

# OBSAH

Předmluva autorů . . . . .	13
Předmluva překladatelů . . . . .	16
Seznam značek a indexů . . . . .	18
<b>Kapitola 1. ZÁKLADY . . . . .</b>	<b>25</b>
1.1 Podobnost mezi zářením a vedením tepla a jejich rozdíly . . . . .	25
1.2 Podstata záření — tepelné záření . . . . .	27
1.3 Některé definice a geometrické pojmy . . . . .	30
1.4 Zákon reciprocity optiky záření . . . . .	34
1.5 Planckův zákon . . . . .	35
1.6 Stefanův—Boltzmannův zákon . . . . .	39
1.7 Záření objemu . . . . .	40
1.8 Šedý lambertovský povrch . . . . .	43
1.9 Postup výkladu . . . . .	44
<b>Kapitola 2. PŘÍMÝ PŘENOS MEZI DVĚMA POVRCHY . . . . .</b>	<b>45</b>
2.1 Definice úhlového součinitele a přímé výměnné plochy . . . . .	45
2.2 Metoda průmětů . . . . .	47
2.3 Metoda využívající symetrie u válcových a kulových těles . . . . .	49
2.4 Dvourozměrné systémy — metoda strun . . . . .	50
a) Odvození . . . . .	50
b) Dva rovnoběžné pásy . . . . .	52
c) Záření fronty plamene . . . . .	52
d) Úlohy spojené se zářením řad trubek . . . . .	52
e) Úhlový součinitel u pásů malé šířky . . . . .	56
f) Průběh hustoty toku nad trubkami a vyzdívkou . . . . .	56
2.5 Záření rovinného elementu . . . . .	58
a) Element $dS_1$ a obdélník v rovině rovnoběžné s rovinou elementu . . . . .	58
b) Element $dS_1$ a obdélník v rovině kolmé k rovině elementu . . . . .	59
c) Element $dS_1$ a kruhový kotouč $S_2$ o poloměru $R_2$ . . . . .	60
2.6 Vektorové pojetí toku a křivkové integrály . . . . .	61
a) Vektorová algebra . . . . .	61
b) Vektor tepelného toku . . . . .	62
c) Křivkové integrály . . . . .	65
2.7 Úhlový součinitel pro konečné povrchy . . . . .	68
a) Libovolný povrch $S_1$ září na libovolný povrch $S_2$ . . . . .	68
b) Obdélníky $S_1$ a $S_2$ stejných rozměrů umístěné nad sebou v rovnoběžných rovinách . . . . .	68
c) Obdélníky o společné jedné straně v navzájem kolmých rovinách . . . . .	68
d) Kruhové kotouče v rovnoběžných rovinách se společnou normálou procházející jejich středy . . . . .	70
e) Úhlový součinitel pro dva sousední válce . . . . .	71
f) Části kulového povrchu . . . . .	72
g) Přibližné řešení pro povrchy malé v porovnání s jejich vzdáleností . . . . .	72
2.8 Dvojnásobné křivkové integrály . . . . .	73
a) Odvození . . . . .	73
b) Dva obdélníky se společnou stranou v navzájem kolmých rovinách . . . . .	75

2.9 Výpočet přímých výměnných ploch u nových systémů pomocí podkladů pro případy již známé . . . . .	76
a) Yamautiův princip . . . . .	77
b) Element a libovolný obdélník . . . . .	77
c) Obdélníky v protínajících se rovinách . . . . .	78
d) Rovnoběžné protilehlé obdélníky nestejných rozměrů . . . . .	79
e) Stanovení výměnných ploch mezi dvěma povrchy na základě malých přemístění nebo změn velikosti . . . . .	79
2.10 Úhlové součinitele u částečně stíněných povrchů . . . . .	81
a) Družice a Země v případě, že horizont družice protíná Zemi . . . . .	83
b) Aplikace metody průmětů . . . . .	85
2.11 Pole záření, vektory toku a hustoty energie . . . . .	86
2.12 Doplňující odkazy . . . . .	86
Literatura ke kapitole 2 . . . . .	87

### Kapitola 3. CELKOVÁ VÝMĚNA TEPLA MEZI POVRCHY (V PRŮTEPLIVÉM PROSTŘEDÍ) . . . . .

3.1 Integrální rovnice výměny tepla zářením na povrchu . . . . .	89
3.2 Zvláštní případy . . . . .	91
a) Nekonečné rovnoběžné roviny . . . . .	91
b) Koncentrické koule nebo válce s konstantní teplotou a zářivostí . . . . .	93
c) Kulovité dutiny . . . . .	94
d) Uzavřený systém s třemi zónami . . . . .	95
3.3 Řešení integrální rovnice (3-6) . . . . .	97
3.4 Zonální metoda . . . . .	97
3.5 Celková výměnná plocha $\overline{SS}$ . . . . .	98
3.6 Předpoklad radiačně adiabatických zón . . . . .	100
3.7 Kritéria pro určování velikosti zón . . . . .	101
3.8 Elektrická síťová analogie . . . . .	103
3.9 Algebraická řešení . . . . .	105
a) Uzavřený systém ze zón představujících černé zdroje nebo propady a z adiabatických zón . . . . .	106
b) Uzavřený systém ze dvou zón představujících šedý zdroj a šedý propad a z adiabatických zón . . . . .	108
c) Uzavřený systém ze dvou zón představujících šedý zdroj a šedý propad, dále ze zón představujících černé zdroje nebo propady a z adiabatických zón . . . . .	109
d) Uzavřený systém ze tří zón představujících šedé zdroje nebo propady, ze zón představujících černé zdroje nebo propady a z adiabatických zón . . . . .	110
3.10 Strojový výpočet . . . . .	111
3.11 Celkové energetické bilance; podíl záření a jiných druhů přenosu tepla . . . . .	113
a) Linearizační metoda . . . . .	115
b) Iterační metoda pro rigorózní řešení . . . . .	116
3.12 Tok tepla otvory . . . . .	116
3.13 Trubky nebo odporová tělesa s adiabatickým pozadím — pojem ekvivalentní šedé roviny . . . . .	122
a) Řada trubek nebo tyčí umístěných rovnoběžně před adiabatickým pozadím . . . . .	122
b) Dvojitá řada černých trubek s rozmístěním do rovnostranných trojúhelníků . . . . .	126
c) Šedé odpory ve tvaru rovnoběžných úzkých pásů . . . . .	126
3.14 Hustota energie a vektory hustoty toku . . . . .	127
3.15 Dutiny . . . . .	128
Rekapitulace . . . . .	128
Literatura ke kapitole 3 . . . . .	129

<b>Kapitola 4. RADIAČNÍ VLASTNOSTI POVRCHU</b> . . . . .	<b>130</b>
4.1 Principy a definice . . . . .	130
a) Charakter záření . . . . .	130
b) Intenzita záření — interference . . . . .	131
c) Stupeň polarizace . . . . .	132
d) Zářivosti . . . . .	132
e) Pohltivost a odrazivost . . . . .	132
f) Difúzní odraz . . . . .	133
g) Grafické znázornění hodnoty $\epsilon_{\theta}$ . . . . .	134
h) Dielektrická konstanta . . . . .	135
i) Vodiče . . . . .	135
j) Index pohltivosti . . . . .	135
k) Komplexní index lomu . . . . .	135
4.2 Izotropní dielektrická média ( $\kappa \cong 0$ ) . . . . .	137
a) Směrová odrazivost . . . . .	137
b) Stupeň polarizace . . . . .	138
c) Poloprostorová zářivost . . . . .	139
d) Změna fáze . . . . .	139
4.3 Pohlcující média . . . . .	140
a) Směrová odrazivost . . . . .	140
b) Poloprostorová zářivost . . . . .	141
c) Změny fáze . . . . .	142
d) Lom (paprsků) . . . . .	142
4.4 Odrazivost kovů . . . . .	142
a) Spektrální zářivost ve směru normály . . . . .	143
b) Celková zářivost a pohltivost ve směru normály . . . . .	144
c) Spektrální poloprostorová zářivost . . . . .	145
d) Celková poloprostorová zářivost . . . . .	147
4.5 Rozptyl . . . . .	147
4.6 Drsné povrchy . . . . .	148
a) Povrchy s nepravidelnostmi mírného sklonu . . . . .	149
b) Hluboké povrchové trhliny . . . . .	151
4.7 Nehomogenní materiály . . . . .	152
4.8 Částečný odraz — aproximace pro inženýrské výpočty . . . . .	155
4.9 Vlastnosti nekovových materiálů . . . . .	156
a) Homogenní materiály . . . . .	156
b) Kyslíčníky . . . . .	158
c) Různé materiály . . . . .	159
4.10 Zářivosti kovů určené experimentálně . . . . .	159
Literatura ke kapitole 4 . . . . .	163
Dodatek: Celkové zářivosti různých povrchů ve směru normály . . . . .	165
Literatura k dodatku kapitoly 4 . . . . .	174
<b>Kapitola 5. PŘENOS TEPLA MEZI NEIDEÁLNÍMI POVRCHY</b> . . . . .	<b>175</b>
5.1 Integrální rovnice přenosu pro nelambertovský povrch . . . . .	175
5.2 Stupeň polarizace . . . . .	176
5.3 Zrcadlový odraz . . . . .	177
a) Konstrukce obrazů . . . . .	177
b) Přímý a zrcadlový přenos mezi dvěma povrchy . . . . .	178

5.4	Systém nelambertovských šedých povrchů . . . . .	179
	a) Zářivostí všech povrchů soustavy jsou vysoké, odraz je difúzní . . . . .	179
	b) Zářivostí všech povrchů soustavy jsou nízké, odraz je difúzní . . . . .	180
	c) Model částečně difúzního a částečně zrcadlového odrazu . . . . .	180
5.5	Aplikace modelu částečně difúzního a zrcadlového odrazu . . . . .	183
	a) Soustředné kulové nebo souosé nekonečné válcové povrchy . . . . .	183
	b) Krychle, jejíž stěny jsou šedé a jejich odrazivost je rozložitelná na difúzní a zrcadlové komponenty $\varrho_D$ a $\varrho_Z$ . . . . .	185
5.6	Nešedé povrchy . . . . .	189
	a) Povrchy při radiační rovnováze . . . . .	192
	b) Závislost spektrální zářivost na teplotě . . . . .	194
	Literatura ke kapitole 5 . . . . .	194
	Dodatek: Polarizační jevy . . . . .	195
	a) Nekonečné rovnoběžné kovové desky . . . . .	196
	b) Nekonečné rovnoběžné skleněné desky . . . . .	196
<b>Kapitola 6. ZÁŘIVOST A POHLTIVOST PLYNNÉHO PROSTŘEDÍ . . . . .</b>		<b>200</b>
6.1	Historický přehled . . . . .	200
6.2	Základní zákonitosti . . . . .	202
6.3	Spektrální čáry . . . . .	205
	a) Integrovaní součinitel pohltivosti spektrální čáry . . . . .	208
6.4	Spektrální pásy . . . . .	211
	a) Schackův model . . . . .	212
	b) Elsasserův model . . . . .	213
	c) Mayerův—Goodyův nebo též statistický model . . . . .	215
	d) Náhodná superpozice Elsasserových pásů . . . . .	216
	e) Model s konstantním součinitelem pohltivosti . . . . .	216
6.5	Aplikace modelů . . . . .	217
	a) Schackův model . . . . .	217
	b) Elsasserův model . . . . .	218
	c) Statistický model . . . . .	218
	d) Modifikovaný Elsasserův model . . . . .	221
	e) Konstantní součinitel pohltivosti . . . . .	221
6.6	Vzájemné vztahy mezi úhrnnou zářivostí a pohltivostí plynu . . . . .	221
6.7	Tlaková závislost zářivosti plynu . . . . .	223
6.8	Překrytí absorpčních pásů . . . . .	223
6.9	Kompilace úhrnných zářivostí plynů . . . . .	224
	a) Kyslíčník uhličitý . . . . .	226
	b) Vodní pára . . . . .	230
	c) Směs kyslíčnicku uhličitého a vodní páry . . . . .	232
	d) Kyslíčník siřičitý . . . . .	234
	e) Kyslíčník uhelnatý . . . . .	234
	f) Čpavek . . . . .	237
	g) Chlorovodík . . . . .	237
	h) Kyslíčník dusnatý . . . . .	237
	i) Kyslíčník dusičitý . . . . .	237
	j) Vzduch . . . . .	238
	k) Metan . . . . .	238
	l) Skleněné desky a tekuté sklo . . . . .	239
6.10	Záření mraku částic . . . . .	242
	a) Velké částice . . . . .	242
	b) Malé částice . . . . .	243

6.11 Vyjádření vlastností reálného plynu při inženýrských výpočtech . . . . .	246
a) Teplotní závislost součinitelů . . . . .	250
Literatura ke kapitole 6 . . . . .	251

## Kapitola 7. GEOMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY OBJEMU ZÁŘÍČÍHO PLYNU . . . . . 254

7.1 Základní definice . . . . .	254
7.2 Přímé výměnné plochy . . . . .	256
a) Výměna záření povrch—povrch . . . . .	256
b) Výměna plyn—povrch . . . . .	256
c) Výměna plyn—plyn . . . . .	257
7.3 Výpočty a kompilace hodnot přímých výměnných ploch . . . . .	258
a) Opticky tenká média . . . . .	260
b) Jednorozměrný systém . . . . .	262
c) Koule . . . . .	265
d) Válec . . . . .	265
e) Kvádr . . . . .	266
f) Dvojrůzoměrný systém . . . . .	268
g) Různé tvary . . . . .	271
7.4 Ekvivalentní a střední délka paprsku . . . . .	271
a) Výměna záření mezi objemem plynu a povrchem . . . . .	271
b) Výměna záření mezi dvěma povrchy . . . . .	275
c) Další geometrické konfigurace . . . . .	277
7.5 Reálný plyn . . . . .	277
a) Stanovení orientované výměnné plochy na základě diagramů úhnných zářivostí plynů . . . . .	280
b) Výpočet orientované výměnné plochy při vyjádření vlastností prostředí pomocí souboru šedých komponent . . . . .	281
c) Orientovaná výměnná plocha pro trojúhelníkový model absorpčních pásů . . . . .	282
d) Orientovaná výměnná plocha podle Elsasserova modelu . . . . .	282
e) Střední délka paprsku pro systémy s reálným plynem . . . . .	283
f) Výběr modelu zářivosti plynu . . . . .	285
7.6 Rekapitulace . . . . .	286
Literatura ke kapitole 7 . . . . .	286
Dodatek: Přímé výměnné plochy pro uzavřený válcový systém . . . . .	286

## Kapitola 8. SDÍLENÍ TEPLA ZÁŘENÍM V PLYNNÉM PROSTŘEDÍ O KONSTANTNÍ TEPLOTĚ . . . . . 295

8.1 Plyn obklopený dokonale černým nebo téměř černým povrchem . . . . .	296
a) Malé teplotní rozdíly . . . . .	297
8.2 Šedý plyn obklopený povrchem o stálé teplotě . . . . .	298
8.3 Uzavřený systém se šedým plynem a šedými difúzně odrážejícími povrchy . . . . .	299
8.4 Uzavřený systém se šedým plynem, šedými zrcadlově a difúzně odrážejícími povrchy . . . . .	302
8.5 Adiabatické povrchy v uzavřeném systému se šedým plynem . . . . .	302
8.6 Stanovení teplot adiabatických povrchů v šedém prostředí . . . . .	302
8.7 Uzavřený systém se šedým plynem a dvěma povrchy, z nichž jeden je adiabatický . . . . .	303
8.8 Systém s reálným plynem . . . . .	305
8.9 Adiabatické povrchy v uzavřeném systému s nešedým plynem . . . . .	306
8.10 Aplikace výpočtových postupů . . . . .	307
a) Šedý plyn, šedý povrch $S_1$ přijímá záření, adiabatický povrch $S_2$ , model zrnitých stěn systému . . . . .	307

b) Nešedý plyn reprezentovaný jednou šedou a jednou diatermní komponentou; adiabatický povrch s dokonalým difúzním odrazem . . . . .	309
c) Nešedý plyn; obálku systému tvoří šedý povrch $S_1$ odvádějící teplo a difúzní adiabatický povrch $S_2$ . . . . .	311
d) Nešedý plyn, obálka systému ze dvou šedých povrchů $S_1$ , $S_2$ , které přijímají teplo . . . . .	312
8.11 Rekapitulace výsledků . . . . .	315
8.12 Ekvivalentní radiční teplota plynu . . . . .	317
<b>Kapitola 9. ANALOGIE MEZI ZÁŘENÍM A DIFÚZNÍM PROCESEM . . . . .</b>	<b>319</b>
9.1 Úvod . . . . .	319
9.2 Rovnice pro difúzi záření . . . . .	319
a) Diskrétní model . . . . .	319
b) Kontinuální model . . . . .	321
9.3 Okrajové podmínky . . . . .	323
9.4 Difúzní rovnice pro nešedé médium . . . . .	325
9.5 Aplikace difúzní rovnice . . . . .	328
a) Šedý plyn mezi dvěma sousými nekonečnými válci . . . . .	328
b) Šedý plyn mezi koncentrickými koulemi . . . . .	329
c) Šedý plyn mezi nekonečnými rovnoběžnými deskami . . . . .	330
d) Nešedá média . . . . .	330
9.6 Difúzní aproximace pro záření v porézních látkách . . . . .	331
Literatura ke kapitole 9 . . . . .	334
<b>Kapitola 10. JEDNOROZMĚRNÉ TEPLOTNÍ POLE . . . . .</b>	<b>335</b>
10.1 Přenos zářením v systému se známým teplotním polem . . . . .	335
a) Formulace rozdělení směrové intenzity . . . . .	335
b) Numerické vyjádření rozdělení směrové intenzity . . . . .	336
c) Rozdělení intenzity u povrchu polonekonečné vrstvy média . . . . .	337
d) Formulace pro tok záření rovinou . . . . .	337
e) Tok z polonekonečné vrstvy média . . . . .	339
10.2 Rovnice přenosu . . . . .	340
a) Integro-diferenciální formulace . . . . .	340
b) Integroální formulace . . . . .	340
c) Systémy, které nejsou v radiční rovnováze . . . . .	341
d) Metody řešení . . . . .	341
10.3 Záření ve vrstvě šedého plynu mezi dvěma nekonečnými rovnoběžnými deskami . . . . .	342
a) Dokonale černé stěny . . . . .	342
b) Porovnání s řešením pro malé optické tloušťky . . . . .	342
c) Porovnání s řešením pro velké optické tloušťky . . . . .	343
d) Aditivita řešení . . . . .	344
e) Šedé stěny . . . . .	344
10.4 Zonální metoda . . . . .	345
a) Koncepce celkové výměnné plochy . . . . .	345
b) Kritéria pro volbu rozměrů zón . . . . .	346
10.5 Záření reálného plynu . . . . .	347
a) Stanovení distribuce intenzity nebo výsledného toku . . . . .	347
b) Rovnice přenosu . . . . .	348
c) Střední součinitel pohltivosti . . . . .	348
d) Iterační metody . . . . .	349
e) Vlastnosti nešedého plynu na základě součtu příspěvků šedých komponent . . . . .	349
f) Orientované výměnné plochy . . . . .	350

Literatura ke kapitole 10 . . . . .	351
Dodatek: Exponenciální integrál $\mathcal{E}_n(x)$ . . . . .	351
a) Definice . . . . .	351
b) Rekurentní formule . . . . .	351
c) Asymptotický tvar . . . . .	352
d) Tabelece . . . . .	352
<b>Kapitola 11. TROJROZMĚRNÉ TEPLTNÍ POLE . . . . .</b>	<b>354</b>
11.1 Přesná formulace energetických bilancí . . . . .	355
11.2 Bilance záření v uzavřeném systému s použitím koncepce celkových výměnných ploch . . . . .	357
a) Celkové výměnné plochy . . . . .	358
b) Kritéria pro volbu rozměru zón . . . . .	359
11.3 Nešedý plyn . . . . .	360
a) Lokálně proměnná koncentrace média . . . . .	361
11.4 Celková energetická bilance . . . . .	362
Literatura ke kapitole 11 . . . . .	364
<b>Kapitola 12. ROZPTYL ZÁŘENÍ NA OSAMOCENÉ ČÁSTICI . . . . .</b>	<b>365</b>
12.1 Definice . . . . .	365
a) Součinitele pohltivosti, rozptylu a zeslabení a rozptylový průřez částice . . . . .	365
b) Fázová funkce . . . . .	366
c) Rozptylový diagram . . . . .	366
d) $\cos \Theta$ . . . . .	366
e) Rozměrový parametr . . . . .	367
f) Albedo pro samotný rozptyl . . . . .	367
12.2 Velké částice . . . . .	368
a) Zrcadlově odrážející částice . . . . .	368
b) Nepropustná částečně zrcadlově odrážející kulová částice . . . . .	369
c) Nepropustná difúzně odrážející částice . . . . .	370
d) Částečně propustné částice . . . . .	373
e) Ohyb . . . . .	378
12.3 Malé částice . . . . .	379
a) Rayleighův rozptyl . . . . .	380
b) Rayleighův—Gansův rozptyl . . . . .	383
12.4 Koule libovolné velikosti . . . . .	384
a) Mieovy rovnice . . . . .	384
b) Asymptotický tvar Mieových rovnic pro malé koule . . . . .	386
c) Index lomu blízký jednotce . . . . .	387
d) Velké koule . . . . .	388
e) Nepohlcující koule . . . . .	389
f) Pohlcující koule . . . . .	391
g) Koule s nekonečným indexem lomu . . . . .	393
Literatura ke kapitole 12 . . . . .	394
<b>Kapitola 13. PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM V POHLCUJÍCÍM A ROZPTYLUJÍCÍM PROSTŘEDÍ . . . . .</b>	<b>395</b>
13.1 Součinitel pohltivosti a rozptylu . . . . .	395
a) Velké částice . . . . .	395
b) Malé částice . . . . .	396
c) Částice střední velikosti . . . . .	397

13.2 Přenosová rovnice . . . . .	397
13.3 Izotropní rozptyl . . . . .	399
a) Záření při lokální rovnováze . . . . .	399
b) Jednoduchý model rozptylu záření v planparalelní vrstvě . . . . .	399
c) Mnohonásobný izotropní rozptyl v planparalelní vrstvě . . . . .	404
d) Trojrozměrné teplotní pole . . . . .	408
13.4 Difúze fotonů v rozptylujícím prostředí . . . . .	411
13.5 Neizotropní rozptyl . . . . .	412
a) Azimutálně nezávislé ozáření . . . . .	413
b) Dvousměřová metoda . . . . .	414
c) Šestisměřová metoda . . . . .	416
d) Porovnání izotropního a neizotropního rozptylu . . . . .	418
Literatura ke kapitole 13 . . . . .	419
<b>Kapitola 14. APLIKACE U PECÍ . . . . .</b>	<b>421</b>
Elektrické odporové pece . . . . .	421
14.1 Efektivní zářivost $\varepsilon'$ svazku odporových těles u stěny . . . . .	422
14.2 Příklady výpočtu výměnné plochy $(\overline{S_1 S_2})_R$ . . . . .	424
14.3 Hospodárné, optimální rozmístění odporových těles . . . . .	426
14.4 Proměnné rozmístění článků, teploty a proudové zatížení . . . . .	428
14.5 Komerové pece . . . . .	430
Paličové pece . . . . .	431
14.6 Úvod . . . . .	431
14.7 Dlouhé pece . . . . .	434
14.8 Spalovací komora s dobrým směřováním . . . . .	442
14.9 Vliv odchylek od dokonalého směřování . . . . .	445
14.10 Aplikace modelu spalovací komory s dobrým směřováním . . . . .	449
14.11 Přesnější vyšetřování výkonu pece — zonální metoda . . . . .	451
14.12 Příklad aplikace zonální metody . . . . .	452
14.13 Teplotní pole a rozložení tepelného toku u válcové pece . . . . .	460
14.14 Záření částic plamene v peci . . . . .	467
Literatura ke kapitole 14 . . . . .	468
Dodatek: Crayovo—Curtetovo číslo . . . . .	468
ÚLOHY . . . . .	470
PŘEVODNÍ TABULKA ANGLICKÝCH JEDNOTEK . . . . .	490
DOPLŇKOVÁ LITERATURA . . . . .	491
VĚCNÝ REJSTRÍK . . . . .	493
JMENNÝ REJSTRÍK . . . . .	497