

# Obsah

Předmluva	11
<b>1 Výchozí představy termodynamiky</b>	<b>13</b>
1.1 Předmět zkoumání termodynamiky	13
1.1.1 Celkový rámec	13
1.1.2 Teplo, teplota, entropie	14
1.1.3 Vymezení termodynamiky	16
1.2 Základní pojmy termodynamiky; terminologie	18
1.2.1 Termodynamická soustava a její stav	18
1.2.2 Pojmy známé z mechaniky	21
1.2.3 Látka; množství látky; mol	22
1.2.4 Částice	26
1.2.5 Stěna	28
1.2.6 Stav soustavy; termodynamický děj	28
1.2.7 Typy stavových veličin	30
<b>2 Nulý zákon termodynamiky; empirická teplota</b>	<b>35</b>
2.1 Rovnovážný stav	35
2.2 První postulát termodynamiky	36
2.2.1 Relaxace	37
2.3 Druhý postulát (nulý zákon termodynamiky)	38
2.3.1 Teplota; empirická teplota	38
2.3.2 Druhý postulát – nulý zákon termodynamiky	40
2.3.3 Rovnováha dvou soustav	41
2.3.4 Praktické měření teploty	42
<b>3 První zákon termodynamiky; teplo</b>	<b>49</b>
3.1 Základní idea	49
3.2 Práce	50
3.2.1 Práce v mechanice	50
3.2.2 Práce u soustavy tvořené plynem	51
3.2.3 Práce při zobecněných souřadnicích a silách	53
3.3 Teplo	55
3.3.1 Energie	55
3.3.2 Teplo	55
3.4 Chemická práce; chemický potenciál	57
3.5 Formulace prvního zákona termodynamiky	58
3.5.1 1.ZTd s neproměnným látkovým množstvím	58
3.5.2 Plné znění prvního zákona termodynamiky	59
3.5.3 Historický význam prvního zákona termodynamiky	59
3.5.4 Fluidová teorie, fluidum „calor“	59

<b>4</b>	<b>Termika. Důsledky zavedení teploty a tepla</b>	<b>61</b>
4.1	Stavová rovnice . . . . .	61
4.1.1	Stavová rovnice termická a kalorická . . . . .	61
4.1.2	Ideální plyn . . . . .	63
4.1.3	Van der Waalsův plyn . . . . .	67
4.1.4	Jiné modely . . . . .	75
4.2	Některé materiálové veličiny . . . . .	82
4.2.1	Tepelná kapacita . . . . .	82
4.2.2	Měrná tepelná kapacita (měrné teplo) . . . . .	84
4.2.3	Latentní teplo (skupenské, výparné, ... teplo) . . . . .	84
4.2.4	Teplotní roztažnost . . . . .	85
4.2.5	Teplotní rozpínavost . . . . .	86
4.2.6	Stlačitelnost . . . . .	87
4.2.7	Přenos tepla . . . . .	87
4.3	Kalorimetrie . . . . .	90
4.3.1	Adiabatický kalorimetr . . . . .	90
4.3.2	Kalorimetrická rovnice . . . . .	91
4.3.3	Tepelně vodivostní kalorimetr . . . . .	93
4.4	Jednoduchý systém . . . . .	93
4.4.1	Základní idea . . . . .	93
4.4.2	Izochorický děj ( $V = \text{konst}$ ) . . . . .	96
4.4.3	Izobarický děj ( $p = \text{konst}$ ); entalpie . . . . .	97
4.4.4	Izotermický děj ( $T = \text{konst}$ ) . . . . .	99
4.4.5	Adiabatický děj ( $Q = 0$ ) . . . . .	100
4.4.6	Polytropický děj ( $C = \text{konst}$ ) . . . . .	102
4.4.7	Obecné děje . . . . .	103
4.4.8	Joulův-Thomsonův pokus . . . . .	106
4.5	Systémy s více proměnnými . . . . .	108
<b>5</b>	<b>Druhý zákon termodynamiky</b>	<b>111</b>
5.1	Základní idea . . . . .	111
5.2	Termodynamické stroje . . . . .	112
5.2.1	Cyklický stroj . . . . .	112
5.2.2	Idea tepelného motoru . . . . .	113
5.2.3	Idea chladničky . . . . .	114
5.2.4	Idea tepelného čerpadla . . . . .	115
5.2.5	Nevratné stroje . . . . .	115
5.3	Druhý zákon termodynamiky . . . . .	116
5.4	Carnotův cyklus . . . . .	119
5.4.1	Hlavní idea . . . . .	119
5.4.2	Nešlo by to jednodušeji? . . . . .	120
5.4.3	„Složený Carnotův cyklus“ . . . . .	121
5.5	Účinnost termodynamických strojů . . . . .	121
5.6	Účinnost Carnotova stroje . . . . .	123

5.6.1	Účinnost vratného stroje . . . . .	123
5.6.2	Účinnost nevratného stroje . . . . .	124
5.7	Termodynamická teplota . . . . .	125
5.8	Entropie . . . . .	127
5.8.1	Clausiova rovnost a nerovnost . . . . .	127
5.8.2	Zavedení entropie . . . . .	127
5.8.3	Entropie mimo rámec termodynamiky . . . . .	128
5.8.4	„Spojené zákony termodynamické“ . . . . .	129
5.8.5	Souvislost kalorické a termické stavové rovnice . . . . .	130
5.8.6	Entropie konkrétních soustav . . . . .	130
5.9	Termodynamické energie (potenciály) . . . . .	132
5.9.1	Energie v různých proměnných; Legendrova transformace . . . . .	132
5.9.2	Magický čtverec . . . . .	134
5.9.3	Gibbsovy-Helmholtzovy rovnice . . . . .	135
5.10	Podmínky rovnováhy . . . . .	136
5.10.1	Přechod izolovaného systému k rovnováze . . . . .	136
5.10.2	Entropie nerovnovážného stavu . . . . .	137
5.10.3	Podmínky rovnováhy uvnitř systému . . . . .	138
5.11	Entropie v termodynamice a ve statistické fyzice . . . . .	139
5.12	Návod na perpetuum mobile 2. druhu . . . . .	140

## **6 Třetí zákon termodynamiky 143**

6.1	Základní idea . . . . .	143
6.2	Formulace třetího zákona termodynamiky . . . . .	144
6.2.1	Nedosažitelnost absolutní nuly . . . . .	145

## **7 Otevřené systémy 147**

7.1	Základní idea . . . . .	147
7.1.1	Základní pojmy . . . . .	147
7.1.2	Změna množství systému . . . . .	149
7.2	Chemický potenciál . . . . .	150
7.3	Gibbsův paradox . . . . .	151
7.3.1	Entropie ideálního plynu . . . . .	151
7.3.2	Chemický potenciál dokonalého plynu . . . . .	155
7.4	Grandkanonický potenciál $\Omega$ . . . . .	155
7.5	Zákon působících hmot (Guldbergův-Waageův zákon) . . . . .	156

## **8 Fázové přechody 161**

8.1	Základní idea . . . . .	161
8.2	Fázový diagram jednosložkového systému . . . . .	161
8.3	Rovnováha v heterogenním systému. . . . .	166
8.4	Gibbsovo fázové pravidlo . . . . .	167
8.5	Ehrenfestova klasifikace fázových přechodů . . . . .	169
8.6	Fázové přechody 1. druhu . . . . .	170

8.6.1	Charakteristika . . . . .	170
8.6.2	Clausiova-Clapeyronova rovnice . . . . .	171
8.6.3	Přehřátí a podchlazení . . . . .	172
8.7	Spojité fázové přechody . . . . .	173
8.7.1	Charakteristika . . . . .	173
8.7.2	Ehrenfestovy rovnice . . . . .	173
8.8	Jiné fázové přechody . . . . .	174
8.9	Dvojsložková soustava; destilace . . . . .	175
<b>9</b>	<b>Základy nerovnovážné termodynamiky</b>	<b>177</b>
9.1	Idea . . . . .	177
9.1.1	Základní představa . . . . .	177
9.1.2	Nové prvky v přístupu . . . . .	178
9.1.3	Podrobnosti . . . . .	179
9.2	Nové pojmy . . . . .	179
9.2.1	Zobecněná síla . . . . .	179
9.2.2	Tok, hustota toku . . . . .	180
9.2.3	Vztah mezi zobecněnými silami a toky . . . . .	180
9.3	Základní vztahy . . . . .	181
9.3.1	Popis . . . . .	181
9.3.2	Změny vnitřní a vnější . . . . .	181
9.3.3	Rovnice kontinuity . . . . .	183
9.3.4	Hustoty veličin . . . . .	183
9.3.5	Produkce entropie . . . . .	183
9.4	Lineární systémy bez paměti . . . . .	184
9.5	Příklad: termoelektrické jevy . . . . .	185
9.5.1	Kinetické rovnice, produkce entropie . . . . .	185
9.5.2	Tepelná a elektrická vodivost . . . . .	186
9.5.3	Seebeckův jev . . . . .	187
9.6	Dodatek: Onsagerovy relace . . . . .	189
<b>10</b>	<b>Molekulová fyzika</b>	<b>191</b>
10.1	Základní představy . . . . .	191
10.1.1	Molekulová fyzika versus statistická fyzika . . . . .	191
10.1.2	Mikroskopické složení látky . . . . .	192
10.2	Trojí skupenství látky . . . . .	193
10.2.1	Model pevné látky . . . . .	193
10.2.2	Model kapaliny . . . . .	193
10.2.3	Model plynu . . . . .	193
10.3	Molekulárně kinetická teorie plynu . . . . .	194
10.3.1	Konkrétní makroskopické veličiny . . . . .	195
10.3.2	Brownův pohyb . . . . .	207
10.3.3	↔Problémy modelu ideálního plynu . . . . .	209

<b>11</b>	<b>Základy statistické fyziky</b>	<b>211</b>
11.1	Vztah termodynamiky a statistické fyziky	211
11.1.1	Termodynamika – shrnutí	211
11.1.2	Statistická fyzika – shrnutí	212
11.1.3	Klasický popis	213
11.1.4	Semiklasický popis	213
11.1.5	Kvantový popis	214
11.2	Základní potřebné pojmy z klasické fyziky	215
11.2.1	Označení	215
11.2.2	Liouvilův teorém; invariance fázového objemu	218
11.3	Rozdělovací funkce; ergodická hypotéza	219
11.3.1	Rozdělovací funkce	219
11.3.2	Středování	220
11.3.3	Ergodická hypotéza	221
11.4	Základní pojmy z kvantové mechaniky	221
11.5	Přehled důležitých typů souborů	223
11.6	Mikrokanonický soubor	224
11.7	Kanonický soubor	225
11.7.1	Fyzikální odvození z modelu	225
11.7.2	Přehled užitých statistických veličin	226
11.7.3	Vztahy mezi termodynamickými a statistickými veličinami	227
11.7.4	Odvození výrazů pro teplo, teplotu a entropii	229
11.8	Grandkanonický soubor	230
11.9	Ideální plyn (M-B, B-E, F-D)	232
11.9.1	Označení	232
11.9.2	Kanonické rozdělení	235
11.9.3	Grandkanonické rozdělení	235
11.9.4	Kombinatorické odvození	237
11.9.5	Porovnání klasického a kvantového plynu	242
<b>12</b>	<b>Aplikace statistické fyziky (RNDr. Z. Koupilová, Ph.D.)</b>	<b>243</b>
12.1	Neideální plyn – odvození stavové rovnice	243
12.2	Fotonový plyn	246
12.3	Degenerovaný plyn	249
12.4	Tepelná kapacita krystalu	252
12.4.1	Einsteinův model	253
12.4.2	Debyeův model	254
<b>A</b>	<b>Potřebná matematika</b>	<b>257</b>
A.1	Primitivní funkce $\int \frac{dx}{x}$ aneb matematik vs. fyzik	257
A.2	Parciální derivace: znak $\partial$	258
A.3	Značení parciálních derivací	261
A.4	Derivace inverzní funkce	263
A.5	Derivace implicitní funkce	263

A.6	Totální diferenciál . . . . .	264
A.7	Pfaffova forma . . . . .	266
A.8	Geometrická představa integrability Pfaffovy formy . . . . .	267
A.9	Integrace totálního diferenciálu . . . . .	269
A.10	Úpravy termodynamických vzorců („magický čtverec“) . . . . .	273
	A.10.1 Legendrova transformace v mechanice . . . . .	274
	A.10.2 Geometrický význam Legendrovy transformace . . . . .	275
A.11	Některé statistické integrály . . . . .	276
<b>B</b>	<b>Fyzika a jazyk</b>	<b>279</b>
B.1	Základní fyzikální pojmy podle norem . . . . .	279
	B.1.1 Veličina . . . . .	279
	B.1.2 Děj . . . . .	280
	B.1.3 Součinitel, činitel, koeficient, modul, číslo . . . . .	280
B.2	Různé konkrétní termíny . . . . .	281
B.3	Etymologie některých slov cizího původu . . . . .	285
	B.3.1 Etymologie obecně . . . . .	285
	B.3.2 Slova cizího původu, termíny a slovníček . . . . .	287
<b>C</b>	<b>Rejstřík osob</b>	<b>291</b>
<b>D</b>	<b>Aplikace; rozbor činnosti některých strojů</b>	<b>299</b>
D.1	Subjektivní pocit teploty . . . . .	299
D.2	Porovnávací cyklus . . . . .	300
D.3	Parní stroj: nejjednodušší schéma . . . . .	300
D.4	Realistický parní stroj . . . . .	301
D.5	Výbušný motor (čtyřtaktní benzínový) . . . . .	303
D.6	Vznětový motor (Dieselův, naftový) . . . . .	305
D.7	Stroje s lázněmi konečné tepelné kapacity . . . . .	306
<b>E</b>	<b>Data</b>	<b>307</b>
E.1	Základní fyzikální konstanty . . . . .	307
E.2	Porovnání nejnovější teplotní stupnice $t_{90}$ . . . . .	307
E.3	Termomechanické tabulky . . . . .	308
	E.3.1 Vlastnosti některých pevných látek . . . . .	308
	E.3.2 Vlastnosti některých kapalin . . . . .	308
	E.3.3 Vlastnosti některých plynů . . . . .	309
	E.3.4 Hustota suchého vzduchu a vody . . . . .	309
	E.3.5 Teploty a měrná skupenská tepla fázových přeměn . . . . .	310
	E.3.6 Molární hmotnosti $M$ a Poissonova konstanta $\kappa$ plynů . . . . .	310
	<b>Literatura</b>	<b>311</b>
	<b>Rejstřík</b>	<b>317</b>