

Obsah

Předmluva	1
1. Přepřacování vyhořelých jaderných paliv	3
1.1. Historický úvod	3
1.2. Minulé i současné koncepce nakládání s vyhořelým jaderným palivem	5
1.3. Technologické postupy zpracování vyhořelého jaderného paliva	7
1.3.1. Chlazení vyhořelého paliva a jeho složení	7
1.3.2. Základní aspekty procesu přepřacování vyhořelého jaderného paliva	11
1.3.2.1. Separace U, Pu, Th a dalších užitečných složek	11
1.3.2.2. Podkritičnost systému	12
1.3.2.3. Problematika vysoké radioaktivity a bezpečnosti práce	14
1.3.2.4. Problematika odpadů	15
1.3.3. Přehled vývoje technologických postupů zpracování vyhořelého jaderného paliva	16
1.3.3.1. Úvod	16
1.3.3.2. Mechanické metody odstraňování povlakových materiálů	17
1.3.3.3. Chemické metody odstraňování povlakových materiálů	17
1.3.3.3.1. Úvod	17
1.3.3.3.2. Hliníkové povlaky	18
1.3.3.3.3. Hořčíkové povlaky	18
1.3.3.3.4. Zr - povlaky	18
1.3.3.3.5. Povlaky z nerez - ocelí	19
1.3.3.3.6. Grafitové a siliciumkarbidové povlaky	19
1.3.3.3.7. Elektrochemické rozpouštění	19
1.3.3.3.8. Pyrochemické a pyrometalurgické metody	20
1.3.3.4. Metody a chemismus rozpouštění vyhořelého jaderného paliva	20
1.3.3.4.1. Úvod	20
1.3.3.4.2. Palivo na bázi kovového uranu	21
1.3.3.4.3. Palivo na bázi UO ₂ (reaktorů LWR)	21
1.3.3.4.4. Palivo na bázi UO ₂ + PuO ₂ (reaktorů FBR, LMFBR)	22
1.3.3.4.5. Palivo na bázi Th - U (reaktorů HTGR)	23
1.3.3.5. Principy technologických postupů rafinace vyhořelého jaderného paliva	23
1.3.3.5.1. Srážecí procesy	23
1.3.3.5.1.1. Úvod	23
1.3.3.5.1.2. BiPO ₄ - proces	24
1.3.3.5.1.3. Fluorido - acetátový proces	24
1.3.3.5.2. REDOX - proces	25
1.3.3.5.3. TRIGLY - proces	25
1.3.3.5.4. BUTEX - proces	25
1.3.3.5.5. PUREX - proces	26
1.3.3.5.5.1. Úvod	26
1.3.3.5.5.2. Úprava složení roztoku	26
1.3.3.5.5.3. Společná extrakce U(VI) a Pu(IV)	27
1.3.3.5.5.4. Selektivní reextrakce Pu	27
1.3.3.5.5.5. Reextrakce uranu	28

1.3.3.5.5.6.	Čištění plutoniové frakce	29
1.3.3.5.5.7.	Čištění uranové frakce	29
1.3.3.5.5.8.	Koncové operace PUREX - procesu	29
1.3.3.5.6.	THOREX - proces	30
1.3.3.5.6.1.	Úvod	30
1.3.3.5.6.2.	Problematika radioaktivity produktů THOREX - procesu (Th a U)	31
1.3.3.5.6.3.	Chemicko-technologická problematika THOREX - procesu	31
1.3.3.5.6.4.	Kyselé, dvojstupňový THOREX - proces	32
1.3.3.5.7.	Nevodné procesy	33
1.3.3.5.7.1.	Úvod	33
1.3.3.5.7.2.	Pyrometalurgické procesy	34
1.3.3.5.7.3.	Pyrochemické metody	35
1.3.3.5.7.4.	Frakční destilace těkavých fluoridů (tzv. fluoridový proces)	36
1.3.3.6.	Odpady z přepracování vyhořelého jaderného paliva	36
1.3.3.6.1.	Úvod	36
1.3.3.6.2.	Zpracování kapalných odpadů	37
1.3.3.6.2.1.	Základní technologické schema	37
1.3.3.6.2.2.	Regenerace kyseliny dusičné	39
1.3.3.6.2.3.	Regenerace a zpracování odpadající organické fáze	39
1.3.3.6.3.	Technologické principy čištění plyných odpadů	41
1.3.3.6.3.1.	Úvod	41
1.3.3.6.3.2.	Záchyt jodu a jeho sloučenin	41
1.3.3.6.3.3.	Záchyt kryptonu a xenonu	43
1.3.3.6.3.4.	Záchyt a ukládání tritia	44
1.3.3.6.3.5.	Záchyt a ukládání těkavých sloučenin ruthenia a sloučenin ¹⁴ C	45
1.3.3.6.3.6.	Záchyt radioaktivních aerosolových a prachových částic	45
1.3.3.6.4.	Technologické principy zpracování pevných odpadů	46
1.3.3.6.4.1.	Úvod	46
1.3.3.6.3.2.	Zpracování odpadních konstrukčních materiálů palivových článků	46
1.3.3.6.3.3.	Zpracování vysoko- středně- a nízko-aktivních pevných odpadů	47
1.3.4.	Provozní realizace procesu přepracování vyhořelého paliva	48
1.3.4.1.	Celkový přehled dosavadních projektů a realizací	48
1.3.4.2.	Provozní přepracování paliva reaktorů typu LWR - proces THORP	51
1.3.4.2.1.	Základní technologické schema	51
1.3.4.2.2.	Mechanické operace a příprava roztoku vyhořelého paliva	51
1.3.4.2.3.	Extrakce a separace U/Pu (1. extrakční stupeň)	53
1.3.4.2.4.	Rafinace uranové frakce	54
1.3.4.2.5.	Rafinace plutoniové frakce	56
1.3.4.2.6.	Finální operace zpracování uranové a plutoniové frakce	57
1.3.4.2.7.	Zpracování a likvidace odpadů	58
1.3.4.3.	Provozní přepracování paliva rychlých reaktorů typu LMFBR	59
1.4.	Závěry	60
2.	Radioaktivní odpady z výroby a aplikace jaderných paliv (z palivového cyklu JE)	61
2.1.	Zdroje a klasifikace radioaktivních odpadů	61
2.2.	Odpady z těžby a zpracování uranových rud	63
2.2.1.	Charakteristika odpadů	63
2.2.1.1.	Pevné odpady	63

2.2.1.2.	Kapalné odpady	64
2.2.1.3.	Plynné odpady	66
2.2.2.	Zpracování a likvidace kapalných odpadů	66
2.2.2.1.	Důlní vody	66
2.2.2.1.1.	Klasické chemické metody	66
2.2.2.1.2.	Sorpční metody	67
2.2.2.1.3.	Centrální dekontaminační stanice (Stráž p. Ralskem)	70
2.2.2.2.	Podzemní vody kontaminované při tzv. chemické těžbě	70
2.2.2.3.	Kapalné odpady ze zpracování uranových rud	71
2.2.3.	Rekultivace kalojemů	73
2.3.	Odpady z výroby jaderného paliva	74
2.3.1.	Hlavní zdroje odpadů v procesu výroby jaderného paliva	74
2.3.2.	Zpracování odpadů z procesu výroby jaderného paliva	74
2.4.	Radioaktivní odpady z provozu jaderných elektráren	75
2.4.1.	Zdroje a formy radioaktivních odpadů v JE – LWR	75
2.4.2.	Čištění kontaminovaných kapalných médií v JE	76
2.4.3.	Zpracování a likvidace kapalných RAO v JE	79
2.4.4.	Zpracování a likvidace plyných a pevných RAO v JE	80
2.4.4.1.	Plynné RAO	80
2.4.4.2.	Pevné odpady	80
2.5.	Solidifikace radioaktivních odpadů	81
2.5.1.	Přehled solidifikačních postupů a jejich aplikace	81
2.5.2.	Cementace RAO	82
2.5.2.1.	Principy a základní parametry cementačního procesu	82
2.5.2.2.	Technologické postupy cementace RAO	83
2.5.3.	Bitumenace RAO	84
2.5.3.1.	Principy a základní parametry bitumenačního procesu	84
2.5.3.2.	Technologické postupy bitumenace RAO	85
2.5.4.	Solidifikace RAO organickými polymery	87
2.5.5.	Vitifikace RAO	88
2.5.5.1.	Principy a základní parametry vitrifikačního procesu	88
2.5.5.2.	Technologické postupy vitrifikace RAO	90
3.	Přeprava a ukládání RAO a vyhořelého jaderného paliva (VJP)	92
3.1.	Přeprava RAO a VJP	92
3.1.1.	Úvod	92
3.1.2.	Obecné požadavky na přepravní kontejnery	92
3.2.	Základní koncepce ukládání RAO a VJP	93
3.3.	Typy úložišť a způsoby ukládání RAO a VJP	97
3.3.1.	Ukládání nízkoaktivních odpadů	97
3.3.2.	Ukládání středněaktivních odpadů	98
3.3.3.	Ukládání VJP a VAO	98
3.3.3.1.	Mezisklady VJP a VAO	98
3.3.3.2.	Hlubinná úložiště VJP a VAO	101
3.3.3.2.1.	Základní parametry HÚ a problematika jeho návrhu	101
3.3.3.2.2.	Principy návrhů a projektů HÚ v horninových masivech	102
3.3.3.2.3.	Bezpečnost hlubinného úložiště	105
3.3.3.2.4.	Podzemní laboratoře a přírodní analogy hlubinného úložiště	106
3.4.	Ukládání RAO a VJP v České republice	108

3.4.1.	Současný stav	108
3.4.2.	Program výstavby úložišť VJP	109
4.	Transmutace a pokročilé palivové cykly	110
4.1.	Předmět a cíl transmutace	110
4.2.	Principy transmutačních systémů	113
4.2.1.	Transmutace ve standardních typech reaktorů	113
4.2.2.	Transmutační systémy typu ADTT	114
4.3.	Charakteristika pokročilých palivových cyklů (AFC) uvažovaných v programu RED-IMPACT	116
4.3.1.	Principy uvažovaných pokročilých palivových cyklů (AFC)	116
4.3.2.	Technicko-ekonomické charakteristiky AFC projektu RED-IMPACT	119
4.4.	Technologické alternativy procesů P&T	121
4.4.1.	Partitioning (dělení, separace)	121
4.4.2.	Transmutace	123
4.4.3.	Nové aspekty nakládání s radioaktivními odpady	124
4.4.4.	Přehled typů jaderných paliv pokročilého palivového cyklu	126
4.5.	Strategie řešení scénářů pokročilých palivových cyklů v USA	127
4.6.	Strategie řešení scénářů pokročilých palivových cyklů v Česku	130
4.7.	Závěry	131
5.	Technologie výroby thoriového paliva	132
5.1.	Výskyt thoria v přírodě a jeho použití	132
5.2.	Technologie výroby Th - koncentrátnu z monazitových písků	133
5.3.	Rafinace thoria kapalinovou extrakcí s TBP	135
5.4.	Výroba palivových thoriových materiálů	136
5.5.	Závěry	138
Doslov		138
Literatura		139