

Předmluva .....	3
OBSAH .....	4
1. ÚVOD .....	10
2. FYZIKÁLNÍ A TECHNOLOGICKÉ ZÁKLADY JADERNĚENERGETICKÉHO SYSTÉMU .....	12
2.1 Základní reakce jaderného procesu .....	12
2.2 Technologické zařízení na uvolňování jaderné energie .....	15
2.3 Jaderná paliva .....	16
2.4 Cyklus jaderného paliva .....	22
3. HLAVNÍ CHARAKTERISTIKY A RESIDUA ŠTĚPNÉHO A PLODICÍHO PROCESU .....	26
3.1 Neutrony ze štěpení jader těžkých prvků .....	26
3.1.1 Počet sekundárních neutronů .....	28
3.1.2 Zpožděné neutrony .....	31
3.1.3 Hustota toku neutronů .....	33
3.2 Účinné průřezy .....	33
3.2.1 Průřez pro absorpci neutronů .....	35
3.2.2 Průřez pro rozptyl neutronů .....	48
3.3 Produkty štěpení .....	50
3.4 Energie uvolňovaná při štěpení .....	51
3.5 Řetězová reakce .....	52
3.6 Kritická velikost neutrony reprodukcí soustavy .....	53
3.7 Plození štěpného materiálu v jaderném palivu .....	56
4. KLASIFIKACE A TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ .....	58
4.1 Základní kriteria klasifikace jaderných reaktorů .....	58
4.1.1 Klasifikace reaktorů podle povahy složek aktivní zóny .....	58
4.1.2 Klasifikace reaktorů podle uspořádání aktivní zóny .....	60
4.1.3 Klasifikace reaktorů podle uspořádání primárního okruhu .....	60
4.1.4 Klasifikace reaktorů podle účelu .....	62
4.2 Reaktory výzkumné .....	62
4.2.1 Reaktory s nulovou energií .....	63
4.2.2 Pokusné reaktory .....	67
4.2.3 Materiálové reaktory .....	69
4.2.4 Školní reaktory .....	71
4.3 Reaktory speciální .....	74
4.4 Reaktory energetické .....	74
4.4.1 Reaktory chlazené vodou .....	77
4.4.1.1 Tlakovodní reaktory .....	77
4.4.1.1.1 Tlakovodní reaktory chlazené a moderované lehkou vodou (PWR, VVER) .....	78
4.4.1.1.2 Tlakovodní reaktory chlazené a moderované těžkou vodou .....	86

4.4.1.2 Varné reaktory .....	87
4.4.1.2.1 Varné reaktory moderované a chlazené obyčejnou vodou (BWR) .....	88
4.4.1.2.2 Varné reaktory chlazené obyčejnou vodou a moderované grafitem (LMWR) .....	93
4.4.2 Reaktory chlazené plynem .....	97
4.4.2.1 Reaktory moderované grafitem chlazené CO <sub>2</sub> .....	99
4.4.2.2 Reaktory moderované D <sub>2</sub> O a chlazené CO <sub>2</sub> .....	101
4.4.2.3 Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory .....	102
4.4.3 Rychlé (množivé) reaktory chlazené tekutými kovy (LMFBR) .....	107
4.4.3.1 Smyčková koncepce rychlého reaktoru .....	108
4.4.3.2 Integrovaná koncepce rychlého reaktoru .....	110
4.5 Perspektivy dalšího rozvoje standardních typů jaderných reaktorů .....	115
4.6 Perspektivy dalšího rozvoje nestandardních jaderných reaktorů .....	116
4.6.1 Vodovodní množivý reaktor (WBR) .....	117
4.6.2 Plynem chlazený rychlý množivý reaktor (GCFR) .....	118
4.6.3 Reaktor s kontrolovaným posuvem spektra (neutronů) (SSCR) .....	119
4.6.4 Urychlovačem buzený reaktor (AFR) .....	120
4.6.4.1 Regenerátor paliva s lineárními urychlovačem (LAFR) .....	120
4.6.4.2 Elektrojaderný generátor paliva (ENFP) .....	121
4.6.5 Tekutou solí chlazený reaktor (MSR) .....	122
4.6.6 Reaktor s plyným srdcem (GKR) .....	123
4.6.7 Hybridní fúzní a štěpný reaktor (THR) .....	124
5. ZÁKLADY TEORIE NEUTRONOVÉHO POLE JADERNÉHO REAKTORU .....	125
5.1 Geneze a transport neutronového plynu .....	125
5.1.1 Interakce neutronového plynu .....	127
5.1.1.1 Změna hustoty neutronového plynu při jeho průchodu látkou .....	127
5.1.1.2 Rychlost reakcí neutronového plynu .....	129
5.1.2 Transport neutronů .....	130
5.1.2.1 Fickův difusní zákon .....	130
5.1.2.1.1 Hustota proudu neutronů .....	131
5.1.2.1.2 Koeficient difuze neutronů .....	132
5.1.2.1.3 Hustota toku monoenergetických neutronů .....	133
5.1.3 Únik neutronů .....	134
5.1.4 Zdroj neutronů .....	134
5.2 Rovnice difuze neutronů .....	135
5.2.1 Řešení rovnice difuze neutronů .....	135
5.2.1.1 Bodový zdroj neutronů v nekonečně velkém prostředí .....	137
5.2.1.2 Nekonečný rovinný zdroj neutronů v nekonečně velkém prostředí .....	137
5.2.1.3 Nekonečný rovinný zdroj neutronů v nekonečně velkém prostředí konečné tloušťky .....	137

5.2.2	Difusní délka .....	139
5.2.3	Reflexe neutronů .....	140
5.3	Zpomalování neutronů .....	142
5.3.1	Mechanismus pružných srážek neutronů s jádry (pružného rozptylu) .....	142
5.3.1.1	Laboratorní a těžišťový souřadnicový systém .....	143
5.3.1.2	Změna energie nadteplných neutronů .....	145
5.3.2	Zpomalování neutronů v neutrony neabsorbujícím a homogenním prostředí o nekonečně velkém objemu .....	147
5.3.2.1	Zpomalování neutronů ve vodíkovém, neutrony neabsorbujícím prostředí .....	148
5.3.2.2	Zpomalování neutronů v nekonečně velkém, neutrony neabsorbu- jícím a monojaderném prostředí s $A > 1$ .....	149
5.3.2.3	Zpomalování neutronů v nekonečně velkém, neutrony nepohlcu- jícím a polyjaderném prostředí s $A > 1$ .....	151
5.3.3	Zpomalování neutronů v neutrony absorbujícím a homogenním prostředí v nekonečně velkém objemu .....	152
5.3.3.1	Zpomalování neutronů v neutrony absorbujícím vodíkovém prostředí v nekonečně velkém objemu .....	152
5.3.3.2	Zpomalování neutronů v neutrony absorbujícím, nekonečně velikém prostředí s $A > 1$ .....	154
5.4	Prostorové rozložení neutronů různých energií při zpomalování a difuzi .....	155
5.4.1	Rovnice Fermiho stárnutí a difuze neutronů .....	156
5.4.2	Řešení rovnice Fermiho stárnutí a difuze neutronů .....	158
5.4.3	Doba života neutronu v reaktoru .....	159
5.4.4	Rozložení h.toku teplných neutronů vzniklých zpomalením rychlých neutronů .....	160
6.	ZÁKLADY TEORIE NEUTRONY NÁSOBÍCÍ SOUSTAVY .....	161
6.1	Homogenní tepelný reaktor bez reflektoru .....	161
6.1.1	Rovnice rozložení h.t.n. v homogenní, neutrony násobící soustavě .....	161
6.1.2	Kritická rovnice homogenního reaktoru bez reflektoru .....	164
6.1.3	Efektivní multiplikační součinitel neutronů v násobící soustavě .....	164
6.1.4	Materiálový a geometrický parametr .....	165
6.1.5	Prostorové rozložení h.t.n. v homogenní, neutrony násobící soustavě .....	167
6.1.6	Bilance neutronů v homogenní, kritické, neutrony násobící soustavě .....	168
6.1.7	Migrační délka neutronů .....	170
6.1.8	Výpočet kritického složení a kritické velikosti homogenního reaktoru velkého výkonu, bez reflektoru .....	171
6.2	Homogenní tepelný reaktor s reflektorem .....	174
6.2.1	Jednoskupinová teorie zpomalování neutronů .....	175
6.2.2	Dvouskupinová teorie zpomalování neutronů .....	177

6.2.3	Metoda více skupin neutronů .....	180
6.3	Heterogenní reaktor s reflektorem .....	181
6.3.1	Mikroskopická teorie heterogenního reaktoru .....	183
6.3.1.1	Absorbce rychlých neutronů v U 238 doprovázená štěpením .....	183
6.3.1.2	Zúřivý, rezonanční záchyt neutronů uranem .....	184
6.3.1.3	Heterogenisace neutrony násobící soustavy .....	185
6.3.1.4	Absorbce tepelných neutronů v uranu .....	187
6.3.1.5	Rozložení hustoty toku neutronů v mříži aktivní zóny .....	188
6.3.2	Makroskopická teorie heterogenního reaktoru .....	190
6.3.2.1	Teoretický výpočet kritických rozměrů heterogenního reaktoru .....	190
6.3.2.2	Experimentální výzkum kritické velikosti heterogenního reaktoru .....	191
7.	ZÁKLADY TEPELNÉ A HYDRAULICKÉ TEORIE REAKTORU .....	193
7.1	Uvolňování tepelné energie v jaderném reaktoru .....	194
7.2	Hydraulický výpočet primárního okruhu .....	196
7.2.1	Výpočet hydraulických a tlakových ztrát (odporů) v reaktoru ...	198
7.2.1.1	Součinitel tření $\lambda$ ve svazku hladkých tyčí podélně omývaných jednofázovým médiem .....	199
7.2.1.2	Součinitel tření $\lambda$ ve svazku tyčí s distančními žebry podélně omývaných jednofázovým médiem .....	200
7.2.1.3	Tlaková ztráta aktivní zóny vyplněné palivovými koulemi (vysokoteplotní, He chlazený reaktor) .....	200
7.2.1.4	Tlaková ztráta svazku kruhových tyčí omývaných dvoufázovým médiem - parovodní směsí .....	201
7.2.1.5	Tlaková ztráta v válcových kolektorech .....	202
7.2.2	Rozdělení průtoku chladiva v aktivní zóně reaktoru (VVER) ....	202
7.2.2.1	Vliv vstupního kolektoru na rychlostní profil v aktivní zóně .....	202
7.2.2.2	Vliv rychlostního profilu na vstupu do vstupního kolektoru ..	202
7.2.2.3	Vliv excentrického rychlostního profilu na vstupu do vstupního kolektoru .....	203
7.2.2.4	Vliv vířů na vstupu do aktivní zóny .....	203
7.2.2.5	Vliv osového víru ve vstupním kolektoru .....	203
7.2.2.6	Vliv rozdílné výšky vstupní a výstupní komory na rychlostní profil .....	204
7.2.2.7	Vliv výstupního kruhového kolektoru .....	204
7.2.2.8	Hydraulické profilování aktivní zóny .....	205
7.2.3	Rozdělení průtoku chladiva v souboru palivových elementů VVER (kazetě) .....	205
7.2.3.1	Vliv vstupního difusoru na proudění v kazetě .....	205
7.2.3.2	Vliv nosné (vstupní) mřížky na proudění v kazetě .....	206
7.2.3.3	Vliv mezityčového průřezu na proudění v kazetě .....	206
7.2.3.4	Vliv distančních mřížek na proudění v kazetě .....	206
7.2.4	Přenos dynamických efektů do souboru palivových elementů ....	207
7.2.5	Hydraulická charakteristika primárního okruhu .....	208

7.3 Přenos tepla v aktivní zóně reaktoru .....	209
7.3.1 Teplotní pole po průřezu palivového elementu .....	209
7.3.1.1 Ohřev teplotní pole po průřezu deskového palivového elementu .....	209
7.3.1.2 Teplotní pole po průřezu tyčového palivového elementu .....	209
7.3.1.3 Teplotní pole po průřezu trubkového palivového elementu .....	210
7.3.1.4 Teplotní pole po průřezu nestandardních palivových článků .....	211
7.3.2 Teplotní pole po délce palivového elementu .....	212
7.3.2.1 Ohřev teplotní pole po délce palivového elementu .....	213
7.3.2.2 Teplota povrchu po délce palivového elementu .....	216
7.3.2.3 Sdílení tepla v mezeře mezi palivem a povrchem palivového elementu .....	217
7.3.2.4 Teplota paliva po délce palivového elementu .....	218
7.3.3 Tepelněhydraulický výpočet souboru palivových elementů a aktivní zóny reaktoru chlazeného jednofázovým médiem .....	219
7.3.3.1 Určení pracovního tepelněhydraulického režimu reaktoru chlazeného tlakovou vodou .....	219
7.3.3.2 Krize sdílení tepla v reaktoru .....	222
7.3.3.3 Určení tepelněhydraulických poměrů v souboru tyčových palivových elementů .....	223
8. ZÁKLADY TEORIE KINETIKY A ŘÍZENÍ REAKTORU .....	228
8.1 Krátkodobé jevy časového chodu reaktoru .....	228
8.1.1 Časový chod reaktoru jen při působení okamžitých neutronů ....	228
8.1.2 Časový chod reaktoru při společném působení okamžitých a zpožděných neutronů .....	229
8.1.3 Vliv výše a znaménka reaktivity na časový chod reaktoru .....	232
8.1.4 Vliv teploty na časový chod reaktoru .....	234
8.2 Dlouhodobé jevy časového chodu reaktoru .....	236
8.2.1 Vyčerpávání štěpitelného paliva .....	236
8.2.2 Zamoření jaderného paliva štěpnými produkty .....	238
8.2.3 Kompenzace dlouhodobých změn reaktivity .....	239
8.3 Regulace jaderného reaktoru .....	240
8.3.1 Regulace reaktoru absorbcí .....	240
8.4 Příklady výsledků výpočtu kinetiky tlakovodního energetického reaktoru velkého výkonu .....	245
9. KONSTRUKČNÍ A STROJNÍ KOMPONENTY, REGULAČNÍ A MĚŘICÍ SYSTÉMY, STÍNĚNÍ A BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY JADERNÝCH REAKTORŮ .....	248
9.1 Palivové soubory jaderných reaktorů .....	251
9.1.1 Palivové elementy .....	251
9.1.1.1 Palivový materiál palivového elementu .....	253
9.1.1.2 Povlak palivového elementu .....	256

9.1.1.3 Spolehlivost palivových elementů rozvíjených typů jaderných energetických reaktorů .....	258
9.1.2 Konstrukční varianty palivových souborů .....	259
9.1.2.1 Palivové soubory PWR .....	259
9.1.2.2 Palivové soubory BWR .....	261
9.1.2.3 Palivové soubory HTGR .....	261
9.1.2.4 Palivové soubory PHWR .....	262
9.1.2.5 Palivové soubory LWGR .....	262
9.1.2.6 Palivové soubory FBR .....	263
9.2 Tlakové nádoby jaderných reaktorů .....	265
9.2.1 Ocelové tlakové nádoby jaderných reaktorů .....	266
9.2.1.1 Degradace konstrukčních materiálů ocelových tlakových nádob .....	270
9.2.1.2 Některé aspekty pevnostního výpočtu a projekčního návrhu tlakových ocelových reaktorových nádob .....	272
9.2.2 Betonové tlakové nádoby jaderných reaktorů .....	276
9.3 Vnitřní reaktorové konstrukce .....	277
9.4 Zařízení na výměnu paliva .....	279
9.4.1 Zavážecí stroje lehkvodních reaktorů .....	280
9.4.2 Zavážecí stroje rychlých reaktorů .....	281
9.4.3 Zavážecí stroje plynem chlazených reaktorů .....	281
9.5 Zařízení pro regulaci a kompenzaci jaderných reaktorů .....	283
9.6 Měřicí systém jaderného reaktoru .....	287
9.7 Stínění jaderných reaktorů .....	289
9.8 Bezpečnostní systémy a jaderná bezpečnost jaderných reaktorů a elektráren .....	292
10. ZÁVĚR .....	297
Literatura .....	300