

# **O b s a h**

Předmluva.....	1
1. Přepracování vyhořelých jaderných paliv .....	2
1.1. Historický úvod .....	2
1.2. Minulé i současné koncepce nakládání s vyhořelým jaderným palivem .....	4
1.3. Technologické postupy zpracování vyhořelého jaderného paliva.....	6
1.3.1. Chlazení vyhořelého paliva a jeho složení .....	6
1.3.2. Základní aspekty procesu přepracování vyhořelého jaderného paliva .....	8
1.3.2.1. Separace U, Pu, Th a dalších užitečných složek .....	8
1.3.2.2. Podkriticnost systému .....	12
1.3.2.3. Problematika vysoké radioaktivity a bezpečnosti práce.....	14
1.3.2.4. Problematika odpadů.....	16
1.3.3. Přehled vývoje technologických postupů zpracování vyhořelého jaderného paliva .....	17
1.3.3.1. Úvod .....	17
1.3.3.2. Mechanické metody odstraňování povlakových materiálů .....	17
1.3.3.3. Chemické metody odstraňování povlakových materiálů .....	18
1.3.3.3.1. Úvod .....	18
1.3.3.3.2. Hliníkové povlaky .....	18
1.3.3.3.3. Hořčíkové povlaky .....	19
1.3.3.3.4. Zr - povlaky .....	19
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 .....	20
1.3.3.3.8. Pyrochemické a pyrometalurgické metody .....	20
1.3.3.4. Metody a chemismus rozpouštění vyhořelého jaderného paliva.....	21
1.3.3.4.1. Úvod .....	21
1.3.3.4.2. Palivo na bázi kovového uranu .....	22
1.3.3.4.3. Palivo na bázi UO <sub>2</sub> (reaktorů LWR).....	22
1.3.3.4.4. Palivo na bázi UO <sub>2</sub> + PuO <sub>2</sub> (reaktorů FBR, LMFB).....	24
1.3.3.4.5. Palivo na bázi Th - U (reaktorů HTGR) .....	24
1.3.3.5. Principy technologických postupů rafinace vyhořelého jaderného paliva .....	25
1.3.3.5.1. Srážecí procesy .....	25
1.3.3.5.1.1. Úvod .....	25
1.3.3.5.1.2. BiPO <sub>4</sub> - proces: .....	25
1.3.3.5.1.3. Fluorido - acetátový proces .....	26
1.3.3.5.2. REDOX - proces .....	26
1.3.3.5.3. TRIGLY - proces .....	27
1.3.3.5.4. BUTEX - proces .....	27
1.3.3.5.5. PUREX - proces .....	28
1.3.3.5.5.1. Úvod .....	28
1.3.3.5.5.2. Úprava složení roztoku.....	28
1.3.3.5.5.3. Společná extrakce U(VI) a Pu(IV) .....	29
1.3.3.5.5.4. Selektivní reextrakce Pu .....	29
1.3.3.5.5.5. Reextrakce uranu .....	31
1.3.3.5.5.6. Čištění plutoniové frakce.....	31
1.3.3.5.5.7. Čištění uranové frakce.....	32
1.3.3.5.5.8. Koncové operace PUREX - procesu .....	32

1.3.3.5.6. THOREX - proces .....	33
1.3.3.5.6.1. Úvod .....	33
1.3.3.5.6.2. Problematika radioaktivity produktů THOREX - procesu (Th a U) .....	33
1.3.3.5.6.3. Chemicko-technologická problematika THOREX-procesu .....	34
1.3.3.5.6.4. Kyselý, dvojstupňový THOREX-proces .....	35
1.3.3.5.7. Nevodné procesy .....	36
1.3.3.5.7.1. Úvod .....	36
1.3.3.5.7.2. Pyrometallurgické procesy .....	37
1.3.3.5.7.3. Pyrochemické metody .....	39
1.3.3.5.7.4. Frakční destilace těkavých fluoridů (tzv. fluoridový proces) .....	39
1.3.3.6. Odpady z přepracování vyhořelého jaderného paliva .....	40
1.3.3.6.1. Úvod .....	40
1.3.3.6.2. Zpracování kapalných odpadů .....	40
1.3.3.6.2.1. Základní technologické schema .....	40
1.3.3.6.2.2. Regenerace kyseliny dusičné .....	42
1.3.3.6.2.3. Regenerace a zpracování odpadající organické fáze .....	43
1.3.3.6.3. Technologické principy čištění plynných odpadů .....	45
1.3.3.6.3.1. Úvod .....	45
1.3.3.6.3.2. Záchyt jodu a jeho sloučenin .....	46
1.3.3.6.3.3. Záchyt kryptonu a xenonu .....	47
1.3.3.6.3.4. Záchyt a ukládání tritia .....	48
1.3.3.6.3.5. Záchyt a ukládání těkavých sloučenin ruthenia a sloučenin <sup>14</sup> C .....	49
1.3.3.6.3.6. Záchyt radioaktivních aerosolových a prachových částic .....	50
1.3.3.6.4. Technologické principy zpracování pevných odpadů .....	51
1.3.3.6.4.1. Úvod .....	51
1.3.3.6.4.2. Zpracování odpadních konstrukčních materiálů palivových článků .....	51
1.3.3.6.4.3. Zpracování vysoko- středně- a nízko-aktivních pevných odpadů .....	52
1.3.4. Provozní realizace procesu přepracování vyhořelého paliva .....	53
1.3.4.1. Celkový přehled dosavadních projektů a realizací .....	53
1.3.4.2. Provozní přepracování paliva reaktorů typu LWR - proces THORP .....	56
1.3.4.2.1. Základní technologické schema .....	56
1.3.4.2.2. Mechanické operace a příprava roztoku vyhořelého paliva .....	56
1.3.4.2.3. Extrakce a separace U/Pu (1. extrakční stupeň) .....	58
1.3.4.2.4. Rafinace uranové frakce .....	61
1.3.4.2.5. Rafinace plutoniové frakce .....	62
1.3.4.2.6. Finální operace zpracování uranové a plutoniové frakce .....	64
1.3.4.2.7. Zpracování a likvidace odpadů .....	64
1.3.4.3. Provozní přepracování paliva rychlých reaktorů typu LMFBR .....	66
1.4. Závěry .....	67
2. Radioaktivní odpady z výroby a aplikace jaderných paliv (z palivového cyklu JE) .....	68
2.1. Zdroje a klasifikace radioaktivních odpadů .....	68
2.2. Odpady z těžby a zpracování uranových rud .....	71
2.2.1. Charakteristika odpadů .....	71
2.2.1.1. Pevné odpady .....	71
2.2.1.2. Kapalné odpady .....	72
2.2.1.3. Plynné odpady .....	74
2.2.2. Zpracování a likvidace kapalných odpadů .....	74
2.2.2.1. Důlní vody .....	74
2.2.2.1.1. Klasické chemické metody .....	74
2.2.2.1.2. Sorpční metody .....	75

2.2.2.1.3. Centrální dekontaminační stanice (Stráž p. Ralskem).....	78
2.2.2.2. Podzemní vody kontaminované při tzv. chemické těžbě .....	78
2.2.2.3. Kapalné odpady ze zpracování uranových rud.....	80
2.2.3. Rekultivace kalojemů .....	82
2.3. Odpady z výroby jaderného paliva.....	82
2.3.1. Hlavní zdroje odpadů v procesu výroby jaderného paliva .....	82
2.3.2. Zpracování odpadů z procesu výroby jaderného paliva .....	83
2.4. Radioaktivní odpady z provozu jaderných elektráren .....	84
2.4.1. Zdroje a formy radioaktivních odpadů v JE - LWR.....	84
2.4.2. Čištění kontaminovaných kapalných médií v JE .....	85
2.4.3. Zpracování a likvidace kapalných RAO v JE.....	88
2.4.4. Zpracování a likvidace plynných a pevných RAO v JE.....	89
2.4.4.1. Plynné RAO .....	89
2.4.4.2. Pevné odpady .....	90
2.5. Solidifikace radioaktivních odpadů.....	90
2.5.1. Přehled solidifikačních postupů a jejich aplikace .....	90
2.5.2. Cementace RAO.....	92
2.5.2.1. Principy a základní parametry cementačního procesu .....	92
2.5.2.2. Technologické postupy cementace RAO .....	93
2.5.3. Bitumenace RAO .....	95
2.5.3.1. Principy a základní parametry bitumenačního procesu.....	95
2.5.3.2. Technologické postupy bitumenace RAO .....	96
2.5.4. Solidifikace RAO organickými polymery.....	97
2.5.5. Vitrifikace RAO .....	99
2.5.5.1. Principy a základní parametry vitrifačního procesu.....	99
2.5.5.2. Technologické postupy vitrifikace RAO .....	101
3. Přeprava a ukládání RAO a vyhořelého jaderného paliva (VJP) .....	103
3.1. Přeprava RAO a VJP .....	103
3.1.1. Úvod.....	103
3.1.2. Obecné požadavky na přepravní kontejnery .....	104
3.2. Základní koncepce ukládání RAO a VJP .....	105
3.3. Typy úložišť a způsoby ukládání RAO a VJP .....	108
3.3.1. Ukládání nízkoaktivních odpadů.....	108
3.3.2. Ukládání středněaktivních odpadů .....	109
3.3.3. Ukládání VJP a VAO .....	110
3.3.3.1. Mezisklad VJP a VAO .....	110
3.3.3.2. Hlubinná úložiště VJP a VAO.....	113
3.3.3.2.1. Základní parametry HÚ a problematika jeho návrhu .....	113
3.3.3.2.2. Současné návrhy a projekty HÚ v horninových masivech.....	115
3.3.3.2.3. Bezpečnost hlubinného úložiště .....	118
3.3.3.2.4. Podzemní laboratoře a přírodní analogy hlubinného úložiště .....	119
3.4. Ukládání RAO a VJP v České republice.....	121
3.4.1. Současný stav .....	121
3.4.2. Program výstavby úložišť VJP .....	122
4. Transmutace aktinidů a štěpných produktů.....	123
4.1. Předmět a cíl transmutace.....	123
4.2. Principy transmutačních systémů .....	124
4.2.1. Transmutace ve standardních typech reaktorů .....	124
4.2.2. Transmutační systémy typu ADTT .....	125
4.3. Technologie palivových cyklů typu P/T .....	128

4.3.1. Principy palivových cyklů při transmutaci.....	128
4.3.2. Metody separace aktinidů a štěpných produktů .....	132
4.4. Závěry .....	134
5. Technologie výroby thoriového paliva.....	135
5.1. Výskyt thoria v přírodě a jeho použití.....	135
5.2. Technologie výroby Th - koncentrátu z monazitových písků .....	136
5.3. Rafinace thoria kapalinovou extrakcí s TBP .....	138
5.4. Výroba palivových thoriových materiálů.....	139
5.5. Závěry .....	141
Doslov .....	142
Literatura .....	143
O b s a h.....	147

001 ... 1. Úvod ..... 1  
 002 ... 2. Teorie a principy ..... 1  
 003 ... 3. Praktické aplikace ..... 1  
 004 ... 4. Výroba paliva ..... 1  
 005 ... 5. Technologie výroby ..... 1  
 006 ... 6. Závěry ..... 1  
 007 ... 7. Literatura ..... 1  
 008 ... 8. Obrázky ..... 1  
 009 ... 9. Tabulky ..... 1  
 010 ... 10. Grafy ..... 1  
 011 ... 11. Doslov ..... 1  
 012 ... 12. Literatura ..... 1  
 013 ... 13. Obrázky ..... 1  
 014 ... 14. Tabulky ..... 1  
 015 ... 15. Grafy ..... 1  
 016 ... 16. Závěry ..... 1  
 017 ... 17. Literatura ..... 1  
 018 ... 18. Obrázky ..... 1  
 019 ... 19. Tabulky ..... 1  
 020 ... 20. Grafy ..... 1  
 021 ... 21. Závěry ..... 1  
 022 ... 22. Literatura ..... 1  
 023 ... 23. Obrázky ..... 1  
 024 ... 24. Tabulky ..... 1  
 025 ... 25. Grafy ..... 1  
 026 ... 26. Závěry ..... 1  
 027 ... 27. Literatura ..... 1  
 028 ... 28. Obrázky ..... 1  
 029 ... 29. Tabulky ..... 1  
 030 ... 30. Grafy ..... 1  
 031 ... 31. Závěry ..... 1  
 032 ... 32. Literatura ..... 1  
 033 ... 33. Obrázky ..... 1  
 034 ... 34. Tabulky ..... 1  
 035 ... 35. Grafy ..... 1  
 036 ... 36. Závěry ..... 1  
 037 ... 37. Literatura ..... 1  
 038 ... 38. Obrázky ..... 1  
 039 ... 39. Tabulky ..... 1  
 040 ... 40. Grafy ..... 1  
 041 ... 41. Závěry ..... 1  
 042 ... 42. Literatura ..... 1  
 043 ... 43. Obrázky ..... 1  
 044 ... 44. Tabulky ..... 1  
 045 ... 45. Grafy ..... 1  
 046 ... 46. Závěry ..... 1  
 047 ... 47. Literatura ..... 1  
 048 ... 48. Obrázky ..... 1  
 049 ... 49. Tabulky ..... 1  
 050 ... 50. Grafy ..... 1  
 051 ... 51. Závěry ..... 1  
 052 ... 52. Literatura ..... 1  
 053 ... 53. Obrázky ..... 1  
 054 ... 54. Tabulky ..... 1  
 055 ... 55. Grafy ..... 1  
 056 ... 56. Závěry ..... 1  
 057 ... 57. Literatura ..... 1  
 058 ... 58. Obrázky ..... 1  
 059 ... 59. Tabulky ..... 1  
 060 ... 60. Grafy ..... 1  
 061 ... 61. Závěry ..... 1  
 062 ... 62. Literatura ..... 1  
 063 ... 63. Obrázky ..... 1  
 064 ... 64. Tabulky ..... 1  
 065 ... 65. Grafy ..... 1  
 066 ... 66. Závěry ..... 1  
 067 ... 67. Literatura ..... 1  
 068 ... 68. Obrázky ..... 1  
 069 ... 69. Tabulky ..... 1  
 070 ... 70. Grafy ..... 1  
 071 ... 71. Závěry ..... 1  
 072 ... 72. Literatura ..... 1  
 073 ... 73. Obrázky ..... 1  
 074 ... 74. Tabulky ..... 1  
 075 ... 75. Grafy ..... 1  
 076 ... 76. Závěry ..... 1  
 077 ... 77. Literatura ..... 1  
 078 ... 78. Obrázky ..... 1  
 079 ... 79. Tabulky ..... 1  
 080 ... 80. Grafy ..... 1  
 081 ... 81. Závěry ..... 1  
 082 ... 82. Literatura ..... 1  
 083 ... 83. Obrázky ..... 1  
 084 ... 84. Tabulky ..... 1  
 085 ... 85. Grafy ..... 1  
 086 ... 86. Závěry ..... 1  
 087 ... 87. Literatura ..... 1  
 088 ... 88. Obrázky ..... 1  
 089 ... 89. Tabulky ..... 1  
 090 ... 90. Grafy ..... 1  
 091 ... 91. Závěry ..... 1  
 092 ... 92. Literatura ..... 1  
 093 ... 93. Obrázky ..... 1  
 094 ... 94. Tabulky ..... 1  
 095 ... 95. Grafy ..... 1  
 096 ... 96. Závěry ..... 1  
 097 ... 97. Literatura ..... 1  
 098 ... 98. Obrázky ..... 1  
 099 ... 99. Tabulky ..... 1  
 100 ... 100. Grafy ..... 1  
 101 ... 101. Závěry ..... 1  
 102 ... 102. Literatura ..... 1  
 103 ... 103. Obrázky ..... 1  
 104 ... 104. Tabulky ..... 1  
 105 ... 105. Grafy ..... 1  
 106 ... 106. Závěry ..... 1  
 107 ... 107. Literatura ..... 1  
 108 ... 108. Obrázky ..... 1  
 109 ... 109. Tabulky ..... 1  
 110 ... 110. Grafy ..... 1  
 111 ... 111. Závěry ..... 1  
 112 ... 112. Literatura ..... 1  
 113 ... 113. Obrázky ..... 1  
 114 ... 114. Tabulky ..... 1  
 115 ... 115. Grafy ..... 1  
 116 ... 116. Závěry ..... 1  
 117 ... 117. Literatura ..... 1  
 118 ... 118. Obrázky ..... 1  
 119 ... 119. Tabulky ..... 1  
 120 ... 120. Grafy ..... 1  
 121 ... 121. Závěry ..... 1  
 122 ... 122. Literatura ..... 1  
 123 ... 123. Obrázky ..... 1  
 124 ... 124. Tabulky ..... 1  
 125 ... 125. Grafy ..... 1  
 126 ... 126. Závěry ..... 1  
 127 ... 127. Literatura ..... 1  
 128 ... 128. Obrázky ..... 1  
 129 ... 129. Tabulky ..... 1  
 130 ... 130. Grafy ..... 1  
 131 ... 131. Závěry ..... 1  
 132 ... 132. Literatura ..... 1  
 133 ... 133. Obrázky ..... 1  
 134 ... 134. Tabulky ..... 1  
 135 ... 135. Grafy ..... 1  
 136 ... 136. Závěry ..... 1  
 137 ... 137. Literatura ..... 1  
 138 ... 138. Obrázky ..... 1  
 139 ... 139. Tabulky ..... 1  
 140 ... 140. Grafy ..... 1  
 141 ... 141. Závěry ..... 1  
 142 ... 142. Literatura ..... 1  
 143 ... 143. Obrázky ..... 1  
 144 ... 144. Tabulky ..... 1  
 145 ... 145. Grafy ..... 1  
 146 ... 146. Závěry ..... 1  
 147 ... 147. Literatura ..... 1