

## OBSAH

<i>Předmluva</i> .....	5
<i>Volba soustavy fyzikálních jednotek</i> .....	17
<i>Přehled fyzikálních veličin</i> .....	25

### I. TERMODYNAMIKA PLYNŮ

#### *Základní pojmy*

1. Teplota .....	29
2. Teplo a teplota .....	30
3. Tlak .....	31
4. Měrný objem, váha, hmota .....	32
5. Míra množství tepla, kalorie .....	34
6. Měrné teplo .....	38
7. Střední měrné teplo .....	39
8. Vývoj teorie tepla .....	41

#### *První zákon termodynamiky*

9. Formulace I. zákona termodynamiky .....	42
10. Tepelný ekvivalent mechanické energie .....	43
11. Stanovení tepelného ekvivalentu mechanické energie .....	44
12. Tepelný stav .....	45
13. Vnitřní energie .....	45
14. Matematická formulace I. zákona termodynamiky .....	46
15. Vnější absolutní práce .....	46
16. Množství tepla v látce .....	48
17. Teplo a energie .....	49
18. Homogenní těleso (látka) .....	51
19. Rovnice stavu .....	51

20. Izobarický súčiniteľ teplotnej rozťažnosti .....	54
21. Izotermický súčiniteľ objemovej stlačiteľnosti .....	56
22. Izochorický súčiniteľ tlakovej rozpínivosti .....	58

## IDEÁLNÍ PLYNY

### *Základní zákony ideálních plynů*

23. Definice ideálních plynů .....	60
24. Zákon Boyleův-Mariotteův .....	60
25. Zákon Charlesův-Gay-Lussacův. Absolutní nulová teplota .....	61
26. Rovnice stavu ideálních plynů .....	63
27. Plynová konstanta .....	64
28. Univerzální plynová konstanta. Definice kilogrammolekuly .....	65
29. Parciální derivace stavových veličin ideálních plynů .....	67
30. Normální kubický metr $\text{Nm}^3$ , $\text{nm}^3$ .....	68
31. Měrná tepla ideálních plynů $c_p$ a $c_v$ .....	69
32. Molové měrné teplo .....	70
33. Vnitřní (tepelná) energie ideálních plynů .....	71
34. Entalpie .....	72
35. I. zákon termodynamiky a entalpie. Technická práce plynu .....	76
36. Vztah mezi absolutní a technickou prací plynu .....	77

### *Vratné změny stavu ideálních plynů*

37. Vratnost termodynamických dějů .....	79
38. Změny stavu .....	81
39. Změna při konstantním objemu — izochorická .....	81
40. Změna při konstantním tlaku — izobarická .....	83
41. Změna při konstantní teplotě — izotermická .....	86
42. Změna stavu bez výměny tepla s okolím — adiabatická .....	88
43. Změna polytropická .....	96
44. Stanovení polytropického exponentu z indikátorového diagramu .....	100
45. Přehled vratných změn stavu .....	102



## *Druhý zákon termodynamiky*

46. Kruhový proces — cyklus .....	104
47. Carnotův cyklus .....	106
48. Druhý zákon termodynamiky .....	109
49. Carnotův cyklus s libovolnou pracovní látkou .....	110
50. Účinnost nevratného Carnotova cyklu .....	111
51. Neizolované a izolované systémy .....	112
52. Vratné a nevratné děje .....	113
53. Degradace tepla, pravděpodobnost stavu a stupeň nevratnosti .....	114
54. Entropie .....	116
55. Matematická formulace II. zákona termodynamiky .....	116
56. Entropie látky (neizolovaného tělesa) .....	119
57. Entropie pevných a kapalných látek .....	120
58. Entropie ideálního plynu .....	121
59. Entropický $T-s$ diagram .....	123
60. Vratné změny ideálních plynů v $T-s$ diagramu .....	125
61. Pracovní a tepelné plochy v $T-s$ diagramu .....	129
62. Tepelné a pracovní plochy v $p-v$ diagramu .....	130
63. Entalpie v $p-v$ a $T-s$ diagramu .....	132
64. Konstrukce $T-s$ diagramu .....	133
65. Srovnání tlakového a entropického diagramu .....	135
66. Carnotův cyklus v $T-s$ diagramu .....	137
67. Obrácený Carnotův cyklus. Tepelná čerpadla .....	138
68. Zvýšení účinnosti Carnotova cyklu normálního a obráceného .....	139

### *Druhý zákon termodynamiky a nevratné děje*

69. Typické nevratné děje .....	141
70. Tření .....	141
71. Sdílení tepla .....	141
72. Škrceň ideálního plynu .....	143
73. Difúze plynů .....	145
74. Entropie pracovní látky při nevratné změně .....	147
75. Entropie izolovaného systému .....	149
76. Vzrůst entropie škrceňmi .....	151
77. Tepelná smrt vesmíru .....	152
78. Absolutní termodynamická stupnice teplot .....	152
79. Nernstova věta .....	157
80. Absolutní hodnota entropie .....	160

### *Podmínky rovnováhy. Termodynamické potenciály*

81. Rovnovážné stavy .....	160
82. Volná energie. Izotermicko-izochorický potenciál .....	162

83. Vázaná energie .....	163
84. Volná entalpie. Izotermicko-izobarický potenciál .....	164
85. Rovnice Gibbsova-Helmholtzova .....	166

## II. DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE TERMODYNAMIKY

86. Funkce stavu. Úplný diferenciál .....	169
87. Diferenciální rovnice I. zákona termodynamiky (část A) .....	170
88. Diferenciální rovnice vnitřní energie .....	173
89. Diferenciální rovnice I. zákona termodynamiky (část B) .....	178
90. Diferenciální rovnice II. zákona termodynamiky (entropie) .....	180
91. Diferenciální rovnice měrných tepel $c_p$ a $c_v$ .....	182
92. Obecný vztah mezi měrnými tepley $c_p$ a $c_v$ .....	185
93. Diferenciální rovnice entalpie .....	187

## III. MOLEKULOVÁ TEORIE TEPLA

94. Fenomenologická a statistická termodynamika .....	195
95. Molekulová teorie hmoty .....	196
96. Molekulová stavba plynu .....	197
97. Brownovy pohyby .....	199
98. Kinetická teorie plynů .....	199
99. Základní rovnice kinetické teorie .....	199
100. Střední kvadratická rychlost .....	203
101. Vnitřní energie plynů. Ekvipartiční princip .....	204
102. Měrné teplo plynů .....	207
103. Maxwellův-Boltzmannův distribuční zákon .....	210
104. Počet srážek molekul. Volná dráha molekul .....	212
105. Vnitřní tření plynů .....	214
106. Rozměry molekulového světa .....	215
107. Statistický výklad II. zákona termodynamiky .....	215
108. Matematická pravděpodobnost .....	216
109. Termodynamická pravděpodobnost .....	218
110. Entropie a termodynamická pravděpodobnost .....	221

## IV. REÁLNÉ PLYNY

111. Ideální a reálné plyny .....	223
112. Ideální plyny .....	223
113. Reálné plyny .....	224



114. Andrewsův diagram $\text{CO}_2$ .....	226
115. Kritický bod .....	228
116. Měrné teplo reálných plynů .....	228
117. Stavová rovnice van der Waalsova .....	230
118. Izotermy van der Waalsovy. Labilní stavy .....	232
119. Zákon korespondujících stavů .....	234
120. Rovnice stavu reálných plynů .....	236
121. Vnitřní energie reálných plynů. Jouleův-Thomsonův efekt .....	243
122. Fenomenologický výklad Jouleova-Thomsonova efektu .....	244
123. Jouleův-Thomsonův součinitel .....	245
124. Molekulový kinetický výklad Jouleova-Thomsonova efektu .....	247
125. Inverzní teplota. Inverzní křivka .....	249
126. Inverzní a kritická teplota .....	251
127. Rovnice vnitřní energie reálných plynů .....	252

### *Směsi plynů*

128. Směsi plynů, Daltonův zákon .....	253
129. Měrný objem a měrná váha směsi plynů .....	255
130. Střední (zdánlivá) molekulová váha směsi .....	256
131. Stavová rovnice směsi .....	258
132. Parciální tlak směsi .....	259

## V. TERMODYNAMIKA PAR

133. Plyny a páry .....	261
134. Vypařování, odpařování, var kapaliny .....	261
135. Děj vypařování .....	262
136. Stavy par .....	262
137. Mezní křivky vodní páry .....	263
138. Průběh výroby páry v $T-s$ diagramu .....	265
139. Kalorické veličiny na mezní křivce $x_0$ .....	265
a) Kapalinové teplo .....	265
b) Měrné teplo na mezní křivce $x_0$ .....	267
c) Vnitřní energie vody na mezní křivce $x_0$ .....	267
d) Entalpie vody na mezní křivce $x_0$ .....	268
e) Entropie vody na mezní křivce $x_0$ .....	269
140. Výparné teplo .....	270
141. Mokrá pára .....	271
a) Měrný objem mokré páry .....	271
b) Vnitřní energie mokré páry .....	271
c) Entalpie mokré páry .....	272
d) Entropie mokré páry .....	272
142. Sytá pára .....	273

143. Kalorické veličiny na mezní křivce $x_1$ .....	274
a) Vnitřní energie syté páry .....	274
b) Entalpie syté páry .....	274
c) Entropie syté páry .....	275
d) Měrné teplo na mezní křivce $x_1$ .....	275
144. Clapeyronova-Clausiova rovnice .....	276
145. Trojný bod. Tání a sublimace .....	279
146. Rovnice stavu syté páry .....	282
147. Přehřátá pára .....	283
a) Měrný objem přehřáté páry .....	283
b) Vnitřní energie přehřáté páry .....	284
c) Entalpie přehřáté páry .....	286
d) Entropie přehřáté páry .....	286
148. Měrné teplo $c_p$ přehřáté páry .....	286
149. Rovnice stavu vodní páry .....	290
150. Sestavení termických a kalorických rovnic vodní páry .....	291
151. Vývoj rovnic stavu vodní páry .....	293
152. Tepelné diagramy vodní páry .....	304
153. Entropický $T-s$ diagram vodní páry .....	305
154. Mollierův $i-s$ diagram vodní páry .....	307
155. Změny stavu par .....	308
a) Izobarická změna mokré páry .....	309
b) Izobarická změna přehřáté páry .....	310
c) Izotermická změna mokré páry .....	312
d) Izotermická změna přehřáté páry .....	312
e) Izochorická změna mokré páry .....	314
f) Izochorická změna přehřáté páry .....	315
g) Adiabatická změna mokré a přehřáté páry .....	317
156. Škrceň par .....	320

### *Směšovací procesy*

157. Směšování par .....	322
158. Kontinuální směšování par .....	322
159. Směšovací přímka .....	323
160. Směšování za přívodu tepla .....	324
161. Úprava páry vstřikováním vody .....	324
162. Směšování vody se sytou párou .....	325
163. Směšování vody s přehřátou párou .....	326

## VI. VLHKÝ VZDUCH

164. Suchý vzduch .....	329
165. Vlhký vzduch .....	330



166. Absolutní a relativní vlhkost .....	331
167. Rovnice stavu vlhkého vzduchu .....	333
168. Měrná vlhkost .....	334
169. Souvislost měrné vlhkosti a parciálních tlaků .....	334
170. Stupeň nasycení .....	336
171. Měrný objem vlhkého vzduchu .....	337
172. Měrná váha vlhkého vzduchu .....	338
173. Měrné teplo vlhkého vzduchu .....	340
174. Entalpie vlhkého vzduchu .....	341
175. Entalpie mlhového vzduchu .....	342
176. Parametry vlhkého vzduchu .....	343
177. Mollierův $i-x$ diagram vlhkého vzduchu .....	343
178. Křivka tlaků sytých par $p_p''$ a křivky relativních vlhkostí .....	345
179. Oblast mlhového vzduchu v $i-x$ diagramu .....	346
180. Vliv změny tlaku vlhkého vzduchu .....	347
181. Změny stavu vlhkého vzduchu .....	350
182. Změny stavu při $x = \text{konst}$ .....	350
183. Míšení nestejných množství různě nenasyčených vzdušin .....	352
184. Míšení s přívodem tepla .....	355
185. Míšení mlhového vzduchu se vzduchem nenasyčeným .....	356
186. Vlhčení vzduchu .....	356
187. Vlhčení vzduchu vodou a párou .....	358
188. Odpařování vody z volné hladiny. Teplota vlhkého teploměru .....	359
189. Čáry konstantní teploty mezního ochlazení $\theta = \text{konst}$ .....	362
190. Lewisův vztah .....	362
191. Určování relativní vlhkosti měření .....	364

## VII. POROVNÁVACÍ CYKLY

192. Přeměna tepla v práci .....	367
193. Postup při výpočtech termické účinnosti .....	369

### *Spalovací motory*

194. Spalovací motory .....	370
195. Lenoirův cyklus .....	371
196. Výbušný cyklus .....	372
197. Rovnotlaký cyklus .....	375
198. Smišený cyklus .....	377
199. Porovnání výbušného a rovnotlakého cyklu .....	380

## Cykly plynových turbin a proudových motorů

200. Cyklus Ericssonův-Braytonův .....	385
201. Princip Ericssonovy rovnotlaké turbíny .....	387
202. Princip náporového proudového motoru .....	388
203. Princip tryskového motoru s turbokompresorem .....	388
204. Princip teplovzdušného motoru .....	389
205. Teplovzdušný motor s izotermickou expanzí a kompresí .....	390
206. Humpreyův cyklus .....	392
207. Princip Holzwartovy turbíny .....	393

### Kompresory

208. Princip kompresoru .....	394
209. Způsoby změny stavu kompresí .....	395
210. Kompresní práce .....	397
211. Vliv škodného prostoru .....	399
212. Práce kompresoru při uvažování škodného prostoru .....	401
213. Vícestupňové kompresory .....	401
214. Teplo odvedené z plynu při kompresi a v chladiči .....	403

### Parní oběhy

215. Princip parního oběhu Clausiova-Rankinova .....	404
216. Účinnost parního stroje .....	406
217. Spotřeba páry .....	407
218. Ztráty stěnou .....	408
219. Ztráta neúplnou expanzí .....	410
220. Ztráty škrcením .....	411
221. Ztráty škodným prostorem .....	412
222. Vliv teploty vstupní páry na termickou účinnost při $p_1 = \text{konst}$ .....	413
223. Vliv tlaku vstupní páry při $T_1 = \text{konst}$ a $p_2 = \text{konst}$ .....	414
224. Vliv konečného tlaku expanze při stejném počátečním stavu vstupní páry .....	414
225. Carnotův parní oběh .....	416
226. Carnotizace Clausiova-Rankinova oběhu .....	417

### Chladicí zařízení

227. Princip chlazení .....	419
228. Kompresorové chladicí zařízení .....	420
229. Tepelná bilance chladicího oběhu .....	421
230. Efekt chladicího oběhu .....	421



## VIII. TERMODYNAMIKA PROUDÍCÍCH PLYNŮ A PAR

231. Termodynamický stav klidného plynu .....	423
232. Termodynamický stav proudícího plynu .....	423
233. Definice tekutiny a vzdušiny .....	424
234. Stlačitelné a nestlačitelné tekutiny .....	424
235. Idealizace proudící látky .....	425
236. Jednorozměrné proudění .....	425
237. Laminární a turbulentní proudění .....	426
238. Proudění stacionární a nestacionární .....	427
239. Proudění adiabatické a izoentropické .....	428
240. Proudění se spojitou a nespojitou změnou stavu .....	428
241. Rychlost zvuku. Machovo číslo .....	428
242. Zákon o zachování hmoty. Rovnice kontinuity .....	431
243. Zákon o zachování energie. Základní pohybová rovnice .....	433
244. Zákon o zachování energie. Bernoulliho rovnice .....	434
245. Expanze plynu při proudění dýzou a otvorem .....	437
246. Ztráta odporu a ztráta kinetické energie .....	441
247. Izoentropické proudění .....	442
248. Závislost kritických veličin na parametrech klidového stavu .....	447
249. Stav při expanzi do vakua .....	451
250. Výpočet rychlosti z daného poměru tlaků $p/p_0$ .....	452
251. Výpočet poměru průřezů $F/F^*$ jako funkce $M$ a $M^*$ .....	452
252. Váhové množství plynu vytékající dýzou .....	454
253. Výtok otvorem ve stěně .....	459
254. Rázová komprese .....	461
255. Kritické veličiny při kompresní vlně .....	465
256. Příčiny změny stavu proudu .....	470
257. Tvar dýzy .....	472
258. Kritický průřez .....	475
259. Výpočet Lavalovy dýzy pomocí $i-s$ diagramu .....	478
260. Vliv protitlaku na proudění zúženou dýzou .....	480
261. Vliv protitlaku u Lavalovy dýzy .....	482
262. Výtok proudu s třením .....	484

## IX. EXERGIE

263. Tepelné ztráty .....	487
264. Termická účinnost a využití energie .....	488
265. Historie pojmu exergie .....	489
266. Stavová veličina exergie .....	489
267. Exergie a teplota okolí .....	495
268. Entropie a exergie .....	496
269. Exergetická účinnost .....	496

270. Stupeň dokonalosti. Úhrnná účinnost .....	497
271. Exergie v $i-x$ diagramu .....	499
<i>Literatura</i> .....	501
<i>Tabulky</i> .....	503
<i>Júzovy termodynamické tabulky vody a vodní páry</i> .....	529
<i>Rejstřík</i> .....	555