

Termodynamické údaje látek

K výpočetům práce a tepelných toků ve stroji je nezbytné mít k dispozici termodynamické údaje jako h - s nebo T - s digramy příslušné pracovní tekutiny. Tyto údaje slouží k odečtu stavu pracovní látky pro zadané parametry.

Nejčastějšími pracovními tekutinami jsou voda H_2O a vzduch. Zatímco H_2O je čistá jednosložková látka, tak vzduch je směsí plynů, ve které se mohou lokálně měnit poměry jednotlivých složek, a to zejména obsah vodní páry. Termodynamické údaje pro vícesložkové látky známého složení lze zjistit z termodynamických dat jednotlivých složek a jejich jednotlivé zastoupení ve vzorku.

Jednosložkové látky

Kalorimetr

H_2O

Termodynamické údaje jednosložkových látek lze získat z měření v kalorimetru a přepočtem na požadovanou veličinu – nejčastěji tepelnou kapacitu 1 kg látky a entalpii (u tekutin), viz Tabulka 310. Pokud se jedná o vodu, jsou k dispozici volně dostupné údaje v širokém rozsahu jejích stavů. Tyto údaje spravuje nezisková organizace IAPWS (The International Association for the Properties of Water and Steam), která podporuje výzkum, zpracování a zveřejňování vlastností vody. Tyto údaje se využívají v tabulkách termodynamických vlastností vody např. [Mareš et. al., 1999], [Šifner et al., 1996].

310: Tepelná kapacita a entalpie 1 kg vody při tlaku 101 325 Pa

t	C_p	h	t	C_p	h	t	C_p	h
-20	1,947	-	60	4,1828	251,22	300	2,0122	3074,5
0	2,04-4,22	0	80	4,1955	334,99	400	2,0698	3278,5
20	4,1848	84,013	100	4,22-2,08	419,1-2675,6	500	2,1346	3488,7
40	4,1786	167,62	200	1,97618	2875,4	600	2.2032	3705,6

t [$^{\circ}C$]; C_p [$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]; h [$kJ \cdot kg^{-1}$]. [Ražnjević, 1984], [IAPWS, 1997].

Pevné skupenství

Kapalné skupenství

Plynné skupenství

Tepelná kapacita

Reálný plyn

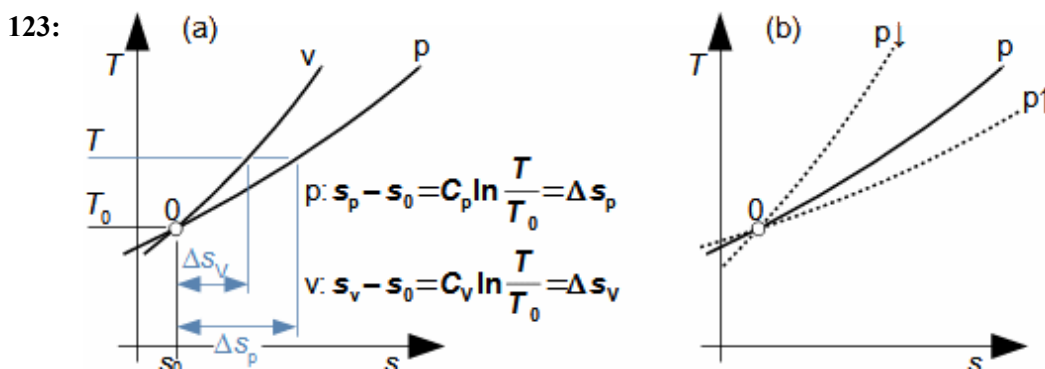
Ideální plyn

Izobara

Izochora

U jednosložkových látek se hodnota tepelné kapacity 1 kg vzorku v pevném skupenství s okolním prostředím při běžných tlacích a teplotách nemění, u kapalného velmi málo (viz Tabulka 310). Jiná situace je u plynného skupenství, kde lze sledovat výrazné změny v hodnotách tepelných kapacit reálných plynů s tlakem a teplotou, přičemž v případě ideálního plynu k žádným takovým změnám nedochází. Rozdíl je dobře patrný na tvarech izobar a izochor v T - s diagramech ideálních a reálných plynů, viz Obrázek 123. Izobary a izochory ideálních plynů jsou logaritmické křivky, kdežto izobary a izochory reálných plynů už nikoliv, respektive jsou funkcí teploty $C_p=f(T)$,

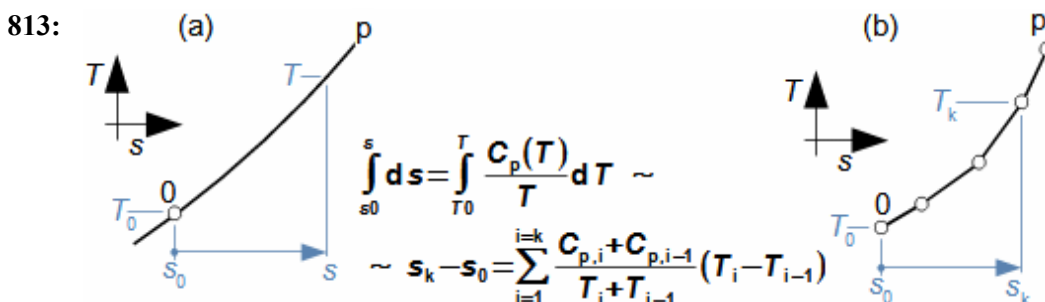
navíc izochory jsou funkcí hustoty, izobary tlaku. Znamená to, že plyn s rostoucím C_p s teplotou zvyšuje spotřebu tepla na ohřev plynu nebo pro případ chlazení zvyšuje množství odvedeného tepla, u plynu s klesajícím C_p s teplotou je to obráceně. Stejně důsledky platí i pro izochory reálného plynu při změnách měrné tepelné kapacity při stálém objemu C_v s teplotou.



(a) rovnice izochory a isobary ideálního plynu; (b) srovnání tvaru izobar, jestliže se tepelná kapacita plynu mění při změně teploty. v-izochora pro $C_v = \text{konst.}$; p-izochora pro $C_p = \text{konst.}$; p↓-izobara v případě, že C_p s teplotou klesá; p↑ izobara pro případ, že C_p s teplotou roste; 0-výchozí stav. C_v, C_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] tepelná kapacita při stálém objemu, respektive tlaku vztahena na 1 kg plynu (měrná tepelná kapacita); s [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] měrná entropie; T [K] absolutní teplota. Index **p** označuje bod na izobaře a index **v** na izochore. Rovnice ideálních plynů jsou odvozeny v [Příloze 123](#).

T-s diagram
 Reálný plyn
 Izobara
 Izochora

Izobaru reálného plynu v T - s diagramu lze zkonstruovat například pomocí tabulkových hodnot C_p pro konkrétní tlak z definice entropie podle [Rovnice 813](#), případně lze sestavit rovnici polynomu vyšetřované izobary (pro vodní páru jsou přílušné polynomy uvedeny například v [Šifner et al., 1996]). Záměnou C_p za C_v lze stejným postupem zkonstruovat i izochoru reálného plynu.



(a) konstrukce jakéhokoliv bodu izobary konkrétního tlaku pomocí funkce $C_p = f(T)$; (b) konstrukce izobary pomocí tabulkových hodnot t, C_p a diferenciální rovnice získané z předchozí diferenciální funkce. Odvození rovnic je uvedeno v [Příloze 813](#).

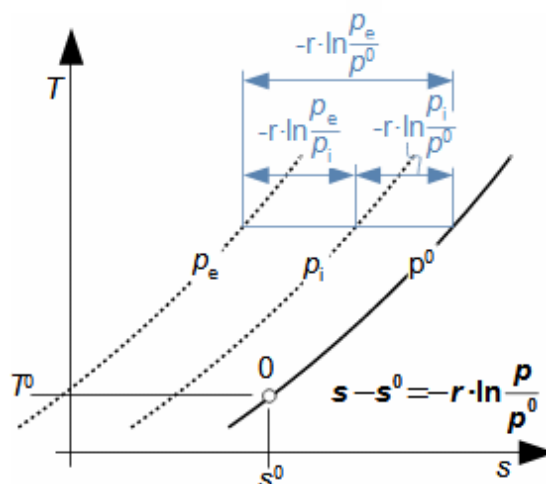
Pro konstrukci T - s diagramu, který má pokrýt stavy reálného plynu v požadovaném rozsahu teplot, tlaků a měrných objemů je tedy nutné přiměřené množství měření pro vybrané stavy.

Nejdetalnější měření je dostupné u vody, u jiných látek je provedeno měření mnohem řidší, respektive pouze pro vybrané teploty, tlaky a měrné objemy. Chceme-li v takovém případě získat podrobnější T - s diagram, tak lze použít metodu porovnávací izobary.

Porovnávací izobara

Metodou porovnávací izobary lze zkonstruovat jakoukoliv izobaru v T - s diagramu za předpokladu, že v oblasti teplot a tlaků, ve které tyto konstrukce provádíme je závislost tepelné kapacity C_p na tlaku nevýznamná, respektive je funkcí zejména teploty $C_p=f(T)$. To znamená, že pro konstrukci průběhu děje v T - s diagramu mezi dvěma izobarami stačí znát pouze tvar jedné referenční neboli porovnávací izobary a tu posouvat v diagramu T - s ve vodorovném směru pro získání potřebných izobar. Posunutí mezi jakoukoliv izobarou a porovnávací izobarou odpovídá rozdílu entropie při izotermickém ději mezi těmito tlaky, viz Obrázek 124 – obrázek znázorňuje posunutí dvou izobar p_i a p_e vůči porovnávací izobare p^0 přičemž $p_e < p_i < p^0$.

124:



p^0 -porovnávací izobara – jedná se o referenční křivku v T - s diagramu pro určitý (porovnávací) tlak; 0-referenční stav na porovnávací izobare (indexem 0 jsou označeny stavy na porovnávací izobare). r [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] individuální plynová konstanta plynu. Odvození rovnice pro rozdíl entropie na izotermě je uvedeno v Příloze 124.

Všimněte si, že z rovnic posunutí je patrné, že Δs na jakékoliv izobare pro stejný rozdíl teplot je stejné, protože rovnice nejsou funkcí tlaku.

Porovnávací izobara

Metodu porovnávací izobary lze použít u většiny reálných plynů v rozsahu jednotek megapascalů a stovek stupňů celsia. V technické praxi se běžně pracuje z parametry porovnávací izobary při atmosférickém tlaku, přičemž v tabulkách jsou obvykle uvedeny i hodnoty entropií a entalpií pro snadnější konstrukci, viz Tabulka 1151.

h - s diagram

Konstrukce h - s diagramu plynu je stejná pouze se osa teploty přepočítá na hodnoty entalpie podle Rovnice 858, kterou lze odvodit z definice entalpie a Rovnice 813. To znamená, že tvar izobar a osa entropií je stejná a pro vzájemný posun izobar platí Rovnice 124, viz také Úloha 704.

858:
$$h_k - h_0 = \int_0^k T \cdot ds \sim h(T_k) = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{T_i + T_{i-1}}{2} (s_i - s_{i-1})$$

Vícesložkové látky
Směsi plynů

Termodynamické údaje vícesložkových látek lze určit pomocí termodynamických dat pro jednotlivé složky a jejich podílu ve vyšetřovaném množství. Například tepelná kapacita 1 kg směsi plynů je rovna součtu tepelných kapacit jednotlivých složek plynu, což lze vyjádřit Rovnicí 814. Z těchto dat pak lze zkonstruovat i *T-s* a *h-s* diagramy jako u jednosložkových plynů, viz Úloha 704. Termodynamické údaje vícesložkových látek lze samozřejmě získat i měřením na konkrétním vzorku a pro konkrétní složení.

814:
$$C = \sum_{i=1}^k \omega_i \cdot C_i; \quad \omega_i = \frac{m_i}{m}$$
 C_i [J·kg⁻¹·K⁻¹] tepelná kapacita jednotlivé složky; m [kg] hmotnost celého vzorku; m_i [kg] hmotnost jednotlivé složky ve vzorku; ω_i [1] hmotnostní podíl jednotlivé složky ve vzorku; k [-] počet složek.

Vzduch

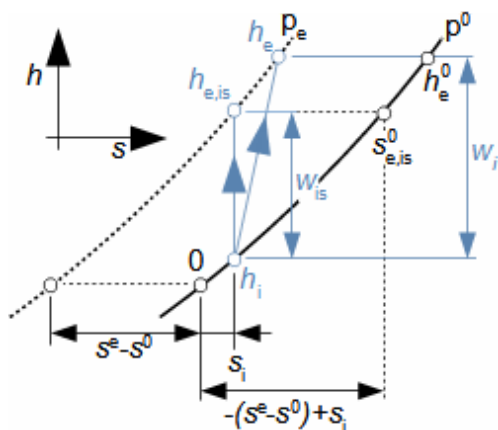
Termodynamické údaje suchého vzduchu jsou volně dostupná podobně jako H₂O, přesněji jednotlivých plynů a vodní páry ve vzduchu obsažených, viz také Tabulka 1151.

1151: Vybrané termodynamické údaje suchého vzduchu při tlaku 101 325 Pa

t	c _v	c _p	h	s	t	c _v	c _p	h	s
0	0,7164	1,0036	0	0	500	0,8051	1,0923	519,58	1,0718
20		1,004			600	0,8281	1,1149	629,7	1,2058
40		1,009			700	0,8487	1,1355	742,32	1,3281
60		1,009			800	0,8671	1,1539	856,62	1,4398
80		1,009			900	0,8834	1,1702	973,43	1,5437
100	0,7231	1,0103	100,61	0,3127	1000	0,8976	1,1844	1090,7	1,6400
200	0,7373	1,0245	202,31	0,5543	1100	0,9102	1,1970	1210,0	1,7300
300	0,7578	1,0446	305,72	0,7524	1200	0,9211	1,2083	1329,7	1,8146
400	0,7813	1,0685	411,31	0,9224	1300	0,9311	1,2179	1451,6	1,8933

C [kJ·kg⁻¹·K⁻¹]; h [kJ·kg⁻¹]; s [kJ·kg⁻¹·K⁻¹]; t [°C]. [Ražnjević, 1984], [Kalčík at al., 1973].

Úloha 704: Turbokompresor stlačuje adiabaticky suchý vzduch o atmosférickém tlaku a teplotě 14,35 °C s kompresním poměrem 23. Stanovte teplotu vzduchu na konci komprese a vnitřní práci turbokompresoru pro 1 kg plynu. Izoentropická účinnost komprese je 0,85. Neuvažujte významný vliv rozdílu kinetické energie vzduchu mezi vstupem a výstupem turbokompresoru. Řešení úlohy je uvedeno v Příloze 704.



1. zadání: $p_i; t_i; \varepsilon; \eta_{is}$	3. výpočet: $s^e - s^0; s_{e, is}^0$	5. výpočet: $w_{is}; w_j; h_e$
2. odečet: $h_i; s_i$	4. odečet: $h_{e, is}; t_{e, is}$	6. odečet: t_c

Legenda k obrázku a postupu řešení Úlohy 704: w_{is} [$J \cdot kg^{-1}$] vnitřní práce komprese; w_j [$J \cdot kg^{-1}$] vnitřní práce komprese při izoentropickém ději.