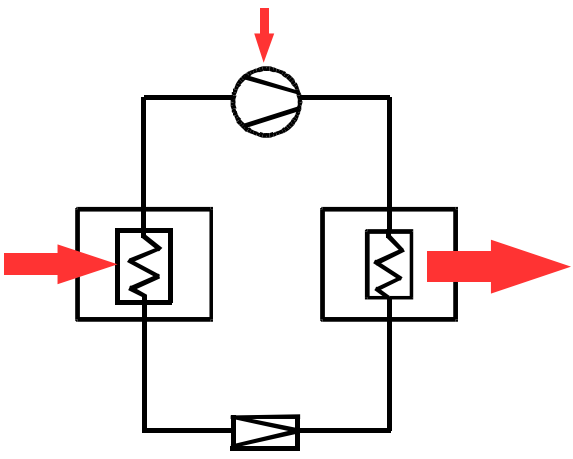
$$\varepsilon_{ch} = \frac{q_o}{q_{komp}} = \frac{i_1 - i_5}{i_2 - i_1}$$

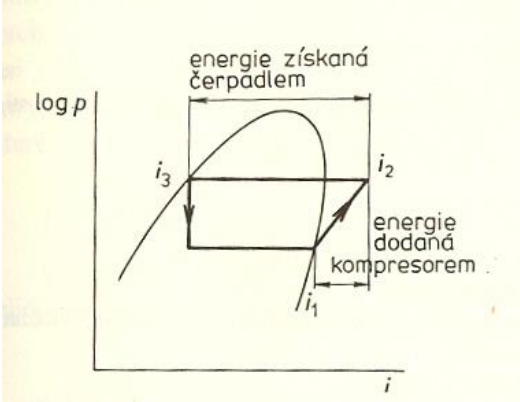
TEPELNÉ ČERPADLO

Tepelné čerpadlo je strojní zařízení převádějící teplo z prostředí o nižší teplotě (z venkovního vzduchu, vody, země) do prostředí s teplotou vyšší (do vody, vzduchu).
Z hlediska termodynamiky je **shodné s chladícím zařízením**, rozdíl je v účelu použití.

- V chladícím okruhu tepelného čerpadla cirkuluje pracovní médium - chladivo, které cyklicky mění své skupenství
- Cirkulaci chladiva zajišťuje kompresor
- Ve výparníku chladivo o nízkém tlaku odebere teplo z okolního prostředí využitím skupenského tepla při odpařování
- Chladivo tak i při velmi nízkých teplotách přejde z kapalného do plynného stavu
- Chladivo v plynném stavu je nasáto kompresorem a stlačeno. Při zvýšení tlaku stoupne také jeho teplota
- Elektrická energie potřebná pro pohon kompresoru zvýší tepelný potenciál pracovního média.
- To pak při průtoku kondenzátorem předá využitelné teplo do topného systému, ochladí se a zkapalní
- V expanzním ventilu se seškrtí na původní nižší tlak a celý cyklus se opakuje







Základním principem je uzavřený okruh, obdobně jako u chladničky, jímž se teplo na jedné straně odebírá a na druhé předává. Zatímco chladnička odebírá teplo vnitřnímu prostoru a potravinám, tepelné čerpadlo odebírá nízkopotenciální teplo z okolního prostředí (země, voda, vzduch) a předává do topného systému. Tak, aby mohlo být nízkopotenciální teplo využito k vytápění či ohřevu teplé vody, je třeba ho převést na teplotu vyšší. K tomuto účelu využívá tepelné čerpadlo fyzikálních jevů spojených se změnou skupenství v závislosti na tlaku pracovní látky - chladiva.

- Ve výparníku tepelného čerpadla zkapalněné chladivo po předešlém snížení tlaku expanzním ventilem začne vřít a následně odnímat teplo zdroji nízkopotenciálního tepla. - Páry chladiva jsou poté kompresorem odsávány a stlačeny tak, že dochází k jejich zahřátí na vysokou teplotu.
- V kondenzátoru pak dojde k předání získaného tepla ohřívané látce, přičemž se páry opět ochlazují a zkapalní.
- Celý oběh je uzavřen odvodem chladiva do výparníku přes expanzní ventil, který snižuje tlak kapalného chladiva.

Topný faktor

Poměr topného výkonu a elektrického příkonu vyjadřuje TOPNÝ FAKTOR tepelného čerpadla. Udává, kolikrát je větší získaný výkon (získaná energie) proti vynaloženému příkonu (vynaložené energii). Čím vyšší je teplota přírodního zdroje tepla a čím nižší je teplota média v topném systému, tím vyšší je topný faktor.

Běžně používaná tepelná čerpadla dokáží vyrobit třikrát až čtyřikrát více tepla nežli spotřebují elektrické energie. Poměr těchto veličin, tedy energie dodané (tepelný výkon) ku energii spotřebované (elektrický příkon) se u tepelného čerpadla nazývá topný faktor.

SDÍLENÍ TEPLA

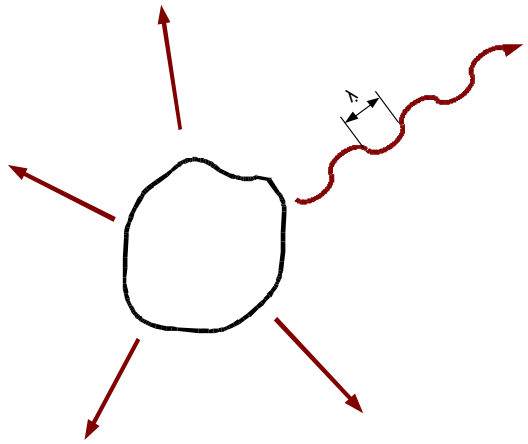
Sdílení tepla je samovolný přenos tepla z místa o vyšší teplotě do místa nižší teploty

Podle způsobu rozlišujeme:

TEPELNÉ ZÁŘENÍ - SÁLÁNÍ (radiace)	sdílení tepla prostřednictvím elektromagnetického vlnění
VEDENÍ TEPLA (kondukce)	sdílení tepla uvnitř látek mezi molekulami
PROUDĚNÍ TEPLA (konvekce)	sdílení tepla na rozhraní dvou látek různého skupenství – PŘESTUP TEPLA

Skutečné děje představují téměř vždy kombinaci dvou nebo všech tří základních případů

1. Zákony teplotního záření



$\lambda = 0{,}8 \div 40\,\mu m$

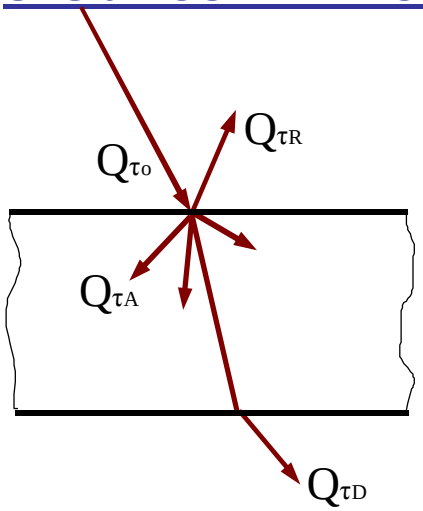
SÁLÁNÍ je přeměna energie tělesa na energii zářivou a její předávání do prostoru obklopujícího těleso.
Přeměna zářivé energie, dopadající na těleso se nazývá pohlcování

Podstatou tepelného záření je elektromagnetické vlnění o určité délce vlny, které není závislé na teplotě prostředí, kterým prochází, ale je závislé na teplotě povrchu tělesa, které tepelné vlny vyzařuje
Sdílení tepla sáláním je šíření tepla formou elektromagnetického vlnění o délkách vlny

Tepelná energie → sálavá energie → tepelná energie

$\lambda[\mu m]$… vlnová délka tepelných paprsků
$v = 300.10^6\, m.s^{-1}$… rychlost světla
Světelné paprsky $\lambda = 0{,}4 \div 0{,}8\,\mu m$
Tepelné paprsky $\lambda = 0{,}8 \div 40\,\mu m$

Pozn.
Zákony šíření, odrazu a lomu světelných paprsků platí i pro paprsky tepelné



Q_{τ_0} … celkové teplo dopadající na těleso (zářivá energie)
Q_{τ_A} … teplo pohlcené tělesem (pohlcená energie)
Q_{τ_R} … teplo odražené (odražená energie)
Q_{τ_D} …teplo procházející tělesem (propuštěná energie)

$$Q_{\tau_0} = Q_{\tau_A} + Q_{\tau_R} + Q_{\tau_D} /: Q_{\tau_0}$$
$$1 = \frac{Q_{\tau_A}}{Q_{\tau_o}} + \frac{Q_{\tau_R}}{Q_{\tau_O}} + \frac{Q_{\tau_D}}{Q_{\tau_O}}$$
$$1 = A + R + D$$

A … poměrná tepelná pohltivost (absorpce)
R … poměrná tepelná odrazivost (reflexe)
D … poměrná propustnost (diathermibilita)

Těleso dokonale černé
$A = 1$
$R = D = 0$
Těleso dokonale bílé
$R = 1$
$A = D = 0$
Skutečná tělesa a kapaliny (téměř žádné teplo neprochází)
$D = 0$
$A + R = 1 \Rightarrow$ Těleso, které dobře pohlcuje teplo, špatně odráží a naopak

Pohltivost a odrazivost závisí na jakosti povrchu a částečně na barvě

Stefan – Botlzmannův zákon

Experimentálně bylo zjištěno (Stefan) a matematicky dokázáno (Boltzmann), že tepelný tok (Q_{τ_0}) vyzářený dokonale **černým tělesem** ($Q_{\tau_0} = Q_{\tau_A}$) při jeho povrchové teplotě $T[K]$ je dán rovnicí

$$Q_{\tau_0} = Sc_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 [W]$$

$S[m^2]$ povrch černého tělesa
$c_0[Wm^{-2}k^{-4}]$ … součinitel sálání dokonale černého tělesa
$c_O = 5{,}77 Wm^{-2}K^{-4}$
$T[K]$ … teplota povrchu tělesa

Slovy: **Energie záření je přímo úměrná čtvrté mocnině teploty povrchu tělesa**

$$q_{\tau_0} = \frac{Q_{\tau 0}}{S} = c_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 [Wm^{-2}]$$ - hustota sálavého toku černého tělesa

Šedé těleso

$$Q_\tau = Sc.\left(\frac{T}{100}\right)^4$$

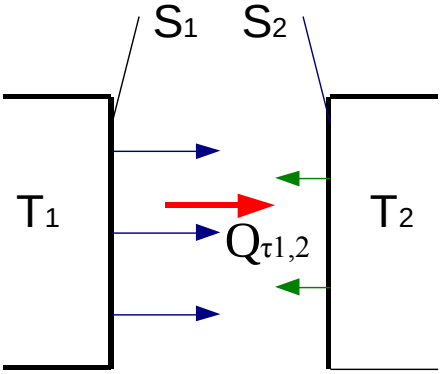
Porovnáním energie záření šedého tělesa a tělesa černého dostaneme tzv.
poměrnou pohltivost (zářivost):

$$\varepsilon = \frac{q_\tau}{q_{\tau_0}} = \frac{c}{c_0}$$

Dokonale černé těleso: $\varepsilon = 1 \rightarrow$ všechno teplo dopadající na dokonale černé těleso je pohlceno

Kirchhofův zákon – vztah mezi intenzitami vyzařovaného a dopadajícího tepelného výkonu
Poměr sálavosti k pohltivosti je stejný pro všechna tělesa, při téže absolutní teplotě se rovná sálavosti dokonale černého tělesa a závisí jen na teplotě

2. Výměna tepla sáláním



$$S_1 = S_2 = S$$
$$S_1 // S_2$$
$$T_1 \rangle T_2$$

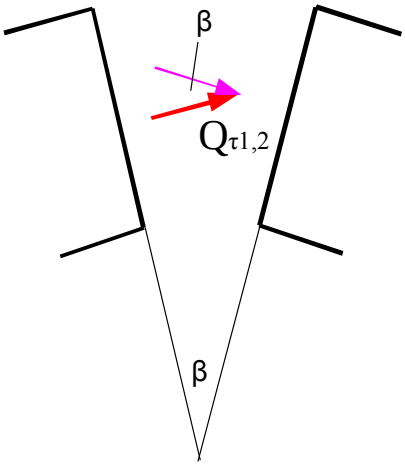
$$Q_{\tau_{1,2}} = S.c_{1,2}.\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \text{, kde}$$

$$\frac{1}{c_{1,2}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0} \quad \ldots \text{Kirch.z.} \qquad c_{1,2}\left[mm^{-2}.K^{-4}\right]$$

Sdělené teplo lze vyjádřit také pomocí pohltivosti

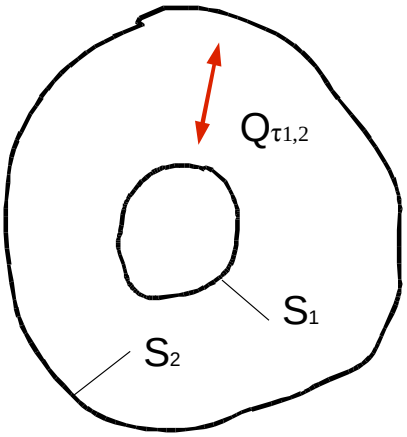
$$Q_{\tau 1,2} = \varepsilon_{1,2} c_0 S\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right], \text{ kde}$$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \ldots \text{složená pohltivost}$$



$$Q'_{\tau_{1,2}} = Q_{\tau_{1,2}}.\cos\beta$$

Výměna tepla sáláním mezi dvěma plochami



$$Q_{\tau 1,2} = c_{1,2}.S_1\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \text{ , kde}$$

$$\frac{1}{c_{1,2}} = \frac{1}{c_1} + \frac{S_1}{S_2}\left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}\right) \qquad c_O = 5{,}77 Wm^3K^{-4}$$

Sdělené teplo lze vyjádřit také pomocí pohltivosti

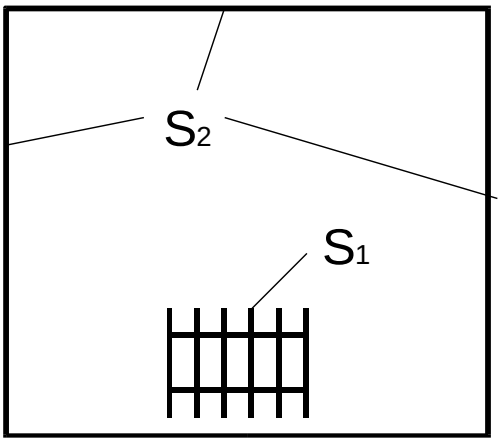
$$Q_{\tau 1,2} = \varepsilon_{1,2}.c_O.S_1\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \text{ , kde}$$

$\varepsilon_{1,2} = \frac{c_{1,2}}{c_0}$ … složená pohltivost

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \text{ , kde } \varepsilon_1 = \frac{c_1}{c_0} \text{ a } \varepsilon_2 = \frac{c_2}{c_0}$$

Pokud $S_2 \rangle\rangle S_1$

$$Q_\tau = c_1.S_1\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$



Za předpokladu

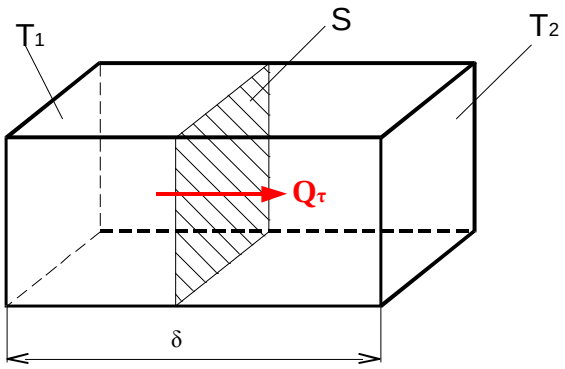
$S_2 \rangle\rangle S_1 \quad T_1 \rangle 3T_2$

$$Q_{\tau 1,2} = S_1.c_{1,2}\left(\frac{T_1}{100}\right)^4$$

$$\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 = 0 \Rightarrow c_{1,2} = c_1$$

3.Sdílení tepla vedením

- podstatou vedení tepla je šíření kinetické energie mikroskopického pohybu částic (atomů, molekul)
- předávání tepelné energie v nestejnoměrně ohřátém tuhém, kapalném nebo plynném tělese



Fourierův zákon

$$Q_\tau = S.\frac{\lambda}{\delta}.\Delta T[W]$$

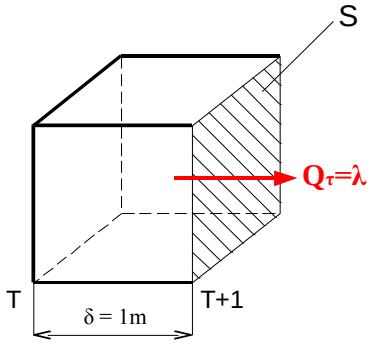
$Q_\tau[W]$ … tepelný tok

$S[m^2]$ …plocha

$\Delta T[K]$ … rozdíl teplot

$\lambda[Wm^{-1}K^{-1}]$ …součinitel tepelné vodivosti (závisí na materiálu, teplotě, vlhkosti apod.)

Tepelné izolátory – malá hodnota λ

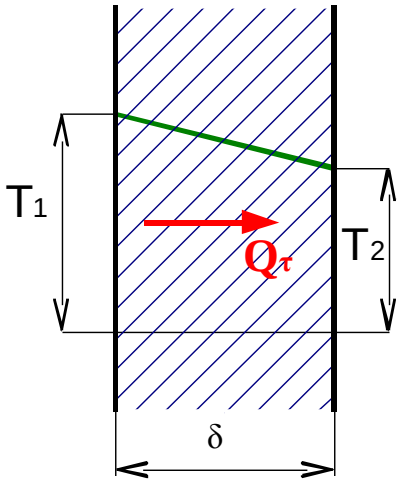


$\delta[m]$ … tloušťka stěny

$\Lambda = \frac{\lambda}{\delta}\ [Wm^{-2}K^{-1}]$ … tepelná propustnost stěny

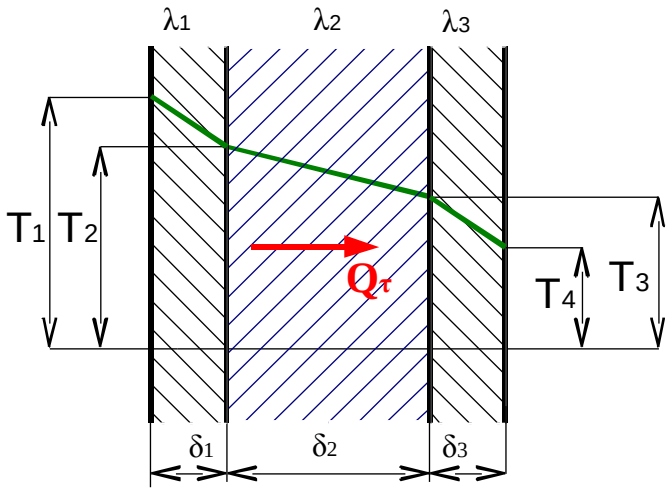
$R = \frac{\delta}{\lambda}\ [m^2KW^{-1}]$… tepelný odpor stěny

Průtok tepla jednoduchou stěnou



$$Q_\tau = S.\frac{\lambda}{\delta}.\Delta T[W]$$

Průtok tepla složenou rovinnou stěnou



$Q_{\tau 1} = Q_{\tau 2} = Q_{\tau 3} = Q_\tau$, kde

$$Q_{\tau 1} = S.\frac{\lambda_1}{\delta_1}(T_1 - T_2)$$

$$Q_{\tau 2} = S.\frac{\lambda_2}{\delta_2}(T_2 - T_3)$$

$$Q_{\tau 3} = S.\frac{\lambda_3}{\delta_3}(T_3 - T_4)$$

$$Q_{\tau 1} = Q_{\tau 2} = Q_{\tau 3} = Q_\tau$$

Po úpravě dostaneme výraz

$$Q_\tau = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}.S$$

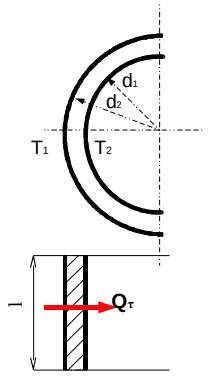
Pro stěnu složenou z *n* vrstev platí

$$Q_\tau = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}}.S$$

,kde $\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ celkový tepelný odpor složené stěny

Průtok tepla válcovou stěnou

(pro výpočet tepelných ztrát v potrubí)



$$Q_\tau = \frac{2\pi\lambda l}{\ln\frac{d_2}{d_1}}(T_1 - T_2)$$

$l[m]$ **délka potrubí**

Složená válcová stěna

$$Q_\tau = \frac{2\pi.l}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\lambda_i} \ln\frac{d_{i+1}}{d_i}}(T_1 - T_{n+1})$$

4. Sdílení tepla prouděním - konvekce

- jen u plynů, par a kapalin pohybem jejich částic;

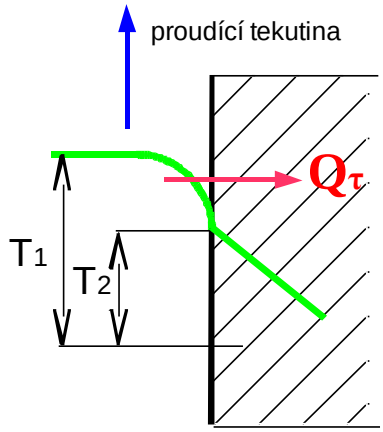
Při styku kapaliny nebo plynu s pevnou stěnou dochází mezi kapalinou (plynem) a pevnou stěnou ke sdílení tepla prouděním.

Dochází zde k ochlazování nebo ohřívání tenké vrstvy tekutiny při stěně; se vzniklým rozdílem hustot různě teplých vrstev tekutiny dochází k tzv.přirozenému proudění.

Konvekce nucená - výměnu tepla prouděním lze značně zvýšit nuceným oběhem tekutiny pomocí čerpadla (kapalina) nebo ventilátoru (plyn)

Konvekce přirozená – proudění tekutiny je vyvoláno vztlakovými silami, které jsou důsledkem nerovnoměrného teplotního pole

Sdílení tepla prouděním je vždy spojeno s šířením tepla vedením



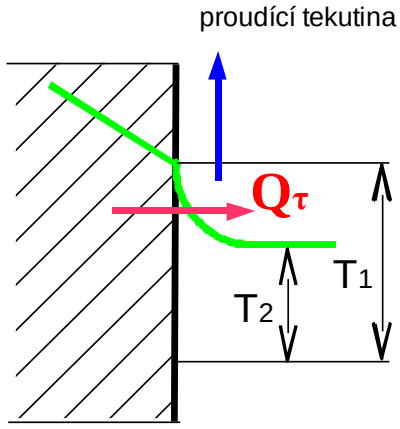
Množství tepla, které projde prouděním z tekutiny na těleso, resp. z tělesa na tekutinu

$$Q_\tau = S.\alpha.(T_1 - T_2)$$

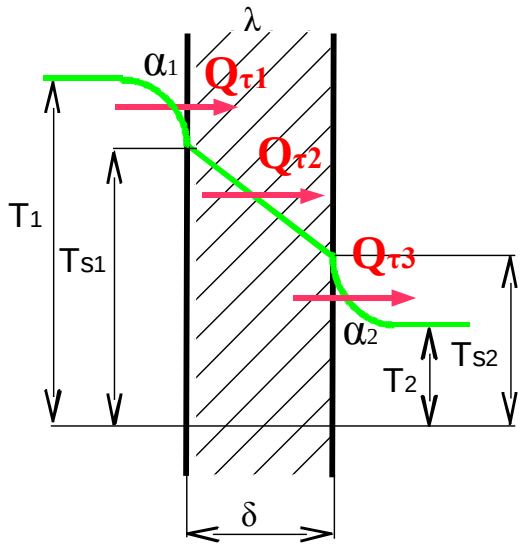
$Q_\tau [W]$ … tepelný tok

$S[m^2]$ … plocha stěny

$\alpha [Wm^{-2}K^{-1}]$ …součinitel přestupu tepla (závisí na druhu látky, rychlosti proudění, teplotě, hustotě, tvaru a rozměrech styčných ploch)



Prostup tepla rovinnou stěnou



Předpoklad: $Q_\tau = konst.$

$Q_{\tau 1} = \alpha_1 . S\left(T_1 - T_{s1}\right)$ … proudění (1)

$Q_{\tau 2} = \frac{\lambda}{\delta} . S\left(T_{s1} - T_{s2}\right)$ … vedení (2)

$Q_{\tau 3} = \alpha_2 . S\left(T_{s2} - T_2\right)$ … proudění (3)

$Q_{\tau 1} = Q_{\tau 2} = Q_{\tau 3} = Q_\tau = konst$

$$\frac{Q_\tau}{\alpha_1 . S} = \left(T_1 - T_{s1}\right) \text{ (1)}$$

$$\frac{Q_\tau}{\frac{\lambda}{\delta} . S} = \left(T_{s1} - T_{s2}\right) \text{ (2)}$$

$$\frac{Q_\tau}{\alpha_2 . S} = \left(T_{s2} - T_2\right) \text{ (3)}$$

sečtením

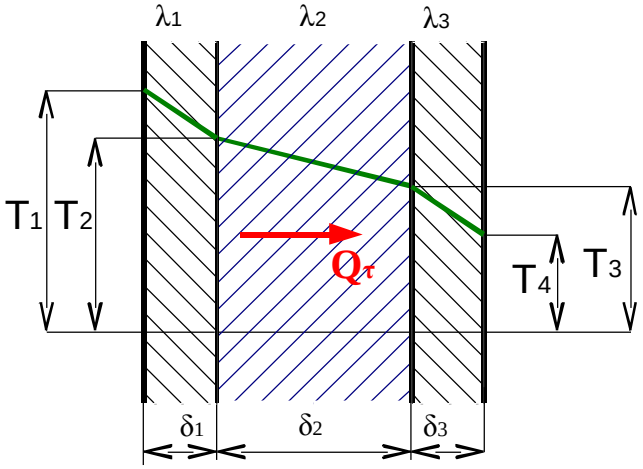
$$\frac{Q_\tau}{\alpha_1 . S} + \frac{Q_\tau}{\frac{\lambda}{\delta} . S} + \frac{Q_\tau}{\alpha_2 . S} = T_1 - T_2$$

$$\frac{Q_\tau}{S}\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right) = T_1 - T_2$$

$$Q_\tau = S . \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Prostup tepla složenou rovinnou stěnou

N – počet vrstev



$$Q_\tau = S.\frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$, kde

$$\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} = R$$ celkový tepelný odpor stěny

$$\frac{1}{R} = K\left[Wm^{-2}K^{-1}\right]$$ K – součinitel prostupu tepla

$$Q_\tau = k.S.\Delta t$$

Prostup tepla složenou válcovou stěnou

$$Q_\tau = \frac{\pi.l.(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1.d_1} + \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2\lambda_i}.\ln\frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2.d_{n+1}}}$$

, kde $l[m]$ … délka potrubí

$d_i[m]$ … vnitřní průměr stěny

$d_{i+1}[m]$ … vnější průměr stěny

Výpočet tepelných ztrát budov

- prostup tepla stěnou

$$Q_\tau = k.S.\Delta t$$

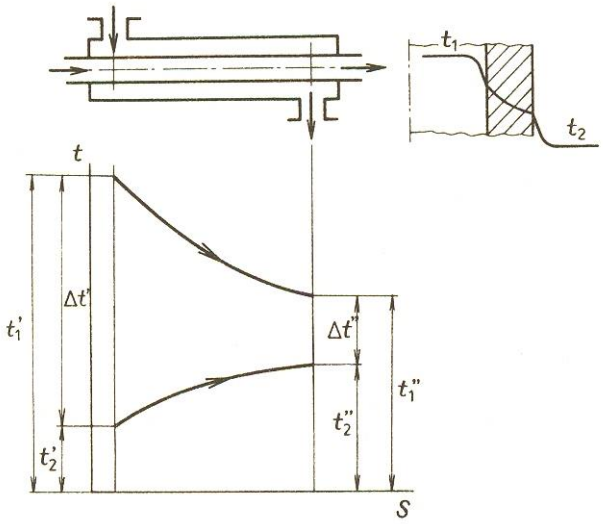
Metodika výpočtu stanovena ČSN

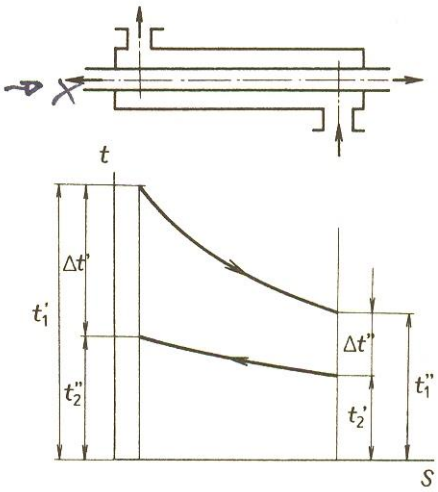
- součinitele prostupu tepla pro stěny, podlahy, okna, dveře (různé konstrukce, materiál)
- výpočtové korekce s ohledem na polohy místností, sílu větru apod.
- stanoveny teploty v místnostech podle činnosti, která se v nich vykonává
- výpočtové teploty venkovního vzduchu

5. Výměníky tepla

Výměník tepla je zařízení, jehož úkolem je sdělit teplo obsažené v teplejší tekutině, tekutině chladnější (výparníky, kondenzátory, chladiče, topná tělesa, parní kotle, motory)

Dvoutrubkový výměník – souproud, protiproud





$Q_\tau = k.S.\Delta t_s$

$K\left[Wm^{-2}K^{-1}\right]$ – součinitel prostupu tepla

$S\left[m^2\right]$ - teplosměnná plocha

Jsou-li hodnoty $\Delta t'$ a $\Delta t''$ málo rozdílné, počítá se s tzv.**středním aritmetickým teplotním spádem**

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t' + \Delta t''}{2}$$

Pro $\frac{\Delta t'}{\Delta t''} \rangle 2$ se počítá s tzv. **středním logaritmickým teplotním spádem**

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{2{,}3\log\frac{\Delta t'}{\Delta t''}}$$

Spotřebu chladicí nebo topné kapaliny počítáme ze vztahu

$m_1 c_{p1}.\Delta t_{m1} = m_2.c_{p2}.\Delta t_{m2}$, kde

m_1, m_2 …hmotnosti kapalin

$\Delta t_{m1}, \Delta t_{m2}$ … ochlazení nebo ohřátí kapalin m_1 a m_2

VLHKÝ VZDUCH

Atmosférický vzduch, který dýcháme (suchý vzduch) má složení:

plyn	značka	% objemu	% hmotnosti
dusík	N_2	78,03	75,55
kyslík	O_2	20,93	23,1
argon	Ar	0,94	1,3
kysličník uhličitý	CO_2	0,03	0,05
vodík	H_2	0,01	
neon	Ne	0,001 2	
hélium	He	0,000 5	
krypton	Kr	0,000 3	
xenon	Xe	0,000 04	

hustota	$\varrho = 1{,}292\,8\ \mathrm{kg\,.\,m^{-3}}$
plynová konstanta	$r = 0{,}287\,1\ \mathrm{kJ\,.\,kg^{-1}\,.\,K^{-1}}$
měrné teplo	$c_p = 1{,}003\,6\ \mathrm{kJ\,.\,kg^{-1}\,.\,K^{-1}}$
	$c_v = 0{,}715\,9\ \mathrm{kJ\,.\,kg^{-1}\,.\,K^{-1}}$

V technické praxi – ve vzduchu vodní páry- **vlhký vzduch**

Vlhký vzduch (v klimatizační technice, chladicí technice, při stlačování vzduchu v kompresorech)

Vlhký vzduch je směs plynů a vodní páry (přehřáté či syté), přičemž obě složky se nemohou v celém oboru tlaků a teplot směšovat v libovolném poměru. Pokud je teplota vzduchu při daném tlaku nižší, než odpovídající teplota syté vodní páry, je vzduch parami přesycen a voda se sráží ve formě mlhy (kondenzace vodních par); pokud je teplota nižší než sublimační, sráží se voda ve formě sněhu či ledu

Je-li vodní pára obsažená ve vzduchu párou sytou, mluvíme o **nasyceném vzduchu**

Daltonův zákon
Každý plyn ve směsi vyplňuje celý prostor a chová se v něm, jako by v tomto prostoru byl sám
Každý plyn se ve směsi řídí vlastní rovnicí stavu, ze které vyplývá tlak, teplota a objem

Tlak směsi plynů:
$p = \Sigma p_i$, kde
p_i …parciální tlak (tlak, jaký by měl plyn, kdyby byl v daných podmínkách v daném prostoru sám
Odtud tlak vlhkého vzduchu
$p = p_v + p_p$, kde
p_v parciální tlak suchého vzduchu
p_p parciální tlak přehřáté vodní páry
Poměr měrných plynových konstant obou složek

$$\frac{r_v}{r_p} = \frac{287 J.kg^{-1}K^{-1}}{464{,}5 J.kg^{-1}K^{-1}} = 0{,}622$$

Absolutní vlhkost ρ_p – hmotnost vodní páry obsažené v 1 m^3 vzduchu (= hustota vodní páry)

$\rho_p = \frac{m_p}{V}\left[kg.m^{-3}\right]$, kde
$m_p[kg]$ … hmotnost vodní páry
$V\left[m^3\right]$ … objem vlhkého vzduchu

ρ_p'' … hmotnost syté páry v 1 m^3 vzduchu (maximum páry ve vzduchu) – viz ST

$\rho_p = (0 \div 1)\rho_p''$ … závisí na teplotě vzduchu (hodnoty v parních tabulkách)

Páry obsažené ve vlhkém vzduchu mohou být přehřáté i syté – absolutní vlhkost toto nerozlišuje
Absolutní vlhkost roste s teplotou vzduchu

Relativní vlhkost $\varphi[1]$
Protože páry ve vzduchu mohou být podle teploty syté nebo přehřáté, zavádí se nový pojem – *relativní vlhkost*

$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_p''}$ … **udává, kolik % vlhkosti obsahuje vzduch z maximální vlhkosti, kterou je schopen za dané teploty přijmout** (míra nasycení vzduchu vodní párou)

$\varphi = 1$ … vzduch je parami nasycen – dosaženo **rosného bodu**

t_R **- teplota rosného bodu = teplota, na níž je nutno vlhký vzduch izobaricky ochladit, aby se stal nasyceným**

Měrná vlhkost (vodní obsah) vlhkého vzduchu $x[1]$

je množství vodních par obsažených ve vlhkém vzduchu vztažená na 1 kg suchého vzduchu (nemá nic společného se suchostí mokré páry!)

$$x = \frac{x_kg_páry}{1_kg_suchého_vzduchu} = \frac{\rho_p}{\rho_v}$$

$$x = \frac{m_p}{m_v} = \frac{r_v}{r_p}.\frac{p_p}{p_v} = 0{,}622.\frac{p_p}{p_v} = 0{,}622\frac{p_p}{p - p_p} = 0{,}622\frac{\varphi.p''_p}{p - \varphi.p''_p}$$

Nasycený vzduch - vodní obsah nabývá maximální hodnoty při φ = 1:

$$x_{\max} = x'' = 0{,}622\frac{p''_p}{p_v} = 0{,}622\frac{p''_p}{p - p''_p}$$

Hustota vlhkého vzduchu

$\rho = \rho_v + \rho_p$, kde

ρ_v … hustota suchého vzduchu

ρ_p … hustota vodních par

Z rovnic stavu pro suchý vzduch a vodní páru odvozen výraz pro výpočet hustoty vlhkého vzduchu

$\rho = \frac{1}{T}\left(0{,}003483p - 0{,}001316\varphi.p''_{pp}\right)$, nebo

$\rho = \frac{p(x+1)}{461{,}5T(x+0{,}622)}$, kde

$p[Pa]$ … tlak vlhkého vzduchu

$T[K]$ … teplota vlhkého vzduchu

$\varphi[1]$ … relativní vlhkost

$p''_p[Pa]$ …tlak sytých vodních par za dané teploty

$x[kg/kg]$ …měrná vlhkost

= vodní obsah vlhkého vzduchu

Termodynamické stavové veličiny vlhkého vzduchu

Měrný objem vlhkého vzduchu

$v = \frac{r_v}{1+x}.\frac{T}{p-\varphi.p''_p}$ **, kde**

$r_v\left[J.kg^{-1}.K^{-1}\right]$ … plynová konstanta suchého vzduchu

Měrné teplo vlhkého vzduchu

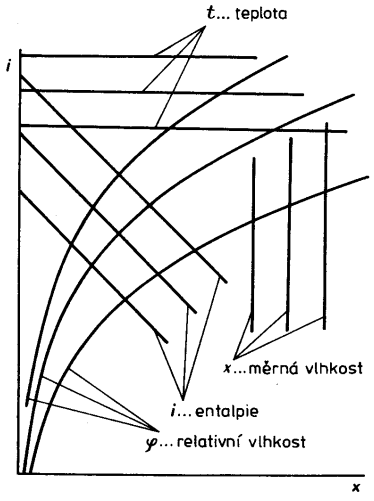
$c_{pvv} = \frac{1}{1+x}\left(c_{pv} + x.c_{pp}\right)$, kde

$c_{pv}\left[J.kg^{-1}.K^{-1}\right]$ …měrné teplo vzduchu za stálého tlaku

$c_{pp}\left[J.kg^{-1}.K^{-1}\right]$ … měrné teplo vodní páry za stálého tlaku

Entalpie vlhkého vzduchu

$i_{(1+x)} = 1{,}004t + x\left(2500 + 1{,}84t\right)$ - není měrnou entalpií (je vztažená na (1+x) kg směsi

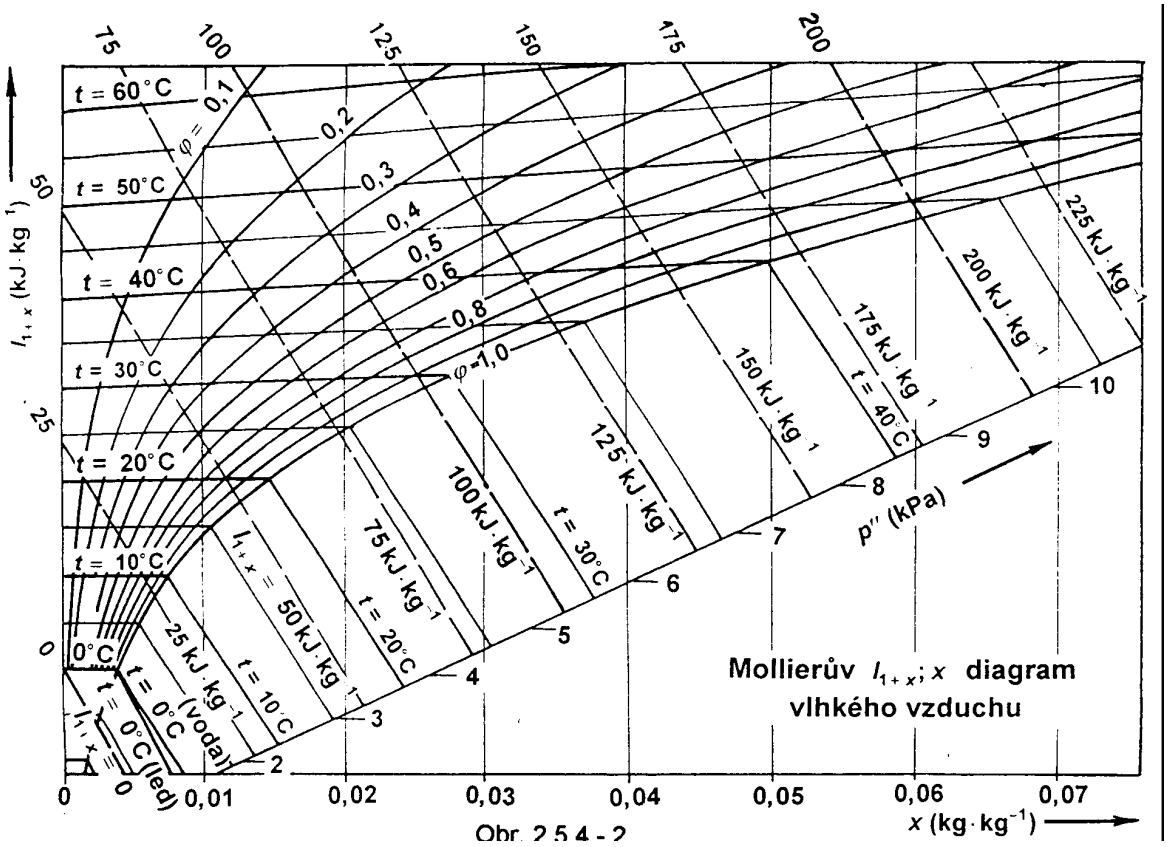


Mollierův diagram i – x vlhkého vzduchu

Platí pro tlak vzduch p=0,0981 MPa

stav vlhkého vzduchu určen
- tlakem
- teplotou
- relativní vlhkostí φ nebo měrnou vlhkostí *x*

K úplnému určení stavu vlhkého vzduchu musíme znát všechny tři parametry

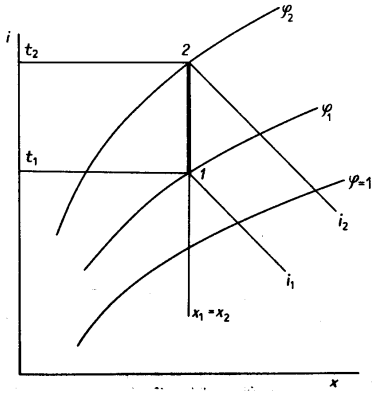


Obr. 2.5.4 - 2

Křivka sytosti φ = 1 dělí diagram na dvě části. Horní část platí pro vlhký nenasycený vzduch, dolní pro směs nasyceného vzduchu a vodní mlhy
Čáry stálých teplot jsou rovnoběžné šikmé přímky, které se lomí na křivce sytosti a jsou v dolní části diagramu téměř rovnoběžné s čarami i=konst.

Změny stavu vlhkého vzduchu

Nejčastější změny – ohřívání a ochlazování při konstantním obsahu par ve vzduchu a směšování vlhkého vzduchu (vše při p=konst)



Ohřívání a ochlazování x=konst.

Počáteční bod - je dán dvěma veličinami, které jsou vedeny v i-x diagramu (teplota, relat.vlhkost φ, entalpie i a měrná vlhkost x)

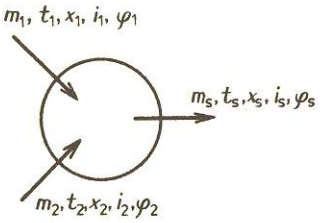
Konečný bod – dán jednou ze zmíněných čtyř veličin

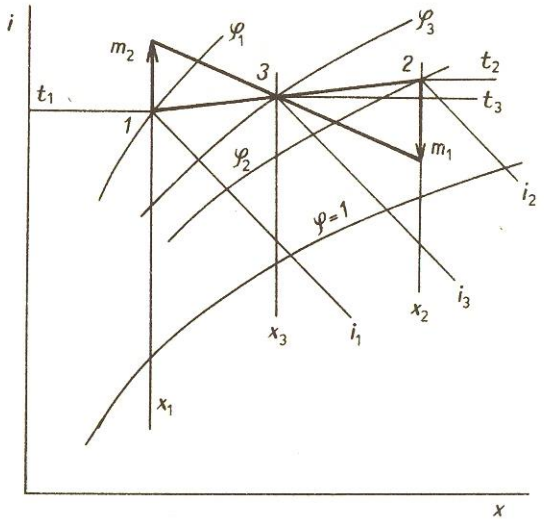
$q = i_2 - i_1$ … množství tepla, které je třeba přivést nebo odvést při ohřívání nebo ochlazování 1 kg vzduchu

$Q = m.q = m.\Delta i$

Mísení vlhkého vzduchu

Při mísení množství m_1 vlhkého vzduchu stavu t_1, x_1, i_1, φ_1 s množstvím m_2 vlhkého vzduchu stavu t_2, x_2, i_2, φ_2 vzniká množství m_s vlhkého vzduchu stavu t_s, x_s, i_s, φ_s





V diagramu i – x je výsledný stav dán pravidlem směšovací přímky, podle kterého výsledný stav leží v těžišti tíhových sil, odpovídajících hmotnostem vzdušin stavů 1 a 2 (obdoba hledání výslednice dvou sil pomocí momentové věty ve statice)

Pro směšování platí tyto rovnice:
$m_1 x_1 + m_2 x_2 = (m_1 + m_2).x_s$, kde

$m_1 + m_2 = m_s$ a $m_1 i_1 + m_2 i_2 = (m_1 + m_2).i_s$
ze kterých můžeme vypočítat

- vlhkost směsi

$$x_s = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$$

- entalpii směsi

$$i_s = \frac{m_1 i_1 + m_2 i_2}{m_1 + m_2}$$

Konečná teplota po smísení

$$t_s = \frac{t_1 m_1 + t_2 m_2}{m_1 + m_2}$$

SPALOVÁNÍ

1. Složení paliva

Spalování – **oxidace spalované látky** – paliva.
Palivo nebývá tvořeno jedinou chemicky čistou látkou, ale **směsí mnoha látek**. Jenom některé z nich pak přispívají k vlastnímu procesu spalování

U běžných paliv, se kterými se v praxi nejčastěji potkáváme, předpokládáme **přítomnost tří nejběžnějších prvků – vodíku H_2 (molekulová hmotnost 2), uhlíku C (12) a síry S (32).** jejich spalování lze popsat následujícími stechiometrickými rovnicemi:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$
$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$
$$2C + O_2 \rightarrow 2CO$$
$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

Pokud palivo tvoří chemickou sloučeninu, musíme sestavit stechiometrickou rovnici, např. pro spalování metanu:
$$4CH_3 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O$$

Palivo může obsahovat i určité množství vázaného nebo volného kyslíku O_2. Jeho přítomnost snižuje nutné množství kyslíku, které musíme při spalování dodávat.

Poslední složkou paliva jsou **látky, které se procesu spalování nezúčastní**. Této části říkáme **přítěž**. Z hlediska výpočtu je důležité znát její množství jednak pro dimenzování zařízení, jednak pro správné stanovení energetické bilance spalování, neboť určitá část tepla, které se při spalování uvolní, se spotřebuje na ohřev (popel, struska) či na změnu skupenství (voda – vodní pára) přítěže.

2. Spalné teplo a výhřevnost

Množství tepla, které získáme spálením určitého množství paliva odečteme z tabulek prostřednictvím **výhřevnosti q_n** nebo **spalného tepla q_v** technicky významných paliv. V obou případech jde o **množství tepla, které získáme dokonalým spálením 1 kg paliva v J.kg-1.**
V případě splaného tepla předpokládáme, že voda obsažené ve spalinách je ve skupenství kapalném. Údaj o výhřevnosti předpokládá ve spalinách přítomnost vodní páry, takže je menší o výparné teplo vody

Palivo	q_v	q_n
	$kJ \cdot kg^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1}$
Tuhá paliva		
uhlík C (prvek)	33 820	33 820
síra S (prvek)	9 253	9 253
hnědé uhlí	18 500 – 24 500	17 200 – 23 500
koks	30 800	30 600
dřevo	17 500	16 800
Kapalná paliva		
benzín	45 200	42 000
nafta motorová	44 700	41 800
ethylalkohol	29 726	26 792
Plynná paliva		
vodík H_2	141 974	119 616
oxid uhelnatý CO	10 132	10 132
zemní plyn	48 330	44 300

Spotřeba kyslíku a vzduchu

Pro dimenzování stroje musíme mít představu, jaké množství látky jím musí protékat, aby požadovaná chemická reakce mohla vůbec proběhnout. Z tohoto hlediska je nejpodstatnější množství potřebného kyslíku a od něj odvozená spotřeba vzduchu a množství protékající přítěže.

Upravme stechiometrickou rovnici tak, aby platila pro 1 kg paliva (pod jednotlivými chemickými značkami si představíme molekulové hmotnosti příslušných látek, které po vynásobením odpovídajícím stechiometrickým koeficientem představují přímo hmotnost dané látky. Pak celou rovnici vydělíme hmotností paliva)

Například:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

$$(2.2)kgH_2 + (1.32)kgO_2 \rightarrow (2.18)kgH_2O$$

$$H_2 + \frac{32}{4}O_2 \rightarrow \frac{36}{4}H_2O$$

Koeficient u O_2 má pak význam teoretického množství kyslíku $O_{2\,teor}$, které je minimálně nutné pro spálení 1 kg paliva.

V případě poslední rovnice vidíme, že pro spálení 1 kg vodíku musíme dodat 32/4 = 8 kg kyslíku.

Protože u většiny teplených motorů využíváme pro spalování vzdušný kyslík, je poměrně důležitou veličinou i **teoretické množství vzduchu V_{teor} ($kg.kg^{-1}$) které musíme dodat**. V tom případě předpokládáme, že vzduch obsahuje asi 23 hmotnostních % kyslíku.

Pokud z nějakých důvodů nedodáváme minimální teoretické množství kyslíku a je-li v palivu obsažen uhlík, probíhá nedokonalé spalování podle rovnice

$2C + O_2 \rightarrow 2CO$, jehož zplodiny obsahují oxid uhelnatý CO, který je jedovatý.

PŘÍLOHY

Fyzikální hodnoty vybraných látek

Fyzikální hodnoty technických plynů

Fyzikální hodnoty technických plynů

Plyn	Chemická značka	Molová hmotnost M (kg . kmol^{-1})	Plynová konstanta R (J . kg^{-1} . K^{-1})	Teplota		Měrná tepelná kapacita		Adiabatický exponent	Kritické hodnoty		
				varu t' (°C)	tání t (°C)	c_p (kJ . kg^{-1} . K^{-1})	c_v (kJ . kg^{-1} . K^{-1})	κ	teplota t_k (°C)	tlak p_k (MPa)	měrný objem v_k (m^3 . kg^{-1})
Acetylen	C_2H_2	26,036	319,6	−83,6	−81,8	1,529	1,323	1,23	35,90	0,634 5	4,330
Argon	Ar	39,944	208,49	−185,9	−189,3	0,532	0,316	1,67	−122,40	4,864 1	1,920
Benzen	C_6H_6	78,108	444,08	80,0	5,45	1,252	1,137	1,10	288,50	4,864 1	3,290
Čpavek	NH_3	17,032	488,27	−33,4	−77,7	2,056	1,555	1,32	132,40	11,297 3	4,255
Dusík	N_2	28,016	296,75	−195,8	−210,0	1,038	0,739	1,401	−147,10	3,393 1	3,218
Etan	C_2H_4	30,068	276,65	−89,0	−183,2	1,645	1,348	1,22	35,27	4,962 2	4,930
Etylen	C_2H_4	28,052	296,65	−103,7	−169,2	1,474	1,181	1,25	9,50	5,138 7	4,628
Helium	He	4,003	2 079 ,00	−268,9	−271,0	5,234	3,202	1,66	−267,90	0,229 5	14,500
Chlor	Cl_2	70,914	117,36	−34,1	−103,0	0,502	0,375	1,34	143,90	7,698 2	1,745
Chlorovodík	HCl	36,465	228,00	−86,0	−115,5	0,812	0,573	1,42	51,40	8,414 1	1,640
Kyslík	O_2	32,000	64,06	−183,0	−218,8	0,917	0,657	1,40	−118,20	5,040 6	2,325
Methan	CH_8	16,042	518,77	−161,4	−182,6	2,173	1,675	1,30	−82,90	4,643 4	6,176
Oxid uhelnatý	CO	28,010	297,04	−191,5	−205,1	1,043	0,743	1,401	−140,20	3,501 0	3,222
Oxid uhličitý	CO_2	44,010	188,97	−78,4	−56,6	0,821	0,628	1,31	31,04	7,404 0	2,143
Oxid siřičitý	SO_2	64,060	129,84	−10,0	−75,7	0,632	0,498	1,271	157,50	7,884 5	1,910
Propan	C_3H_8	44,094	183,78	−42,2	−187,1	1,507	1,31	1,15	96,81	4,256 1	4,420
Sirovodík	H_2S	34,080	241,24	−60,5	−85,5	1,105	0,85	1,30	100,4	9,017 2	–
Vodík	H_2	2,016	4 128,60	−252,8	−259,2	14,235	10,111	1,407	−239,9	1,294 0	32,27
Vzduch	$O_2 + N_2$	28,966	287,04	−192,2	−218,2	1,005	0,714	1,402	−140,7	3,765 7	3,227

Teplotní součinitelé roztažnosti

Teplotní součinitel délkové roztažnosti α_l vybraných tuhých látek

Rozměry v K^{-1}

Látka	α_l	Látka	α_l
Bronz	0,000 017 5	Bakelit	0,000 018
Cín	0,000 026 7	Beton	0,000 012
Cínová kompozice	0,000 022 0	Cihla	0,000 005
Dural	0,000 023 0	Čedič	0,000 010
Elektron	0,000 023 5	Diamant	0,000 001 3
Hliník	0,000 023 8	Grafit	0,000 008
Hořčík	0,000 026	Křemen	0,000 013 4
Chrom	0,000 008 4	Led při 0 °C	0,000 054
Invar	0,000 001 5	Mramor	0,000 008 5
Konstantan	0,000 015 2	Porcelán	0,000 003
Měď	0,000 017 0	Pryž tvrdá	0,000 077
Mosaz	0,000 018 4	Sklo obyčejné	0,000 008
Nikl	0,000 014 5	Sklo křemenné	0,000 000 6
Ocel chromová	0,000 011 0	Slída	0,000 013 5
Ocel niklová	0,000 018 0	Žula	0,000 008
Ocel uhlíková	0,000 012 0	Fenolplasty	0,000 03 až 0,000 05
Olovo	0,000 029 2	Polyamid	0,000 07 až 0,000 15
Platina	0,000 009 0	Polyethylen	0,000 09 až 0,000 33
Spékané kovy	0,000 011 0	Polypropylen	0,000 10 až 0,000 19
Stříbro	0,000 019 7	Polyvinylchlorid (PVC)	0,000 05 až 0,000 18
Wolfram	0,000 004	Teflon	0,000 10
Zinek	0,000 029 0	Umakryl	0,000 05 až 0,000 13
Zlato	0,000 014	Umaplex	0,000 065 až 0,000 07

Fyzikální hodnoty vybraných látek

Fyzikální hodnoty technických plynů

Plyn	Chemická značka	Molová hmotnost M (kg . kmol^{-1})	Plynová konstanta R (J . kg^{-1} . K^{-1})	Teplota		Měrná tepelná kapacita		Adiabatický exponent	Kritické hodnoty		
				varu t' (°C)	tání t (°C)	c_p (kJ . kg^{-1} . K^{-1})	c_v (kJ . kg^{-1} . K^{-1})	κ	teplota t_k (°C)	tlak p_k (MPa)	měrný objem v_k (m^3 . kg^{-1})
Acetylen	C_2H_2	26,036	319,6	−83,6	−81,8	1,529	1,323	1,23	35,90	0,634 5	4,330
Argon	Ar	39,944	208,49	−185,9	−189,3	0,532	0,316	1,67	−122,40	4,864 1	1,920
Benzen	C_6H_6	78,108	444,08	80,0	5,45	1,252	1,137	1,10	288,50	4,864 1	3,290
Čpavek	NH_3	17,032	488,27	−33,4	−77,7	2,056	1,555	1,32	132,40	11,297 3	4,255
Dusík	N_2	28,016	296,75	−195,8	−210,0	1,038	0,739	1,401	−147,10	3,393 1	3,218
Etan	C_2H_4	30,068	276,65	−89,0	−183,2	1,645	1,348	1,22	35,27	4,962 2	4,930
Etylen	C_2H_4	28,052	296,65	−103,7	−169,2	1,474	1,181	1,25	9,50	5,138 7	4,628
Helium	He	4,003	2 079 ,00	−268,9	−271,0	5,234	3,202	1,66	−267,90	0,229 5	14,500
Chlor	Cl_2	70,914	117,36	−34,1	−103,0	0,502	0,375	1,34	143,90	7,698 2	1,745
Chlorovodík	HCl	36,465	228,00	−86,0	−115,5	0,812	0,573	1,42	51,40	8,414 1	1,640
Kyslík	O_2	32,000	64,06	−183,0	−218,8	0,917	0,657	1,40	−118,20	5,040 6	2,325
Methan	CH_8	16,042	518,77	−161,4	−182,6	2,173	1,675	1,30	−82,90	4,643 4	6,176
Oxid uhelnatý	CO	28,010	297,04	−191,5	−205,1	1,043	0,743	1,401	−140,20	3,501 0	3,222
Oxid uhličitý	CO_2	44,010	188,97	−78,4	−56,6	0,821	0,628	1,31	31,04	7,404 0	2,143
Oxid siřičitý	SO_2	64,060	129,84	−10,0	−75,7	0,632	0,498	1,271	157,50	7,884 5	1,910
Propan	C_3H_8	44,094	183,78	−42,2	−187,1	1,507	1,31	1,15	96,81	4,256 1	4,420
Sirovodík	H_2S	34,080	241,24	−60,5	−85,5	1,105	0,85	1,30	100,4	9,017 2	–
Vodík	H_2	2,016	4 128,60	−252,8	−259,2	14,235	10,111	1,407	−239,9	1,294 0	32,27
Vzduch	$O_2 + N_2$	28,966	287,04	−192,2	−218,2	1,005	0,714	1,402	−140,7	3,765 7	3,227

Teplotní součinitelé roztažnosti

Teplotní součinitelé roztažnosti

Teplotní součinitel délkové roztažnosti α_l vybraných tuhých látek

Rozměry v K^{-1}

Látka	α_l	Látka	α_l
Bronz	0,000 017 5	Bakelit	0,000 018
Cín	0,000 026 7	Beton	0,000 012
Cínová kompozice	0,000 022 0	Cihla	0,000 005
Dural	0,000 023 0	Čedič	0,000 010
Elektron	0,000 023 5	Diamant	0,000 001 3
Hliník	0,000 023 8	Grafit	0,000 008
Hořčík	0,000 026	Křemen	0,000 013 4
Chrom	0,000 008 4	Led při 0 °C	0,000 054
Invar	0,000 001 5	Mramor	0,000 008 5
Konstantan	0,000 015 2	Porcelán	0,000 003
Měď	0,000 017 0	Pryž tvrdá	0,000 077
Mosaz	0,000 018 4	Sklo obyčejné	0,000 008
Nikl	0,000 014 5	Sklo křemenné	0,000 000 6
Ocel chromová	0,000 011 0	Slída	0,000 013 5
Ocel niklová	0,000 018 0	Žula	0,000 008
Ocel uhlíková	0,000 012 0	Fenolplasty	0,000 03 až 0,000 05
Olovo	0,000 029 2	Polyamid	0,000 07 až 0,000 15
Platina	0,000 009 0	Polyethylen	0,000 09 až 0,000 33
Spékané kovy	0,000 011 0	Polypropylen	0,000 10 až 0,000 19
Stříbro	0,000 019 7	Polyvinylchlorid (PVC)	0,000 05 až 0,000 18
Wolfram	0,000 004	Teflon	0,000 10
Zinek	0,000 029 0	Umakryl	0,000 05 až 0,000 13
Zlato	0,000 014	Umaplex	0,000 065 až 0,000 07

Sálavost C a poměrná pohltivost A_p vybraných materiálů

Materiál	C (W . m^{-2} . K^{-4})	A_p	Materiál	C (W . m^{-2} . K^{-4})	A_p
Ideální černé těleso	5,77	1,00	Nikl leštěný	0,46	0,08
Azbestová lepenka	5,54	0,96	Nikl oxidovaný	2,48	0,43
Cihly pálené	5,36	0,93	Ocel, odlitky leštěné	3,12	0,55
Cihly šamotové	4,30	0,75	Ocel oxidovaná	4,62	0,80
Cihly magnesitové	2,24	0,39	Olejové nátěry	4,5 až 5,5	0,78 až 0,96
Dub ohoblovaný	5,2	0,90	Omítka vápenná	5,25	0,91
Hliník leštěný	0,30	0,05	Papír	5,00	0,87
Hliník oxidovaný	1,14 až 1,71	0,2 až 0,3	Pryž měkká	4,95	0,86
Chromnikl	4,05	0,70	Pryž tvrdá leštěná	5,45	0,95
Lak bílý smaltovaný	5,23	0,91	Sádra	3,20	0,90
Lak černý lesklý	4,75	0,82	Sklo hladké	5,41	0,94
Lak černý matový	5,60	0,97	Stříbro leštěné	0,15	0,22
Litina oxidovaná	5,40	0,93	Šamot	3,28	0,59
Měď leštěná	0,29	0,05	Voda, led	5,23	0,91
Měď oxidovaná	4,50	0,78	Zinek oxidovaný	1,44	0,25

Vlastnosti stavebních a izolačních hmot

Látka	Hustota ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	Tepelná vodivost λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Měrná tepelná kapacita c ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
Asfalt	2 100	0,6	0,92
Celuloid	1 400	0,22	
Dřevovláknité desky	300 až 500	0,051 až 0,064	
Heraklit	400	0,17	1,67
Korkové desky	150	0,042	2,09
Kotelní kámen	1 000 až 2 500	0,15 až 2,3	0,88
Křemelina	400	0,073	0,84
Led	917	2,3	2,1
Lepenka krycí	1 100	0,9	1,34
Papír	700 až 1 000	0,03 až 0,12	1,3
Písek suchý	1 750	0,65	0,8
Porcelán	2 200 až 2 500	0,81 až 1,86	0,8
Polyvinylchlorid (PVC)	1 350	0,16 až 0,22	0,96
Reaktoplasty	1 270	0,23	1,59
Sklo obyčejné	2 450	0,59 až 1,05	0,77
Sklo organické	1 200	0,19	1,47
Slída	2 600 až 3 200	0,46 až 0,58	0,84
Škvára	750	0,32	0,84
Vata čedičová, skleněná a strusková	100	0,046	0,74
Výplňové materiály:			
polystyrenové desky	36	0,041	
pěnové sklo	180	0,058	
suchá půda	1 650	0,14	0,94
vlhká půda	1 750	0,65	2,0
Zdivo:			
beton dusaný	2 200	1,28	0,88
beton pěnový	800	0,31	0,8
beton škvárový	1 600	0,84	0,96
cihly duté	1 100	0,56	
cihly pálené	1 800	0,87	0,92
omítka vápenná	1 600	0,87	0,84

Součinitel přestupu tepla $h(\alpha)$

Přestup tepla při ohřívání a ochlazování	$h(\alpha)$ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
vzduchu	1 až 60
přehřáté páry	10 až 100
klidné vody	60 až 1 700
klidné vody proudicí vodou	200 až 12 000
klidné vody vroucí vodou	1 000 až 23 000
klidné vody při blánové kondenzaci vodní páry	5 000 až 14 000
klidné vody při kapkové kondenzaci vodní páry	47 000 až 140 000

Součinitel prostupu tepla K_p z prostředí 1 do prostředí 2

Prostředí 1	Dělicí stěna	Prostředí 2	K_p (W . m^{-2} . K^{-1})
Pára	Litina	Voda	930
Pára	Měď	Voda	1 200
Pára	Ocel	Voda	1 000
Pára	Litina	Vzduch	12
Pára	Měď	Vzduch	20
Pára	Ocel	Vzduch	17
Vzduch	Litina	Vzduch	6
Vzduch	Měď	Vzduch	10
Vzduch	Ocel	Vzduch	8
Voda	Litina	Voda	290
Voda	Měď	Voda	360
Voda	Ocel	Voda	320
Voda	Litina	Vzduch	12
Voda	Měď	Vzduch	17
Voda	Ocel	Vzduch	15