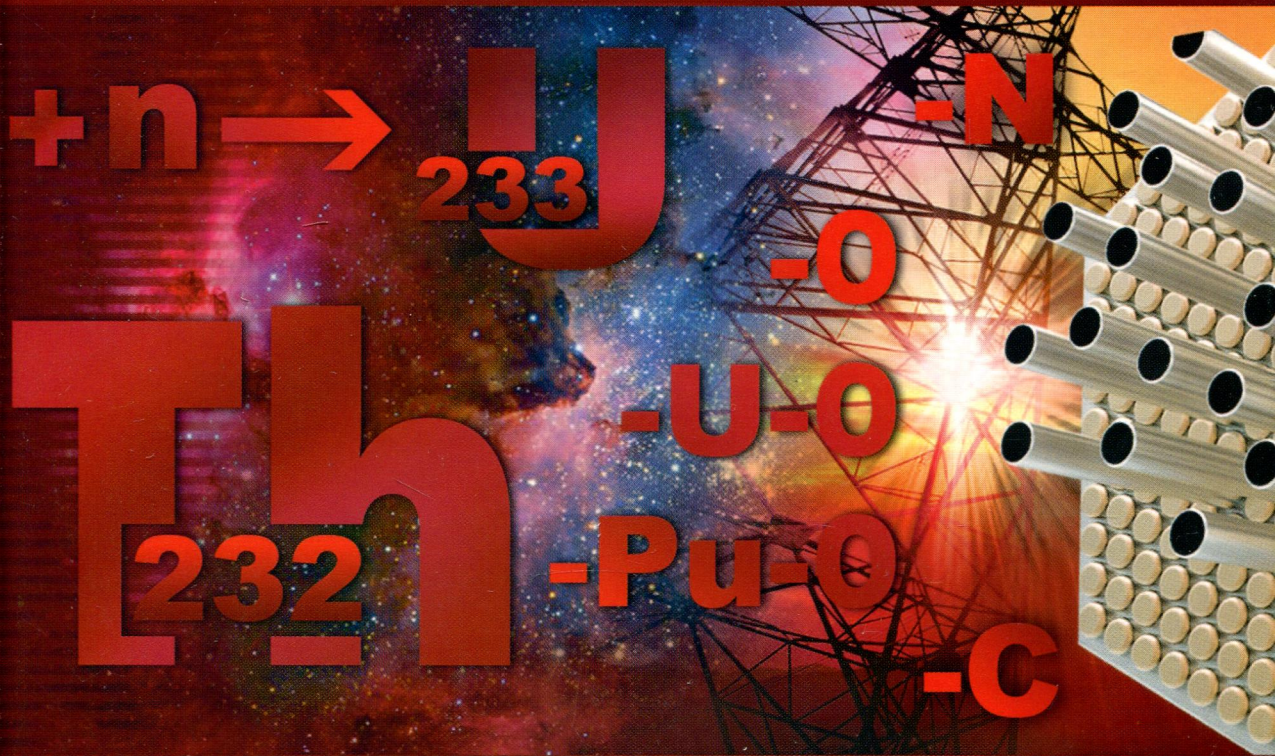


С.В. Алексеев, В.А.Зайцев

# ТОРИЙ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ



С.В. Алексеев, В.А. Зайцев

# Торий в ядерной энергетике

ТЕХНОСФЕРА  
МОСКВА  
2014

**УДК 621.039.54**

**ББК 31.4**

**А 47**

**А 47 Алексеев С.В., Зайцев В.А.**

**Торий в ядерной энергетике**

**Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 288с. + 6 с. цв. вкл.**

**ISBN 978-5-94836-394-3**

В книге приведены сведения о роли тория в ядерной энергетике. Кратко рассмотрены данные об исследовании ториевого топливного цикла. Приведены сведения о свойствах, технологии получения и перспективы применения ториевого топлива в ядерных реакторах. Рассмотрены методы получения тугоплавких соединений тория. Проанализированы результаты работ по вскрытию торийсодержащих материалов, получению ядерночистых соединений тория (ThO<sub>2</sub>, ThC, ThN, ThB, ThP, ThS), переработке отработанного топлива и технике безопасности при работе с торием.

Книга предназначена для научных работников и инженеров, работающих в области исследования и применения ядерного топлива.

**УДК 621.039.54**

**ББК 31.4**

© 2014, Алексеев С.В., Зайцев В.А.

© 2014, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

**ISBN 978-5-94836-394-3**

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	7
<b>Предисловие авторов</b> .....	10
<b>Основные условные обозначения и сокращения</b> .....	12
<b>Введение</b> .....	13
<b>Глава 1</b>	
<b>Торий и ядерная энергетика</b> .....	14
1.1. Открытие тория и его место в периодической системе.....	14
1.2. Радиоактивность тория .....	15
1.3. Значение тория в ядерной энергетике .....	16
1.4. Исследование тория в различных реакторных системах .....	21
1.5. Результаты исследования ТТЦ .....	25
1.6. Перспективы использования тория в ядерной энергетике.....	28
1.7. Применение тория в других областях промышленности.....	45
<b>Глава 2</b>	
<b>Сырьевые запасы тория</b> .....	47
2.1. Минералы тория и торийсодержащие руды .....	47
2.2. Важнейшие месторождения ториевых руд.....	50
2.3. Торийсодержащие руды России.....	56
2.4. Обогащение торийсодержащих руд.....	60
<b>Глава 3</b>	
<b>Переработка монацитовых концентратов</b> .....	62
3.1. Сернокислотный метод переработки монацитовых концентратов	62
3.1.1. Разложение монацита серной кислотой .....	63
3.1.2. Извлечение тория и редкоземельных элементов из сернокислых растворов .....	66
3.1.3. Метод предварительного выделения редкоземельных элементов в виде комплексных сульфатов.....	69



3.1.4.	Метод выделения тория в виде сульфатов .....	71
3.1.5.	Метод совместного осаждения оксалатов тория и редкоземельных элементов .....	73
3.2.	Щелочные методы переработки монацитового концентрата.....	73
3.2.1.	Вскрытие монацитового концентрата раствором едкого натра .....	73
3.2.2.	Сплавление и смешение монацитового концентрата с различными щелочными реагентами .....	77
3.3.	Разделение гидроксидов тория и редкоземельных элементов....	79
3.4.	Переработка комплексных торийсодержащих руд методом хлорирования .....	82
3.4.1.	Хлорирование торийсодержащих комплексных руд .....	82
3.4.2.	Хлорирование титано-тантало-ниобатов .....	84

## Глава 4

<b>Аффинаж соединений тория .....</b>	<b>88</b>
4.1. Методы избирательного осаждения и растворения.....	89
4.2. Экстракционные методы очистки .....	94

## Глава 5

<b>Диоксид тория .....</b>	<b>102</b>
5.1. Диаграмма состояния системы Th-O, Th-U-O, Th-Pu-O .....	102
5.2. Получение диоксида тория и твердых растворов (Th,U)O <sub>2</sub> , (Th,Pu)O <sub>2</sub> .....	105
5.2.1. Синтез диоксида тория .....	105
5.2.2. Синтез твердых растворов (Th,U)O <sub>2</sub> .....	115
5.2.3. Синтез твердых растворов (Th,Pu)O <sub>2</sub> .....	119
5.3. Получение изделий из ThO <sub>2</sub> .....	120
5.3.1. Формование заготовок .....	120
5.3.2. Спекание.....	121
5.4. Получение изделий из (Th,U)O <sub>2</sub> , (Th,Pu)O <sub>2</sub> .....	126
5.4.1. Формование заготовок .....	126
5.4.2. Спекание.....	127
5.5. Свойства ThO <sub>2</sub> , (Th,U)O <sub>2</sub> и (Th,Pu)O <sub>2</sub> .....	135
5.5.1. Термодинамические свойства .....	135
5.5.2. Механические свойства .....	148
5.5.3. Химические свойства .....	150
5.6. Поведение ThO <sub>2</sub> , ThO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> и ThO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub> под облучением .....	157

<b>Глава 6</b>	
<b>Карбиды тория</b> .....	163
6.1. Система Th–C, Th–U–C, Th–Pu–C .....	163
6.2. Получение карбидов тория, (Th,U)C, (Th,U)C <sub>2</sub> .....	168
6.3. Свойства карбидов тория, (Th,U)C, (Th,U)C <sub>2</sub> .....	175
6.3.1. Термодинамические свойства .....	175
6.3.2. Теплофизические свойства .....	179
6.3.3. Механические свойства .....	180
6.3.4. Химические свойства .....	180
6.3.5. Поведение под облучением .....	182
<b>Глава 7</b>	
<b>Нитриды тория</b> .....	183
7.1. Система Th–N, Th–U–N, Th–Pu–N .....	183
7.2. Получение нитридов тория, (Th,U)N, (Th,Pu)N .....	186
7.3. Свойства нитридов тория .....	188
7.3.1. Термодинамические свойства .....	188
7.3.2. Механические свойства .....	192
7.3.3. Химические свойства .....	192
<b>Глава 8</b>	
<b>Бориды, фосфиды и сульфиды тория</b> .....	195
8.1. Бориды тория .....	195
8.1.1. Получение боридов тория .....	196
8.1.2. Свойства боридов тория .....	197
8.2. Фосфиды тория .....	199
8.2.1. Получение фосфидов тория .....	200
8.2.2. Свойства фосфидов тория .....	200
8.3. Сульфиды тория .....	202
8.3.1. Получение сульфидов тория .....	203
8.3.2. Свойства сульфидов тория .....	204
<b>Глава 9</b>	
<b>Топливо на основе тория для реакторов HTGR</b> .....	210
9.1. Топливо реакторов HTGR .....	212
9.2. Получение топлива на основе микротвэлов .....	213
9.2.1. Получение сферических частиц .....	213
9.2.2. Нанесение покрытий на микросферы .....	218
9.2.3. Получение ТВЭЛов реактора HTGR .....	224

**Глава 10****Переработка отработанного ядерного топлива****на основе тория** ..... 228

10.1. Переработка ториевого топлива энергетических реакторов ..... 228

10.2. Переработка топлива реакторов HTGR на основе тория ..... 234

**Глава 11****Техника безопасности при работе с торием** ..... 237

11.1. Химическая токсичность тория ..... 238

11.2. Радиоактивные свойства тория ..... 239

11.2.1. Изотопы тория ..... 239

11.2.2. Накопление и распад изотопов ряда  $^{232}\text{Th}$  ..... 240

11.3. Радиационная токсичность тория ..... 242

11.4. Метаболизм основных изотопов тория ..... 243

11.4.1. Основные метаболические свойства тория ..... 243

11.4.2. Распределение тория в организме ..... 245

11.4.3. Метаболические свойства радия ..... 246

11.4.4. Метаболические свойства торона и радона ..... 247

11.5. Влияние ингаляционного поступления тория ..... 249

11.6. Воздействие тория на костную ткань ..... 250

11.7. Радиационная опасность при работе с торием ..... 251

11.7.1. Радиационная обстановка на обогатительных  
предприятиях ..... 252

11.7.2. Ториевые пожары ..... 253

11.7.3. Обработка тория, облученного нейтронами ..... 253

11.8. Меры обеспечения безопасности при работе с торием ..... 254

11.8.1. Требования к производственным помещениям ..... 254

11.8.2. Загрязнение воздушной среды ..... 255

11.8.3. Экранирование для защиты от внешнего облучения ..... 256

**Заключение** ..... 259**Литература** ..... 262