

**Kapitola 1 Termodynamické základy vnitřní balistiky . . . 2**

Úvod .....	3
1.1 Stavová rovnice plynů .....	3
1.2 Vnitřní energie, měrné teplo, výbuchové teplo a teplota zplodin hoření .....	5
1.2.1 Vnitřní energie .....	5
1.2.2 Měrné teplo plynů .....	7
1.2.3 Výbuchové teplo a výbuchová teplota .....	9
1.2.3.1 Určení ekvivalentního vzorce prachu .....	9
Příklad 1: .....	10
1.2.3.2 Výbuchové teplo .....	11
Příklad 2: .....	11
1.2.3.3 Určení molárního složení zplodin hoření a výbuchové teploty hoření .....	12
Příklad 3: .....	15
1.3 Termodynamické děje a energetické vztahy .....	16
1.3.1 Vnější práce plynu .....	16
1.3.2 Zákon zachování energie, princip ekvivalence tepla a práce .....	17
1.3.3 První zákon termodynamiky .....	17
1.3.4 Entalpie plynu .....	19
1.3.5 Obecný charakter termodynamických dějů .....	19
1.3.6 Termodynamické děje (procesy) .....	20
1.3.6.1 Izobarický děj .....	20
1.3.6.2 Izotermický děj .....	20
1.3.6.3 Adiabatický děj .....	21
1.3.6.4 Polytropický děj .....	23
1.4 Vratné a nevratné děje .....	24
1.4.1 Carnotův cyklus .....	25
1.4.2 Druhý zákon termodynamiky .....	27

**Kapitola 2 Hydrodynamické základy vnitřní balistiky . . . 30**

2.1 Jednosměrné proudění .....	31
2.2 Pohybová rovnice plynu .....	31
2.3 Rovnice zachování hmoty .....	32
2.4 Rovnice zachování energie .....	33
2.5 Jednosměrné proudění plynu v kanálu s proměnným průřezem, rychlost zvuku .....	35
Příklad 4: .....	37
Příklad 5: .....	39
2.6 Proudění v tryskách - sekundové množství .....	40
2.7 Funkční závislost pro sekundové průtočné množství .....	43
2.8 Změna rychlostí v kanálu s proměnným průřezem .....	44

## **Kapitola 3 Kinetické základy teorie hoření . . . . . 46**

3.1 Michelsonova hypotéza . . . . .	47
3.2 Zeldovičova teorie hoření . . . . .	48
3.3 Fyzikálně-chemické parametry zón hoření . . . . .	57
3.3.1 Rozměry prohřáté vrstvy v pevné fázi . . . . .	57
3.3.2 Rozměry prohřáté zóny v plynné fázi . . . . .	58
3.3.3 Sdílení tepla z plynné do pevné fáze prachu . . . . .	59
3.3.4 Jednoznačná závislost teploty povrchu pevné fáze . . . . .	60
3.3.5 Efektivní aktivační energie při zplyňování prachu . . . . .	60
3.3.6 Teplotní součinitel rychlosti hoření . . . . .	61

## **Kapitola 4 Úvod do teorie zážehu tuhých pohonných hmot a prachových výmetných náplní . . . . . 64**

4.1 Zážeh tuhých pohonných hmot - kinetické předpoklady . . . . .	65
4.2 Zážeh prachových výmetných náplní . . . . .	69
4.2.1 Vnitrobalistický rozbor . . . . .	69
4.2.2 Tepelná bilance zážehu . . . . .	73
4.2.3 Technické uskutečnění zážehu . . . . .	75
Příklad 6 . . . . .	78
Příklad 7: . . . . .	80

## **Kapitola 5 Kinetické zákony hoření . . . . . 82**

5.1 Zákonitosti hoření bezdýmných prachů a tuhých pohonných hmot. . . . .	83
5.1.1 Zákonitosti hoření v závislosti na tlaku a chemickém složení. . . . .	84
5.1.2 Závislost rychlosti hoření na počáteční teplotě náplně. . . . .	85
5.1.3 Závislost rychlosti hoření na rychlosti obtékání zplodinami hoření. . . . .	86
5.2 Obecné závislosti pro rychlost hoření . . . . .	88
5.3 Nestabilita hoření TPH spojená s kinetickými zákonitostmi hoření. . . . .	88
5.3.1 Anomální hoření (kašlání) . . . . .	88
5.3.2 Erozivní nestabilita . . . . .	89
5.3.3 Vibrační hoření - akustická nestabilita . . . . .	89
5.4 Hoření porézních spalitelných kompozic . . . . .	90
Příklad 8 . . . . .	96
5.5 Vztahy mezi exponenciálním a dvojčlenným zákonem hoření. . . . .	97

## **Kapitola 6 Geometrické zákony hoření . . . . . 100**

6.1 Geometrický zákon hoření jednotlivých prachových zrn . . . . .	101
6.1.1 Drobnozrnné prachy . . . . .	101
Příklad 9 . . . . .	103
Příklad 10: . . . . .	106
6.1.2 Zrna tuhých pohonných hmot pro raketové motory . . . . .	109
Příklad 11: . . . . .	110

6.2 Geometrická emisní funkce individuálních prachových zrn	112
6.2.1 Závislosti změny poměrné plochy hoření	112
6.2.1.1 Změna plochy průřezu TPH	113
6.2.2 Emisní funkce $\Gamma$ pro jednotkový zákon hoření	114
6.3 Náhradní závislosti geometrických funkcí	116
6.3.1 Odhořelé množství	116
6.3.2 Poměrná plocha hoření	116
Příklad 12	117
6.4 Geometrické zákony hoření prachových náplní	118
6.4.1 Kinetické a fyzikální předpoklady použité při odvození geometrických vnitrobalistických funkcí náplní	118
6.4.2 Geometrický model postupného zážehu	119
6.4.3 Zážehová funkce $\varepsilon(z, \rho)$	121
6.4.4 Vnitrobalistické funkce prachových zrn a prachových náplní	123
6.4.4.1 Funkce individuálních prachových zrn	123
6.4.4.2 Funkce prachových náplní při postupném zážehu	125
6.5 Odvození funkcí prachových náplní	128
6.5.1 Perioda zážehu	129
6.5.1.1 Impulz náplně	129
6.5.1.2 Poměrné odhořelé množství	130
6.5.1.3 Emisní funkce	132
6.5.2 Perioda hoření	132
6.5.2.1 Impulz náplně	132
6.5.2.2 Poměrné odhořelé množství	133
6.5.2.3 Emisní funkce	134
6.5.3 Perioda dohořívání	135
6.5.3.1 Impulz náplně	135
6.5.3.2 Poměrné odhořelé množství	136
6.5.3.3 Emisní funkce	137
6.5.3.4 Určení hodnoty poměrné tloušťky prachu na konci periody zážehu - $z_1$	137
Příklad 13	138
Závěr	144

## **Kapitola 7 Metody řešení hlavního úkolu vnitřní balistiky** **146**

Úvod	147
7.1 Metody výpočtu hlavního úkolu vnitřní balistiky	147
7.1.1 Drozdovovský systém rovnic a jeho řešení:	148
7.2 Příklad použití Drozdovovy metody výpočtu hlavního úkolu	150
7.2.1 Termodynamické a vnitrobalistické veličiny:	150
7.2.2 Výpočet dráhy střely:	151
7.3 Autorská metoda řešení dle emisní funkce zrna při okamžitém zážehu celé náplně ve všech bodech - metoda dvou funkcí $F_1, F_2$	154
7.3.1 Průběh tlaku	154
7.3.2 Průběh dráhy střely v hlavní	159
7.3.3 Příklad řešení hlavního úkolu autorskou metodou dle emisní funkce zrno - náplň - metoda dvou funkcí $F_1, F_2$	160
7.3.4 Příklad řešení hlavního úkolu metodou emisní funkce zrno = náplň při laboraci sférickým prachem	164

7.4 Autorská metoda řešení hlavního úkolu při postupném zážehu náplně	169
7.4.1 Příklad řešení hlavního úkolu při postupném zážehu náplně při laboraci sférickým prachem	169
7.4.1.1 Perioda zážehu - vzorce:	170
7.4.1.2 Perioda hoření - vzorce	174
7.4.1.3 Perioda dohoření náplně - vzorce:	179
Závěr	183

## **Kapitola 8 Vnitřní balistika raketových motorů s tuhou pohonnou hmotou** **184**

Úvod	185
8.1 Popis raketového motoru	185
8.2 Obecné zákonitosti racovního děje v motoru s TPH.	188
8.3 Přibližné analytické metody řešení hlavní vnitřní balistické úlohy raketového motoru	189
8.3.1 Cíl úlohy a předpoklady používané při výpočtu tlakové křivky.	190
8.3.2 Výchozí systém rovnic pro výpočet tlakové křivky pro R-T = R·T <sub>p</sub> = const.	191
8.3.2.1 Rovnovážná perioda B - E - C:	191
8.3.2.2 Určení rovnovážného tlaku - perioda B - E - C	193
8.3.2.3 Metodika výpočtu rovnovážného tlaku.	195
Příklad č. 1.	196
8.3.3 Nerovnážná perioda A - B:	197
8.3.3.1 Exponenciální zákon hoření $f(p) = p^{\nu}$	198
8.3.3.2 Dvoučlenný zákon hoření $f(p) = 1 + B \cdot p$	199
Příklad č. 2	199
8.3.4 Určení poměrného odhořelého množství $\psi$ náplně TPH - nerovnovážný stav.	200
8.3.4.1 Exponenciální zákon hoření $f(p) = p^{\nu}$ :	200
8.3.4.2 Dvoučlenný zákon hoření $f(p) = 1 + B \cdot p$ :	201
8.3.5 Výpočet odhořelého množství $\psi$ a doby funkce motoru v rovnovážné periodě B - E - C.	202
Příklad č. 3	203
8.3.6 Výchozí systém rovnice pro výpočet tlakové křivky pro RT = variabl.	205
8.3.6.1 Energetická rovnice	205
8.3.6.2 Rozbor rovnice kontinuity	206
8.3.6.3 Energetická rovnice pro exponenciální zákon hoření $f(p) = p^{\nu}$	208
8.3.6.4 Energetická rovnice pro dvoučlenný zákon hoření	209
8.3.7. Určení rovnovážného tlaku - perioda B - E - C:	210
8.3.7.1 Exponenciální zákon hoření:	210
8.3.7.2 Dvoučlenný zákon hoření:	211
8.3.7.3 Metodika výpočtu maximálního a rovnovážného tlaku	212
Příklad č. 4	213
8.3.8 Závislost průběhu tlaku na čase v nerovnovážné periodě A - B	214
8.3.8.1 Exponenciální zákon hoření $f(p) = p^{\nu}$	215
Příklad č. 5	218
8.3.8.2 Dvoučlenný zákon hoření	219
Příklad č. 6	220

8.3.9 Výpočtové závislosti pro periodu C - D - periodu adiabatického výplachu raketové komory	222
Příklad č. 7:	223
8.3.10 Určení poměrného odhořelého množství $\psi$ v nerovnovážné periodě A - B	225
8.3.10.1 Exponenciální zákon hoření	225
Příklad č. 8	226
8.3.10.2 Dvoučlenný zákon hoření	227
8.4 Metodika výpočtu tlakové křivky	227
8.4.1 Společná symbolika veličin	227
8.4.2 Metodika výpočtu pro malé změny rovnovážného tlaku	
$p_{\text{rovn.}} \approx \text{const.}$	228
8.4.2.1 Konstantní termodynamická síla tj. $R \cdot T = R \cdot T_p$	228
8.4.2.2 Proměnná termodynamická síla $R \cdot T = R \cdot T(p)$	229
8.4.3 Metodika výpočtu při velké změně rovnovážných tlaků	
$p_{\text{rovn.}} = \text{variabl.}$	229
8.4.3.1 Konstantní termodynamická síla $R \cdot T = R \cdot T_p = \text{const.}$	229
8.4.3.2 Proměnná termodynamická síla $R \cdot T = R \cdot T(p)$	230
8.4.3.3 Perioda výplachu	231
Příklad č. 9	231
8.5 Výpočet tlakové křivky	234
8.5.1 Nerovnovážná perioda	234
8.5.2 Rovnovážná perioda	236
8.5.3 Perioda výplachu motoru	238
8.6 Hlavní úkol vnitřní balistiky raketového motoru s tuhou pohonnou hmotou.	239
8.6.1 Vstupní hodnoty zadání úlohy.	240
8.6.1.1 Rozměrové údaje komory nutné pro vnitrobalistický výpočet.	240
8.6.2.1 Termodynamické a kinetické charakteristiky TPH:	240
8.6.1.3 Geometrické a fyzikální charakteristiky TPH	241
8.6.2 Přípravné výpočty	241
8.6.2.1 Hmotnostní a geometrické vztahy:	241
8.6.2.2 Závislost rovnovážných tlaků	243
8.6.2.3 Určení konce nerovnovážné periody:	244
8.6.2.4 Příprava vztahů pro výpočet tlaků v nerovnovážné periodě:	244
8.6.2.5 Výpočet průběhu času v nerovnovážné periodě	247
8.6.2.6 Výpočet času v rovnovážné periodě	248
8.6.2.7 Perioda výplachu motoru	249
8.6.2.8 Poznámky k výpočtu.	249
8.6.2.9 Kontrola stability funkce motoru	251
8.7 Součinitelé oprav tlakové křivky	252
Závěr	253

**Použitá označení** ..... **255**

**Historický kontext** ..... **261**