

OBSAH

	Předmluva	13
1.	Úvod	17
1.1	Význam energetiky a poslání jaderné energie	17
1.2	Jaderná energie	17
1.2.1	Podstata jaderné energie	17
1.2.2	Způsoby uvolňování jaderné energie	18
1.3	Jaderný reaktor	19
1.3.1	Řetězová štěpná reakce v jaderném reaktoru	19
1.3.2	Způsoby řízení řetězové štěpné reakce	20
1.3.3	Jaderný reaktor jako funkční celek	20
1.4	Jaderná elektrárna	21
1.4.1	Jaderná elektrárna jako funkční celek	21
1.4.2	Palivová a energetická bilance jaderné elektrárny	23
1.4.3	Jaderná energetika	25
1.4.4	Širší význam jaderné energetiky	26
1.5	Historický vývoj jaderné energetiky	27
1.5.1	Přípravné období	27
1.5.2	Počátky jaderné energetiky	28
1.5.3	Počátky jaderné energetiky v Československu	29
1.5.4	Hlavní tendence současného vývoje jaderné energetiky ve světě	31
	Literatura	32
2.	Fyzika jaderných reaktorů	34
2.1	Základní poznatky z jaderné fyziky	36
2.1.1	Atomové jádro	36
2.1.2	Vlastnosti stabilních atomových jader	37
2.1.3	Vlastnosti nestabilních atomových jader	39
2.1.4	Interakce fotonového pole s látkou	42
2.1.5	Interakce elektronů s látkou	44
2.1.6	Interakce nabitých částic s látkou	45
2.1.7	Interakce neutronového pole s látkou	46
2.1.8	Štěpení atomových jader	49
2.1.9	Transurany	51
2.2	Fyzika aktivní zóny	52
2.2.1	Řetězová reakce	52
2.2.2	Multiplikační koeficient	53
2.2.3	Ovlivnění multiplikačního koeficientu	54
2.2.4	Reaktivita reaktoru	54
2.2.5	Kritický stav	55
2.2.6	Materiálový a geometrický parametr	57
2.2.7	Multiplikační koeficient rychlých neutronů	57
2.2.8	Rezonanční absorpce neutronů v reaktoru	59
2.2.9	Koeficient tepelného využití	59
2.2.10	Ostatní fyzikální parametry míře	61

2.2.11	Otrava reaktoru	63
2.2.12	Zamoření reaktoru	64
2.2.13	Výhoření paliva	65
2.2.14	Výpočet účinných průřezů	66
2.2.15	Heterogenní výpočet aktivní zóny	69
2.2.16	Rychlé reaktory	69
2.3	Fyzika stínění	71
2.3.1	Zdroje neutronů	71
2.3.2	Zdroje fotonů	72
2.3.3	Zeslabení fotonového pole průchodem látkou	73
2.3.4	Distribuce neutronů v ochranách	73
2.3.5	Radiační ohřev	75
2.3.6	Výpočetní metody	75
	Literatura	77
3.	Odvod tepla z jaderných reaktorů	78
3.1	Zdroje tepla v jaderném reaktoru	82
3.2	Vedení tepla	83
3.3	Odvod tepla z palivových elementů	86
3.3.1	Rozdělení teplot ve válcovém palivovém elementu	86
3.3.2	Rozdělení teplot v obdélníkovém žebří stálého průřezu	89
3.4	Odvod tepla z kanálů aktivní zóny	90
3.5	Proudění a přestup tepla v palivových kanálech	95
3.5.1	Přenos tepla v jednofázovém proudu chladiva	95
3.5.2	Přenos tepla ve dvoufázovém proudu chladiva	98
3.5.3	Rozdělení tlaku v palivových kanálech	99
3.5.4	Experimenty v oblasti proudění a přenosu tepla	102
3.6	Mezní tepelné technické parametry aktivní zóny	103
3.7	Návrhové tepelné technické parametry jaderného reaktoru	107
3.8	Zvyšování výkonu a tepelné technických parametrů aktivní zóny	108
	Literatura	112
4.	Regulace jaderných reaktorů	113
4.1	Kinetika reaktoru	115
4.1.1	Rovnice kinetiky reaktoru	115
4.1.2	Nadkritický stav na okamžitých neutronech	116
4.1.3	Podkritický stav	116
4.1.4	Kritický stav	118
4.1.5	Rovnice kinetiky reaktoru s uvažováním zpožděných neutronů	118
4.1.6	Řešení rovnic kinetiky reaktoru pro změnu δk skokem	119
4.1.7	Řešení rovnic kinetiky reaktoru pro sinusovou změnu δk	121
4.2	Automatická regulace reaktoru	123
4.2.1	Reaktor jako člen regulačního obvodu	123
4.2.2	Zpětná vazba reaktoru	123
4.2.3	Zpětná vazba teplotního součinitele	123
4.2.4	Zpětná vazba otravy	126
4.2.5	Automatická regulace výkonu reaktoru	129
4.2.6	Blokové schéma automatické regulace reaktoru	129
4.2.7	Syntéza regulačního obvodu	130
4.2.8	Přechodové jevy při nejmenovitých hladinách výkonu reaktoru	132
	Literatura	133
5.	Materiály jaderných reaktorů a speciální technologie	134
5.1	Vliv pole reaktorového záření na vlastnosti materiálů	136
5.1.1	Interakce neutronů s krystalickou mřížkou	136
5.1.2	Vliv záření na korozi	141

5.2	Štěpné a množivé materiály	142
5.2.1	Základní požadavky na jaderná paliva	143
5.2.2	Kovová jaderná paliva	143
5.2.3	Keramická paliva	146
5.2.4	Vlastnosti	148
5.2.5	Technologie výroby čistých kovů	151
5.2.6	Technologie výroby kovových materiálů	154
5.2.7	Technologie výroby keramických materiálů	156
5.3	Materiály pokrytí palivových elementů	157
5.3.1	Hliník a jeho slitiny	158
5.3.2	Hořčík a jeho slitiny	158
5.3.3	Zirkonium a jeho slitiny	159
5.3.4	Berylium	162
5.3.5	Austenitické oceli a slitiny niklu	163
5.4	Moderátory a reflektory	165
5.4.1	Těžká voda	166
5.4.2	Grafit	167
5.4.3	Berylium	168
5.4.4	Polyfenyly	168
5.5	Chladiwa	168
5.5.1	Plynná chladiwa	169
5.5.2	Kapalná chladiwa	170
5.5.3	Roztavené soli	170
5.5.4	Tekuté kovy	170
5.6	Absorpční materiály	171
5.6.1	Požadované vlastnosti	172
5.6.2	Používané absorbery	172
5.6.3	Materiály obsahující bór	173
5.6.4	Hafnium	174
5.6.5	Kadmium	174
5.6.6	Vzácné zeminy	174
5.7	Oceli pro tlakové nádoby	175
5.7.1	Výběr oceli	175
5.7.2	Specifikace používaných ocelí	176
5.7.3	Faktory mající vliv na vlastnosti ocelí	178
5.7.4	Odolnost používaných ocelí proti porušení	181
5.7.5	Vliv reaktorového záření na změnu vlastností	182
5.8	Nekovové materiály	185
5.8.1	Betony	186
5.8.2	Plasty a pryže	188
	Literatura	191
6.	Koncepce jaderných energetických reaktorů	193
6.1	Rozdělení jaderných reaktorů	193
6.2	Vlastnosti energetických reaktorů	199
6.2.1	Jednotkové výkony energetických reaktorů	199
6.2.2	Srovnání nejdůležitějších vlastností základních typů energetických reaktorů	200
6.3	Charakteristika koncepce základních typů energetických reaktorů	202
6.3.1	Plynem chlazené grafitové reaktory na přírodní uran (GCR)	202
6.3.2	Zdokonalené plynem chlazené grafitové reaktory na obohacený uran (AGR)	206
6.3.3	Vysokoteplotní plynem chlazené grafitové reaktory na obohacený uran (HTGR)	209
6.3.4	Lehkou vodou chlazené grafitové reaktory na obohacený uran (LWGR)	213
6.3.5	Lehkou vodou moderované a chlazené reaktory na obohacený uran (LWR)	217

6.3.6	Těžkou vodou moderované reaktory (HWR)	223
6.3.7	Tekutými kovy chlazené rychlé množivé reaktory (LMFBR)	228
6.4	Postup návrhu jaderného energetického reaktoru	232
6.4.1	Volba koncepce energetického reaktoru	232
6.4.2	Metodický přístup k návrhu jaderného reaktoru	233
6.4.3	Metodický postup návrhu jaderného reaktoru	234
6.4.4	Metodický postup tepelné technického výpočtu jaderného reaktoru	235
6.4.5	Metodický postup fyzikálního výpočtu jaderného reaktoru	236
	Literatura	238
7.	Konstrukční části jaderných energetických reaktorů	240
7.1	Palivové články	241
7.1.1	Základní požadavky na palivový článek	242
7.1.2	Palivový element	242
7.1.3	Palivový článek	246
7.1.4	Palivové články plynem chlazených reaktorů	247
7.1.5	Palivové články těžkovodních reaktorů	255
7.1.6	Palivové články lehkodvodních reaktorů	258
7.1.7	Palivové články rychlých reaktorů chlazených sodíkem	263
7.1.8	Výroba palivových článků	270
7.2	Palivové kanály	272
7.2.1	Konstrukce palivového kanálu	273
7.2.2	Konstrukce charakteristických palivových kanálů	277
7.3	Vnitřní transport jaderného paliva	280
7.3.1	Vnitřní transport paliva při kampaňové výměně	281
7.3.2	Vnitřní transport paliva při kontinuální výměně	282
7.4	Zařízení pro vnější transport paliva	283
7.4.1	Různé způsoby výměny paliva v reaktoru	283
7.4.2	Schéma zařízení vnějšího transportu	284
7.4.3	Zavázeční stroje jaderných energetických reaktorů	289
7.4.4	Mechanismy zavázečního stroje první čs. jaderné elektrárny	296
7.4.5	Popisy některých typických uspořádání zařízení pro výměnu paliva	300
7.5	Zařízení pro regulaci a kompenzaci reaktorů	307
7.5.1	Požadavky na orgány řízení	308
7.5.2	Absorpční části řídicích tyčí	312
7.5.3	Pohonné mechanismy řídicích tyčí	313
7.5.4	Hnačí jednotky	314
7.5.5	Konkrétní provedení typických řídicích mechanismů	316
7.6	Tlakové nádoby	319
7.7	Tlakové nádoby ocelové	319
7.7.1	Vývoj ocelových tlakových nádob	319
7.7.2	Provozní podmínky ocelových tlakových nádob	321
7.7.3	Materiál a pevnost ocelových tlakových nádob	326
7.7.4	Projekt tlakové nádoby	339
7.7.5	Konstrukční provedení tlakových nádob tlakovodních reaktorů	340
7.7.6	Konstrukční provedení hlavních uzlů tlakových nádob tlakovodních reaktorů	343
7.7.7	Konstrukční provedení tlakových nádob varných reaktorů	344
7.7.8	Konstrukční provedení tlakové nádoby reaktoru 1. čs. jaderné elektrárny	346
7.8	Tlakové nádoby z předpjatého betonu	346
7.8.1	Vývoj tlakových nádob z předpjatého betonu	348
7.8.2	Koncepční řešení	350
7.8.3	Konstrukční provedení některých uzlů	352
7.8.4	Principiální postup při výstavbě	354
7.9	Měření v jaderném reaktoru	355
7.9.1	Podmínky provádění fyzikálních měření v energetickém reaktoru	357

7.9.2	Principy měření neutronového toku a periody reaktoru	358
7.9.3	Měření „in core“	362
7.9.4	Speciální provozní měření	363
	Literatura	366
8.	Koncepce jaderných elektráren	368
8.1	Základní hlediska pro výběr staveniště jaderné elektrárny	368
8.2	Celková dispoziční koncepce jaderných elektráren	370
8.2.1	Hlavní funkční celky jaderných elektráren	370
8.2.2	Seskupování zařízení podle funkce, spojů, radioaktivity	370
8.2.3	Hlavní výrobní blok	371
8.2.4	Složité radioaktivních odpadů	374
8.3	Dispoziční koncepce hlavního výrobního bloku	374
8.3.1	Hermetizace proti šíření radioaktivity	374
8.3.2	Dispoziční řešení vzhledem k montáži, údržbě a provozu	375
8.3.3	Systém kobek, vazba stavby a zařízení	375
8.3.4	Záchytné budovy	376
8.3.5	Betonové tlakové nádoby jaderných reaktorů	377
8.3.6	Integrované řešení primárního okruhu	379
	Literatura	379
9.	Schémat jaderných elektráren	380
9.1	Tepelná schémata jaderných elektráren	382
9.1.1	Celková tepelná účinnost jaderné elektrárny a cesty jejího zvyšování	384
9.1.2	Tepelná schémata jaderných elektráren s reaktory chlazenými plynem	389
9.1.3	Tepelná schémata jaderných elektráren s reaktory chlazenými vodou	393
9.1.4	Tepelná schémata jaderných elektráren s reaktory chlazenými tekutými kovy	400
9.1.5	Tepelná schémata jaderných elektráren s reaktory chlazenými jinými chladivy	401
9.2	Technologická schémata pomocných okruhů jaderných elektráren	402
9.2.1	Systémy pro čištění cirkulujícího chladiva	402
9.2.2	Systémy zachytu a úpravy unikajícího chladiva	407
9.2.3	Systém kompenzace tepelného rozšíření chladiva	408
9.2.4	Systémy inertního plynu	409
9.2.5	Ostatní pomocné systémy	410
9.3	Regulace jaderných elektráren	410
9.3.1	Způsoby regulace jaderných elektráren	411
9.3.2	Dynamické vlastnosti jaderné elektrárny	414
9.3.3	Automatická regulace výkonu jaderné elektrárny	418
9.3.4	Schémat regulace jaderných elektráren	419
9.4	Měření na jaderných elektrárnách	424
9.4.1	Systém měření na reaktoru	425
9.4.2	Organizace technických měření na jaderné elektrárně	426
9.5	Systémy nouzového chlazení reaktoru	427
	Literatura	429
10.	Strojní zařízení jaderných elektráren	430
10.1	Výměníky tepla	430
10.1.1	Výměníky tepla u reaktorů chlazených plynem	432
10.1.2	Výměníky tepla u reaktorů chlazených tlakovou vodou	439
10.1.3	Výměníky tepla u reaktorů chlazených tekutými kovy	443
10.2	Oběhová dmýhadla	449
10.2.1	Všeobecné požadavky	449
10.2.2	Volba typu oběhového dmýhadla	450

10.2.3	Plynem mazaná ložiska	452
10.2.4	Těsnění hřídelů oběhových dmýchadel	455
10.2.5	Pohon oběhových dmýchadel	458
10.2.6	Konstrukční provedení některých oběhových dmýchadel	459
10.3	Oběhová čerpadla	463
10.3.1	Použití oběhových čerpadel	463
10.3.2	Zapouzdřená odstředivá čerpadla	463
10.3.3	Čerpadla s těsněním hřídele	465
10.3.4	Membránová čerpadla	467
10.3.5	Čerpadla na tekuté kovy	468
10.4	Potrubí a armatury	474
10.4.1	Potrubí	474
10.4.2	Armatury	476
10.5	Parní turbíny	480
10.5.1	Zvláštnosti turbín na sytou páru	480
10.5.2	Příklady provedení turbín pro konvenční a jaderné elektrárny	496
10.6	Plynové turbíny	496
10.6.1	Dvouokruhové schéma s parní turbínou v sekundárním okruhu	496
10.6.2	Jednookruhové schéma s plynovou turbínou v přímém okruhu s reaktorem	498
10.6.3	Druh a vlastnosti plynů pro chlazení vysokoteplotních reaktorů	499
10.6.4	Porovnání některých parametrů parní a plynové turbíny	500
	Literatura	501
11.	Provoz jaderných elektráren	503
11.1	Provozní vlastnosti jaderných elektráren	503
11.1.1	Stručný souhrn světových zkušeností	503
11.1.2	Zapojení jaderných elektráren do energetického systému	504
11.1.3	Provozní zvláštnosti jaderných elektráren	505
11.2	Vyzkoušení a první spouštění reaktoru a jaderné elektrárny	506
11.2.1	Postup montážních a funkčních zkoušek	506
11.2.2	Fyzikální spouštění jaderného reaktoru	507
11.2.3	Energetické spouštění jaderné elektrárny	508
11.2.4	Přejímací zkoušky a garancie	509
11.3	Provoz při ustáleném a proměnném zatížení	509
11.3.1	Organizace provozu	509
11.3.2	Obsluha a údržba zařízení	510
11.3.3	Výměna paliva v jaderném reaktoru	511
11.3.4	Dozimetrie v jaderné elektrárně	513
11.3.5	Provozní pružnost jaderné elektrárny	515
11.3.6	Provozní spolehlivost jaderné elektrárny	515
11.4	Uvádění do chodu a doběh jaderné elektrárny	517
11.4.1	Najíždění na provozní parametry	517
11.4.2	Záložní zdroje energie	517
11.4.3	Odstavování a doběh elektrárny	519
11.4.4	Dochlazování reaktoru	519
11.5	Poruchy provozu a opravy zařízení	520
11.5.1	Předpokládané poruchy a zásady jejich řešení v projektu	520
11.5.2	Aktivace a kontaminace	521
11.5.3	Dekontaminace a opravy zařízení primárního okruhu	521
11.6	Vliv provozu na okolí jaderné elektrárny	522
11.6.1	Vypouštění radioaktivních odpadů do okolí	524
11.6.2	Ukládání radioaktivních odpadů	525
	Literatura	526

12.	Palivové cykly a ekonomika jaderné energetiky	527
12.1	Palivové cykly jaderné energetiky	528
12.1.1	Štěpné a plodivé materiály	528
12.1.2	Palivo pro jaderné reaktory	529
12.1.3	Typy palivových cyklů	533
12.2	Ekonomika jaderných elektráren	537
12.2.1	Investiční náklady	537
12.2.2	Náklady na palivo	540
12.2.3	Provozní náklady	544
12.2.4	Celkové výrobní náklady	545
12.3	Jaderná energetika jako součást světové energetiky	549
12.3.1	Místo jaderné energetiky ve světovém energetickém hospodářství	549
12.3.2	Přímé přeměny jaderné energie na elektrickou	550
12.3.3	Termojaderná energie	552
12.3.4	Jaderná energetika jako součást československé energetiky	554
	Literatura	555

Přílohy

P-1.	Popis první čs. jaderné elektrárny A-1	557
P-1.1	Koncepce elektrárny A-1	557
P-1.2	Umístění elektrárny A-1 a její situační plán	558
P-1.3	Základní technické údaje elektrárny A-1	560
P-1.4	Tepelné schéma a technologické okruhy elektrárny A-1	560
P-1.4.1	Tepelné schéma	560
P-1.4.2	Okruhy chladicího plynu	561
P-1.4.3	Okruhy moderátoru	561
P-1.4.4	Transport jaderného paliva	562
P-1.4.5	Sekundární okruh	562
P-1.4.6	Ostatní okruhy a pomocná zařízení	563
P-1.5	Elektrické schéma a principy řízení elektrárny A-1	563
P-1.5.1	Elektrické schéma	563
P-1.5.2	Principy řízení	563
P-1.5.3	Havarijní ochrana elektrárny	565
P-1.6	Popis vybraných zařízení elektrárny A-1	566
P-1.6.1	Reaktor	566
P-1.6.2	Zavázecí stroj	569
P-1.6.3	Parní generátor	569
P-1.6.4	Oběhová dmýchadla	570
P-1.7	Přehled dalších informací o elektrárně A-1, obsažených v knize	571
P-1.8	Přehled dosavadního provozu elektrárny A-1	571
	Literatura	572
P-2.	Popis druhé čs. jaderné elektrárny V-1	573
P-2.1	Koncepce elektrárny V-1	573
P-2.2	Umístění elektrárny V-1 a její situační plán	576
P-2.3	Základní technické údaje elektrárny V-1	578
P-2.4	Tepelné schéma a technologické okruhy elektrárny V-1	579
P-2.4.1	Tepelné schéma	579
P-2.4.2	Primární okruh	579
P-2.4.3	Transport jaderného paliva	580
P-2.4.4	Sekundární okruh	580
P-2.5	Elektrické schéma a principy řízení	580
P-2.5.1	Elektrické schéma	580
P-2.5.2	Principy řízení	581
P-2.5.3	Havarijní ochrana elektrárny	581

P-2.6	Popis vybraných zařízení	581
P-2.6.1	Reaktor	581
P-2.6.2	Parní generátor	585
P-2.6.3	Parní turbína	585
P-2.6.4	Přehled dalších informací	585
	Literatura	586
P-3.	Příklad výpočtu jaderné elektrárny velkého výkonu s tlakovodním reaktorem	587
P-3.1	Výchozí charakteristiky	588
P-3.2	Volba základních teplotních, geometrických a fyzikálních parametrů	589
P-3.3	Fyzikální výpočet reaktoru	591
P-3.3.1	Výpočet fyzikálních charakteristik mříže	591
P-3.3.2	Makrovýpočet aktivní zóny	595
P-3.4	Výpočet základních tepelně technických parametrů reaktoru	595
P-3.5	Výpočet průběhu teplot chladiva, pokrytí a paliva v nejvíce zatíženém palivovém článku	597
P-3.5.1	Jmenovité poměry	597
P-3.5.2	Výpočet teplot v „horkém“ kanálu	601
P-3.5.3	Určení bezpečnosti vzhledem ke kritickému tepelnému toku	602
P-3.6	Výpočet tlakové ztráty nejvíce zatíženého palivového článku	604
P-3.7	Výpočet parametrů sekundárního okruhu elektrárny	604
P-4.	Příklad výpočtu demonstrační jaderné elektrárny malého výkonu s rychlým reaktorem	609
P-4.1	Výchozí charakteristiky	610
P-4.2	Volba základních tepelně technických, geometrických a fyzikálních parametrů	613
P-4.3	Výpočet fyzikálních parametrů reaktoru	613
P-4.3.1	Výpočet kritických rozměrů	614
P-4.3.2	Výpočet rozložení zdrojů tepla v aktivní zóně	614
P-4.3.3	Výpočet složek reaktivity a účinnosti řídících tyčí	615
P-4.4	Výpočet základních tepelně technických parametrů reaktoru	616
P-4.5	Výpočet průběhu teplot chladiva, pokrytí a paliva v nejvíce zatíženém palivovém článku	618
P-4.5.1	Jmenovité poměry	618
P-4.5.2	Poměry v „horkém“ kanálu	620
P-4.6	Výpočet tlakové ztráty v nejvíce zatíženém palivovém článku	621
P-4.7	Tepelné schéma a ostatní tepelně technické parametry elektrárny	623
	Literatura	624
P-5.	Některé zvláštní jednotky jaderné a reaktorové fyziky	625
P-5.1	Jednotky normalizované v Československu	625
P-5.2	Jednotky v Československu nenormalizované	626
	Rejstřík	629