

Úvod	3
1. Vývin tepla v jaderných reaktorech	5
1.1 Energie uvolněná při štěpení	5
1.2 Energie využitelná v jaderném reaktoru	7
1.3 Vývin tepla v aktivní zóně reaktoru	9
1.3.1 Součinitele vyrovnání vývinu tepla v aktivní zóně	9
1.3.2 Součinitele nerovnoměrnosti vývinu tepla	12
1.3.3 Funkce vývinu tepla	13
1.3.4 Vývin tepla na jednotku délky palivové tyče	14
1.4 Vliv reflektoru na prostorové rozložení vývinu tepla	15
1.4.1 Jednogrupové přiblížení - "ekvivalentní reaktor"	15
1.4.2 Axiální funkce vývinu tepla v reaktoru se symetrickými axiálními reflektory	18
1.4.3 Axiální funkce vývinu tepla v reaktoru s asymetrickými reflektory	21
1.5 Vliv absorpčních elementů na prostorové rozložení vývinu tepla	22
1.5.1 Vliv plně zasunuté centrální absorpční tyče na radiální rozložení vývinu tepla	22
1.5.2 Částečně zasunuté tyče v pravidelné mříži	26
1.5.3 Vliv nerovnoměrného vyhoření paliva	31
1.6 Vliv dutin a mezer na prostorové rozložení vývinu tepla	31
1.7 Radiální rozložení vývinu tepla při kampaňové výměně paliva	32
1.8 Vliv xenonu na prostorový vývin tepla	33
1.8.1 Výchozí rovnice	34
1.8.2 Rozložení vývinu tepla při změně provozního režimu reaktoru	35
1.8.3 Xenonové oscilace	35
1.8.4 Xenonové oscilace v reaktoru VVER	36
1.9 Chemická reakce povlaku s vodní parou jako zdroj tepla	37
1.9.1 Kinetika chemické reakce	38
1.9.2 Energetické zabarvení chemické reakce	39
1.9.3 Časový průběh oxidace povlaků při konstantních parametrech ..	40
1.10 Vývin tepla v reaktorech VVER	43
1.10.1 Nerovnoměrnosti ve výkonu palivových kazet	43
1.10.2 Nerovnoměrnosti ve výkonu palivových tyčí	46
1.11 Nestacionární vývin tepla v jaderných reaktorech	48
1.12 Zbytkový vývin tepla po odstavení reaktoru	48
1.12.1 Dobíhající štěpná řetězová reakce	49
1.12.2 Radioaktivní rozpad produktů štěpení	49
1.12.3 Radioaktivní rozpad izotopů vzniklých radiačním zachytem neutronů	50
1.12.4 Zbytkový vývin tepla	51
1.12.5 Zbytkový vývin tepla při havárii s tavením aktivní zóny	51
Kontrolní otázky k 1. kapitole	53
2. Vedení tepla v palivových elementech	55
2.1 Rovnice vedení tepla	55

2.1.1	Obecná diferenciální rovnice vedení tepla	55
2.1.2	Stacionární tvar rovnice vedení tepla ve válcové geometrii ...	58
2.1.3	Integrální tepelná vodivost	59
2.2	Tepelně fyzikální vlastnosti palivových elementů reaktorů VVER	61
2.2.1	Chování paliva v provozních podmínkách	62
2.2.2	Chování paliva v extrémních podmínkách	64
2.2.3	Tepelně fyzikální vlastnosti UO_2	66
2.2.4	Tepelně fyzikální vlastnosti povlaku	70
2.3	Vedení tepla ve válcové tyči	71
2.3.1	Radiální rozložení teplot v palivové tyči s proměnným vývinem tepla	71
2.3.2	Radiální rozložení teplot v palivové tabletě z UO_2 s centrálním otvorem	75
2.3.3	Radiální rozložení teplot v palivové tabletě z UO_2 s proměnným vývinem tepla	76
2.4	Rovnice vedení tepla v bezrozměrném tvaru	78
2.5	Lokální tavení palivových tablet	83
2.5.1	Dosažení teploty tavení v centru palivové tablety	83
2.5.2	Roztavení části palivové tablety (q_1 a λ_{UO_2} v roztavené a tuhé části stejné)	83
2.5.3	Roztavení části palivové tablety (q_1 a λ_{UO_2} se v roztavené části liší od hodnot v tuhé části)	85
2.6	Vedení tepla v povlaku palivové tablety	89
2.6.1	Vedení tepla v povlaku	90
2.6.2	Aproximace teplotního rozložení v povlaku lineárním průběhem	91
	Kontrolní otázky ke 2. kapitole	92
3.	<u>Sdílení tepla v mezeře mezi palivem a povlakem</u>	93
3.1	Součinitel sdílení tepla v mezeře palivo-povlak	93
3.1.1	Vedení tepla v plynové náplni	94
3.1.2	Velikost mezery δ	96
3.1.3	Přímý styk paliva a povlaku	97
3.1.4	Přenos tepla sáláním	100
3.2	Tepelně fyzikální konstanty	100
3.2.1	Tepelná vodivost plynové náplně	101
3.2.2	Teplotní dilatace paliva a povlaku	103
3.2.3	Denzifikace (zhuňování) paliva	103
3.2.4	Poměrná emisivita	104
3.3	Součinitel přenosu tepla v mezeře palivo-povlak PČ reaktoru VVER	104
3.3.1	Čerstvé palivo	104
3.3.2	Vyhořelé palivo	106
3.3.3	Závislost součinitele přenosu tepla v mezeře na lineárním výkonu palivové tyče	109
	Kontrolní otázky ke 3. kapitole	110
4.	<u>Přestup tepla</u>	111
4.1	Jednofázové proudění	112
4.1.1	Teorie podobnosti	112
4.1.2	Konvektivní přestup tepla (kapaliny a plyny)	115
4.1.3	Konduktivní přestup tepla (tekuté kovy)	120

4.2	Dvoufázové proudění	121
4.2.1	Režim vyvinutého bublinkového varu	123
4.2.2	Bublinkový var	125
4.2.3	Krize varu 1. druhu	125
4.2.4	Přechodový blánový var	133
4.2.5	Stabilní blánový var	133
4.3	Přestup tepla v reaktorech VVER	135
	Kontrolní otázky ke 4. kapitole	138
5.	<u>Stacionární teplotní pole v palivovém kanále</u>	139
5.1	Energetická rovnice proudícího chladiva	139
5.2	Stacionární teplotní pole ve dvousložkovém palivovém kanále se sinusovým vývinem tepla	142
5.2.1	Axiální průběh teploty chladiva	143
5.2.2	Axiální průběh teploty povrchu palivového článku	144
5.2.3	Axiální průběh teploty v ose palivové tyče	145
5.2.4	Axiální průběh teploty v ose palivové tyče - jednovrstvový model	146
5.2.5	Maximální teplota na povrchu palivové tyče	147
5.2.6	Maximální teplota v ose palivové tyče	149
5.3	Prstencový palivový článek	150
5.3.1	Prstencový palivový článek s vnitřním i vnějším odvodem tepla	150
5.3.2	Palivový kanál s dutým palivovým článkem jako Fieldova trubka	153
5.4	Podobnost teplotních polí (dvousložkový, jednovrstvový model)	155
5.4.1	Bezrozměrné charakteristiky palivového kanálu	156
5.4.2	Teplotní pole v reaktoru s asymetrickými axiálními reflektory	160
5.4.3	Vliv použitého chladiva na teplotní pole v aktivní zóně	162
5.5	Var v palivovém kanále	164
5.5.1	Stacionární rozložení teplot	164
5.5.2	Minimální kritický tepelný poměr	166
	Kontrolní otázky k 5. kapitole	168
6.	<u>Hydrodynamika aktivní zóny</u>	170
6.1	Tlaková ztráta v palivovém kanále	170
6.1.1	Tření teplotnosné látky v palivovém kanále	171
6.1.2	Místní hydraulické odpory	174
6.1.3	Tlaková ztráta na urychlení chladiva	174
6.1.4	Hydrostatický tlak	176
6.2	Celková tlaková ztráta a distribuce chladiva aktivní zónou	176
6.2.1	Tlaková ztráta v aktivní zóně s nulovým výkonem	177
6.2.2	Tlaková ztráta v aktivní zóně s uniformní distribucí chladiva	179
6.2.3	Neuniformní distribuce chladiva aktivní zónou	180
6.2.4	Dvoufázové proudění	184
6.3	Hydrodynamika reaktorů typu VVER	185
6.3.1	Vliv na konstrukci vnitřních částí reaktoru	185
6.3.2	Promíchávání chladiva	186
6.3.3	Hydraulické charakteristiky	187
	Kontrolní otázky k 6. kapitole	189

7. <u>Teorie horkého kanálu</u>	189
7.1 Podstata teorie horkého kanálu	189
7.2 Dílčí součinitele horkého kanálu	191
7.2.1 Nukleární faktory	191
7.2.2 Inženýrské faktory	191
7.3 Součinitele horkého kanálu	192
7.3.1 Kumulativní metoda	192
7.3.2 Statistický přístup k teorii horkého kanálu	194
7.4 Součinitele horkého kanálu tlakovodních reaktorů	197
7.5 Teploty v horkém kanále	198
Kontrolní otázky k 7. kapitole	199
8. <u>Termohydraulický výpočet reaktoru</u>	200
8.1 Základní úlohy termohydraulického výpočtu	200
8.1.1 Omezující kritéria maximálně přípustného tepelného výkonu re- aktoru	201
8.1.2 Maximálně přípustný tepelný výkon reaktoru	202
8.1.3 Maximálně přípustný tepelný výkon reaktorů typu VVER	204
8.1.4 Termohydraulický výpočet reaktoru typu VVER	205
8.1.5 Možnosti zvyšování jednotkového výkonu VVER	207
8.2 Optimální strategie výměny paliva v tlakovodních reaktorech	209
8.2.1 Metody výměny a přemísťování paliva v tlakovodních reaktorech	209
8.2.2 Stanovení optimální strategie výměny a přemísťování paliva ...	211
8.2.3 Optimalizace vnitřního palivového cyklu	213
8.2.4 Optimalizace vnitřního palivového cyklu reaktorů typu VVER	214
Kontrolní otázky k 8. kapitole	216
Dodatek: Besselovy funkce	217
Definice a rozměr použitých symbolů	222
Použitá literatura	229