

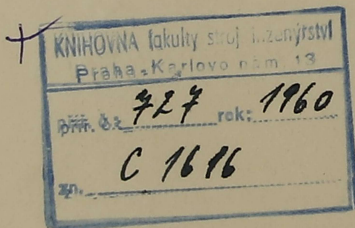


ČVUT Praha
Fakulta strojní



3101035324

NENIČ MĚ



MAJETEK
ÚSTŘEDNÍ KNIHOVNY ČVUT

© Josef Kalčík 1960

Předmluva

Spis o technické termodynamice, který předkládám technické veřejnosti, vznikl z mých přednášek, které jsem konal v letech 1951—1954 na Slovenské vysoké škole technické v Bratislavě a od r. 1954 na Českém vysokém učení technickém v Praze.

Kniha je určena studujícím fakult strojního inženýrství a posluchačům večerního a dálkového studia pracujících, dále pracovníkům našeho průmyslu a výzkumu. Náplň knihy co do rozsahu i zaměření podstatně přesahuje rozsah pouhé učebnice. Látku jsem však zpracoval a rozdělil do ucelených odstavců, takže některé části mohou být vynechány, aniž se tím naruší srozumitelnost části následujících.

Rozsah látky jsem zvolil tak, že zahrnuje obvyklé části klasické termodynamiky (fenomenologické) a současně podává fyzikální výklad tepelných jevů molekulární teorii hmoty. Pozornost jsem věnoval zejména druhému zákonu termodynamiky, vlastnostem reálných plynů a rovnicím stavu plynů a par. Šířeji než je v termodynamikách obvyklé se věnuji termodynamice jednorozměrného proudění vzdušín. V části o porovnávacích cyklech jsem sledoval současně cíl seznámit studenty s principy tepelných strojů a jejich charakteristickými vlastnostmi.

Ke knize jsou připojeny tabulky termodynamických veličin látek, které umožní čtenáři praktické provádění tepelných výpočtů. Z těchto tabulek jsou zejména významné termodynamické tabulky vody a vodní páry, které podle vlastní rovnice zpracoval člen korespondent ČSAV ing. dr. Jan Jůza. Tyto tabulky jsou v této knize uveřejněny poprvé. Z tabulkových hodnot byl sestaven i—s diagram vodní páry, který je rovněž připojen.

V závěru této předmluvy děkuji všem, kteří radou či skutkem přispěli k vydání mé práce.

Za pečlivou recenzi a podnětné připomínky děkuji prof. ing. Vladimíru Chlumskému a doc. ing. dr. Františku Bauerovi z Českého vysokého učení technického v Praze.

Členu korespondentu ČSAV ing. dr. Janu Jůzovi děkuji za obohacení knihy nejnovějšími tabulkami vody a vodní páry.

Napsání této knihy bylo umožněno především tím, že jsem byl povolán k přednáškám technické termodynamiky Slovenskou vysokou školou technickou v Bratislavě a Českým vysokým učení technickým v Praze. Oběma vysokým školám vyslovuji touto cestou svoji úctu i vděčnost.

V Praze v listopadu 1959.

JOSEF KALČÍK

OBSAH

Předmluva	5
Volba soustavy fyzikálních jednotek	15
Přehled fyzikálních veličin	17

I. TERMODYNAMIKA PLYNŮ

Základní pojmy

1. Teplota	21
2. Tlak	22
3. Měrný objem, váha, hmota	23
4. Měrné teplo	24
5. Teplo a teplota	24
6. Míra množství tepla, kalorie	26
7. Střední měrné teplo	29
8. Vývoj teorie tepla	29

První zákon termodynamiky

9. Formulace I. zákona termodynamiky	30
10. Tepelný ekvivalent mechanické energie	31
11. Stanovení tepelného ekvivalentu mechanické energie	31
12. Tepelný stav	32
13. Vnitřní energie	33
14. Matematická formulace I. zákona termodynamiky	34
15. Vnější absolutní práce	36
16. Množství tepla v látce	37
17. Teplo a energie	39
18. Homogenní těleso (látka)	39
19. Rovnice stavu	39

20. Isobarický součinitel tepelné roztažnosti	42
21. Isotermický součinitel objemové stlačitelnosti	45
22. Isochorický součinitel tlakové rozpínarosti	46

IDEÁLNÍ PLYNY

Základní zákony ideálních plynů

23. Definice ideálních plynů	48
24. Zákon Boyleův-Mariotteův	49
25. Zákon Charlesův-Gay Lussacův. Absolutní nulová teplota	49
26. Rovnice stavu ideálních plynů	51
27. Plynová konstanta	53
28. Universální plynová konstanta. Definice kilogrammolekuly	54
29. Parciální derivace stavových veličin ideálních plynů	55
30. Normální kubický metr Nm ³	56
31. Měrná tepla ideálních plynů c_p a c_v	57
32. Molové měrné teplo	59
33. Vnitřní (tepelná) energie ideálních plynů	60
34. Entalpie	61
35. I. zákon termodynamiky a entalpie. Technická práce plynu	64
36. Vztah mezi absolutní a technickou prací plynu	66

Vratné změny stavu ideálních plynů

37. Vratnost termodynamických dějů	68
38. Změny stavu	69
39. Změna při konstantním objemu — isochorická	70
40. Změna při konstantním tlaku — isobarická	72
41. Změna při konstantní teplotě — isothermická	74
42. Změna stavu bez výměny tepla s okolím — adiabatická	76
43. Změna polytropická	82
44. Stanovení polytropického exponentu z indikátorového diagramu	86
45. Přehled vratných změn stavu	88

Druhý zákon termodynamiky

46. Kruhový proces — cyklus	90
47. Carnotův cyklus	92
48. Druhý zákon termodynamiky	94

49. Carnotův cyklus s libovolnou pracovní látkou	96
50. Účinnost nevratného Carnotova cyklu	97
51. Neisolované a izolované systémy	98
52. Vratné a nevratné děje	99
53. Degradace tepla, pravděpodobnost stavu a stupeň nevratnosti	100
54. Entropie	102
55. Matematická formulace II. zákona termodynamiky	102
56. Entropie látky (neisolovaného tělesa)	105
57. Entropie pevných a kapalných látek	106
58. Entropie ideálního plynu	107
59. Entropický $T-s$ diagram	109
60. Vratné změny ideálních plynů v $T-s$ diagramu	110
61. Pracovní a tepelné plochy v $T-s$ diagramu	116
62. Tepelné a pracovní plochy v $p-v$ diagramu	116
63. Entalpie v $p-v$ a $T-s$ diagramu	118
64. Konstrukce $T-s$ diagramu	119
65. Srovnání tlakového a entropického diagramu	121
66. Carnotův cyklus v $T-s$ diagramu	124
67. Obrácený Carnotův cyklus. Tepelná čerpadla	124
68. Zvýšení účinnosti Carnotova cyklu normálního a obráceného	125

Druhý zákon termodynamiky a nevratné děje

69. Typické nevratné děje	127
70. Tření	127
71. Sdílení tepla	127
72. Škreení ideálního plynu	129
73. Difuze plynů	131
74. Entropie pracovní látky při nevratné změně	134
75. Entropie izolovaného systému	136
76. Vzrůst entropie škreemím	138
77. Tepelná smrt vesmíru	139
78. Absolutní termodynamická stupnice teplot	139
79. Nernstova věta	144
80. Absolutní hodnota entropie	147

Směsi ideálních plynů

81. Směsi plynů	147
82. Měrný objem a měrná váha směsi plynů	149
83. Střední (zdánlivá) molekulová váha směsi	149
84. Stavová rovnice směsi	151
85. Parciální tlak složek	153

II. DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE TERMODYNAMIKY

86. Funkce stavu. Úplný diferenciál	155
87. Diferenciální rovnice I. zákona termodynamiky (část A)	156
88. Diferenciální rovnice vnitřní energie	158
89. Diferenciální rovnice I. zákona termodynamiky (část B)	164
90. Diferenciální rovnice II. zákona termodynamiky (entropie)	166
91. Diferenciální rovnice měrných tepel c_p a c_v	168
92. Obecný vztah mezi měrnými tepley c_p a c_v	171
93. Diferenciální rovnice entalpie	173

III. MOLEKULÁRNÍ TEORIE TEPLA

94. Fenomenologická a statistická termodynamika	181
95. Molekulární teorie hmoty	182
96. Molekulová stavba plynu	183
97. Brownovy pohyby	184
98. Kinetická teorie plynů	185
99. Základní rovnice kinetické teorie	186
100. Střední kvadratická rychlost	189
101. Vnitřní energie plynů. Ekvipartiční princip	189
102. Měrné teplo plynů	193
103. Maxwellův-Boltzmannův distribuční zákon	196
104. Počet srážek molekul. Volná dráha molekul	198
105. Vnitřní tření plynů	200
106. Rozměry molekulového světa	201
107. Statistický výklad II. zákona termodynamiky	202
108. Matematická pravděpodobnost	202
109. Termodynamická pravděpodobnost	205
110. Entropie funkcí termodynamické pravděpodobnosti	208

IV. REÁLNÉ PLYNY

111. Ideální a reálné plyny	209
112. Ideální plyny	209
113. Reálné plyny	210
114. Andrewsův diagram CO_2	212
115. Kritický bod	214
116. Měrné teplo reálných plynů	215
117. Stavová rovnice Van der Waalsova	216

118. Isotermny Van der Waalsovy	218
119. Zákon korespondujících stavů	220
120. Rovnice stavu reálných plynů	222
121. Vnitřní energie reálných plynů. Jouleův-Thomsonův efekt	229
122. Fenomenologický výklad Jouleova-Thomsonova efektu	230
123. Jouleův-Thomsonův součinitel	231
124. Molekulárně kinetický výklad Jouleova-Thomsonova efektu	234
125. Inversní teplota. Inversní křivka	235
126. Inversní a kritická teplota	238
127. Rovnice vnitřní energie reálných plynů	239

V. TERMODYNAMIKA PAR

128. Plyny a páry	241
129. Vypařování, odpařování, var kapaliny	241
130. Děj vypařování	242
131. Stav par	243
132. Mezní křivky	245
133. Průběh výroby páry v $T-s$ diagramu	246
134. Kalorické veličiny na mezní křivce x_0	246
a) Kapalinové teplo	247
b) Měrné teplo na mezní křivce x_0	247
c) Vnitřní energie vody na mezní křivce x_0	248
d) Entalpie vody na mezní křivce x_0	249
e) Entropie vody na mezní křivce x_0	250
135. Výparné teplo	251
136. Mokrý pára	251
a) Měrný objem mokré páry	252
b) Vnitřní energie mokré páry	252
c) Entalpie mokré páry	252
d) Entropie mokré páry	253
137. Sytá pára	254
138. Kalorické veličiny na mezní křivce $x = 1$	254
a) Vnitřní energie syté páry	254
b) Entalpie syté páry	255
c) Entropie syté páry	255
d) Měrné teplo na mezní křivce $x = 1$	256
139. Clapeyronova-Clausiova rovnice	259
140. Trojný bod. Tání a sublimace	262
141. Rovnice stavu syté páry	263
142. Přehřátá pára	264
a) Měrný objem přehřáté páry	264
b) Vnitřní energie přehřáté páry	265
c) Entalpie přehřáté páry	265
d) Entropie přehřáté páry	265

143. Měrné teplo c_p přehřáté páry	267
144. Rovnice stavu vodní páry	270
145. Sestavení termických a kalorických rovnic vodní páry	272
146. Vývoj rovnic stavu vodní páry	274
147. Tepelné diagramy vodní páry	285
148. Entropický $T-s$ diagram vodní páry	286
149. Mollierův $i-s$ diagram vodní páry	288
150. Změny stavu par	290
a) Isobarická změna mokré páry	290
b) Isobarická změna přehřáté páry	291
c) Isotermická změna mokré páry	293
d) Isotermická změna přehřáté páry	293
e) Isochorická změna mokré páry	294
f) Isochorická změna přehřáté páry	296
g) Adiabatická změna mokré a přehřáté páry	296
151. Škrcení par	297

VI. VLHKÝ VZDUCH

152. Suchý vzduch	301
153. Vlhký vzduch	302
154. Absolutní a relativní vlhkost	303
155. Rovnice stavu vlhkého vzduchu	304
156. Měrná vlhkost	305
157. Souvislost měrné vlhkosti a parciálních tlaků	306
158. Stupeň nasycení	307
159. Měrný objem vlhkého vzduchu	308
160. Měrná váha vlhkého vzduchu	309
161. Měrné teplo vlhkého vzduchu	311
162. Entalpie vlhkého vzduchu	311
163. Entalpie mlhového vzduchu	312
164. Parametry vlhkého vzduchu	313
165. Mollierův $i-x$ diagram vlhkého vzduchu	314
166. Křivka tlaků sytých par p_p'' a křivky relativních vlhkostí	315
167. Oblast mlhového vzduchu v $i-x$ diagramu	316
168. Vliv změny tlaku vlhkého vzduchu	317
169. Změny stavu vlhkého vzduchu	320
170. Změny stavu při $x = \text{konst}$	320
171. Míšení nestejných množství různě nenasyčených vzdušín	322
172. Míšení s přívodem tepla	324
173. Míšení mlhového vzduchu se vzduchem nenasyčeným	324
174. Vlhčení vzduchu	325
175. Vlhčení vzduchu vodou a párou	326
176. Odpařování vody z volné hladiny. Teplota vlhkého teploměru	327
177. Čáry konstantní teploty mezního ochlazení $\theta = \text{konst}$	330
178. Lewisův vztah	330
179. Určování relativní vlhkosti měřením	332

VII. POROVNÁVACÍ CYKLY

180. Přeměna tepla v práci	335
181. Postup při výpočtech termické účinnosti	337

Spalovací motory

182. Spalovací motory	338
183. Lenoirův cyklus	339
184. Vybušný cyklus	341
185. Rovnotlaký cyklus	343
186. Smíšený cyklus	346
187. Porovnání výbušného a rovnotlakého cyklu	348

Cykly plynových turbin a proudových motorů

188. Cyklus Ericssonův-Braytonův	354
189. Princip Ericssonovy rovnotlaké turbíny	356
190. Princip náporového proudového motoru	357
191. Princip tryskového motoru s turbokompresorem	358
192. Princip teplovzdušného motoru	359
193. Teplovzdušný motor s izotermickou expanzí a kompresí	359
194. Humpreyův cyklus	361
195. Princip Holzwartovy turbíny	363

Kompresory

196. Princip kompresoru	364
197. Způsoby změny stavu kompresí	365
198. Kompresní práce	367
199. Vliv škodného prostoru	368
200. Práce kompresoru při uvažování škodného prostoru	371
201. Vícestupňové kompresory	371
202. Teplo odvedené z plynu při kompresi a v chladiči	373

Parní oběhy

203. Princip parního oběhu Clausiova-Rankinova	374
204. Účinnost parního stroje	376
205. Spotřeba páry	377
206. Ztráty stěnou	378
207. Ztráta neúplnou expanzí	380

208. Ztráty škrcením	381
209. Ztráty škodným prostorem	382
210. Vliv teploty vstupní páry na termickou účinnost při $p_1 = \text{konst}$	383
211. Vliv tlaku vstupní páry při $T_1 = \text{konst}$ a $p_2 = \text{konst}$	384
212. Vliv konečného tlaku expanse při stejném počátečním stavu vstupní páry	385
213. Carnotův parní oběh	385
214. Carnotisace Clausiova-Rankinova oběhu	387

VIII. TERMODYNAMIKA PROUDÍCÍCH PLYNŮ A PAR

215. Termodynamický stav klidného plynu	391
216. Termodynamický stav proudícího plynu	391
217. Definice tekutiny a vzdušiny	392
218. Stlačitelná a nestlačitelná tekutiny	392
219. Idealisace proudící látky	393
220. Jednorozměrné proudění	393
221. Laminární a turbulentní proudění	394
222. Proudění stacionární a nestacionární	396
223. Proudění adiabatické a isentropické	397
224. Proudění se spojitou a nespojitou změnou stavu	398
225. Rychlost zvuku. Machovo číslo	400
226. Zákon o zachování hmoty. Rovnice kontinuity	401
227. Zákon o zachování energie. Základní pohybová rovnice	403
228. Zákon o zachování energie. Bernoulliho rovnice	406
229. Expanse plynu při proudění dýzou a otvorem	410
230. Ztráta odporu a ztráta kinetické energie	411
231. Isentropické proudění	416
232. Závislost kritických veličin na parametrech klidového stavu	419
233. Stav při expansi do vakua	420
234. Výpočet rychlosti z daného poměru tlaků p/p_0	421
235. Výpočet poměru průřezů F/F^* jako funkce M a M^*	422
236. Váhové množství plynu vytékající dýzou	427
237. Výtok otvorem ve stěně	430
238. Rázová komprese	433
239. Kritické veličiny při rázové vlně	438
240. Příčiny změny stavu proudu	441
241. Tvar dýzy	443
242. Kritický průřez	446
243. Výpočet Lavalovy dýzy pomocí $i-s$ diagramu	448
244. Vliv protitlaku na proudění zúženou dýzou	449
245. Vliv protitlaku u Lavalovy dýzy	452
246. Výtok proudu se třením	452
Literatura	456
Tabulky	460
Júzovy termodynamické tabulky vody a vodní páry	481
Rejstřík	507

Volba soustavy fyzikálních jednotek

Fyzikální děje, které pozorujeme, snažíme se nejdříve vyjádřit přesným popisem toho, co bylo pozorováním zjištěno. Na základě pozorovaného formulujeme vztahy mezi ději určitými výroky. Pokud takové výroky popisují pouze průběh děje, což je tzv. kvalitativní vyjádření, nazýváme je pravidly. Pokro-
kem v poznání je, dovedeme-li poznané vztahy vyjádřit rovnicemi, na základě kterých můžeme vypočítat velikosti fyzikálních veličin v závislosti na jiných fyzikálních veličinách. Tím docházíme k vyššímu druhu poznání, k poznání kvantitativnímu.

Zpravidla stanovíme nejdříve matematické vztahy mezi fyzikálními veličinami v jednoduchých dějích, které jsou speciálními případy s omezeným rozsahem platnosti. Platnost těchto jednoduchých případů se snažíme rozšířit či zevšeobecnit na širší oblast jevů. Tento postup nazýváme induktivní metodou a jejím cílem je formulování fyzikálních zákonů. Opačnou cestu, tj. ze všeobecných zákonů odvozovat pravidla platná pro speciální případy, nazýváme dedukcí. Dedukcí kontrolujeme platnost obecných zákonů nalezených induktivní metodou. Dedukcí můžeme nalézt i nové vztahy, které jsme při induktivní metodě, vedoucí k zevšeobecnění jednotlivých (speciálních) dějů neuvažovali nebo neznali.

Fyzikální veličiny vyjadřující fyzikální děje mají určité jednoznačné rozměry (dimense), odvozené ze základních jednotek.

Podmínkou správnosti fyzikálních rovnic je dimensionální homogenita. To znamená, že dimense všech členů rovnice musí být stejné. Této podmínky používáme ke kontrole fyzikálních rovnic.

Abyste nedošlo k chybám nebo k nedorozuměním, je třeba užívat pro všechny fyzikální veličiny téže soustavy měř. V technické termodynamice užíváme tzv. *technické soustavy měř*.

Základní jednotky v technické soustavě jsou délka l [m], síla P [kg*] a čas τ [vteřina, s]. Jednotkou času často bývá místo vteřiny hodina [h]. V technické soustavě měř se označuje kilogram síly hvězdičkou, aby se tím odlišil od zavedeného označení kg hmoty.

Jednotkou hmoty v technické soustavě je množství hmoty, které síla 1 kg* udělí zrychlení 1 m/s².

Stanovíme ji z Newtonova zákona

$$P = ma$$