

А.Н. Жиганов, В.В. Гузеев, Г.Г. Андреев

ТЕХНОЛОГИЯ
ДИОКСИДА УРАНА
ДЛЯ КЕРАМИЧЕСКОГО
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

А.Н. Жиганов
В.В. Гузеев
Г.Г. Андреев

ТЕХНОЛОГИЯ ДИОКСИДА УРАНА ДЛЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

*Допущено учебно-методическим объединением
по образованию в области химической технологии
и биотехнологии в качестве учебного пособия для
студентов высших учебных заведений, обучающихся
по специальности "Химическая технология
материалов современной энергетики"*



Томск 2002

УДК 621.039.542.34

ББК 31.4

Ж 68

Жиганов А.И., Гузеев В.В., Андреев Г.Г.

Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива.

– Томск: STT, 2002. – 328 с.

ISBN 5-93629-127-8

Представлены общие сведения о ядерном топливе и изменениях, происходящих в ядерном реакторе в таблетках диоксида урана под действием излучения.

Описаны свойства оксидов урана. Основной материал посвящен технологии диоксида урана как ядерного топлива в энергетических реакторах. Представлены технологические методы спекания керамики на основе диоксида урана. Уделено внимание кинетике и термодинамике химических процессов. Рассмотрена теория формирования и спекания керамики.

Книга может быть полезна студентам и инженерам, специализирующимся в технологии ядерного топлива для энергетических реакторов.

Рецензенты:

*Чекмарев Александр Михайлович – член-корреспондент РАН,
д.х.н., профессор, зав. кафедрой технологии редких и рассеянных
элементов РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва;*

*Карелин Александр Иванович – д.т.н., профессор,
Радиовый институт им. Хлорина, г. С.-Петербург.*

ISBN 5-93629-127-8

© А.И. Жиганов, В.В. Гузеев,
Г.Г. Андреев, 2002

© STT™, 2002

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	8
-----------------------	---

Глава 1

ТОПЛИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	10
1.1. Делящиеся материалы	12
1.2. Ядерные топливные материалы	16
1.3. Керамическое и дисперсное ядерное горючее	18

Глава 2

СИСТЕМА "УРАН-КИСЛОРОД"	26
2.1. Оксиды урана	28
2.1.1. Природные оксиды урана	28
2.1.2. Синтетические оксиды урана	31
2.2. Фазовые отношения в системе "уран-кислород"	38
2.2.1. Область $UO_2-UO_{2,25}$ (U_4O_9)	41
2.2.2. Область $UO_{2,25}-UO_{2,67}$ (U_3O_8)	45
2.2.3. Область $UO_{2,67}-UO_3$	48

Глава 3

АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ГАЗОВОЙ КОНВЕРСИИ UF_6	50
3.1. Термодинамический анализ получения UO_2	50
3.2. Конверсия UF_6 в кислородо-водородном пламени (GECO-процесс)	57

Глава 4

ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ UO_2 ЧЕРЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНУЮ СТАДИЮ ОСАЖДЕНИЯ ПОЛИУРАНАТА АММОНИЯ (АДУ-ПРОЦЕСС)	61
4.1. Общие принципы АДУ-процесса	61
4.2. Полиуранаты аммония, их структура и свойства	62

4.3.	Теоретические основы осаждения полиуранатов аммония из фторидных систем	64
4.3.1.	Особенности выделения полиуранатов аммония из фторидных растворов	64
4.4.	Влияние условий осаждения на свойства полиуранатов аммония	67
4.4.1.	Влияние условий осаждения на размер кристаллитов полиуранатов аммония	67
4.4.2.	Влияние условий осаждения на фильтруемость пульпы и скорость отстаивания осадка	69
4.4.3.	Образование агрегатов и агломератов в процессе осаждения полиураната аммония	71
4.5.	Термическое разложение полиуранатов аммония	74
4.6.	Режимы осаждения полиураната аммония, восстановления промежуточных оксидов и свойства конечных порошков UO_2	77
4.6.1.	Влияние условий осаждения полиураната аммония на свойства порошка UO_2	77
4.6.2.	Изменение удельной поверхности при термическом разложении полиураната аммония	80
4.7.	Технологические схемы получения керамического UO_2 по АДУ-процессу	83
4.7.1.	Технологическая схема получения порошка керамического UO_2 для топлива тяжеловодного реактора CANDU	83
4.7.2.	Технологические схемы получения керамического UO_2 для топлива легководных реакторов BWR и PWR	89
 Глава 5		
ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКОГО UO_2 ЧЕРЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНУЮ СТАДИЮ ОСАЖДЕНИЯ ТРИКАРБОНАТУРАНИЛАТА АММОНИЯ (АУК-ПРОЦЕСС)		92

5.1.	Теоретические основы АУК- процесса	92
5.1.1.	Карбонатные соединения уранила	92
5.1.2.	Карбонатно-фторидные соединения уранила	96
5.1.3.	Термическое разложение трикарбонатуранилата аммония	97
5.2.	Технология получения порошка UO_2 по АУК-процессу	98
5.3.	Физико-химические свойства порошка UO_2 карбонатного происхождения	105

Глава 6

БЕЗВОДНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ГЕТЕРОГЕННАЯ КИНЕТИКА	111
6.1. Безводные способы переработки гексафторида урана	111
6.2. Основные положения кинетики гетерогенных процессов	116
6.2.1. Кинетическая область I	121
6.2.2. Кинетическая область II	123
6.2.3. Внешняя диффузионная область IV	123
6.2.4. Диффузионная область	123
6.2.5. Зависимость константы скорости реакции от температуры	124

Глава 7

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ АППАРАТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОКСИДОВ	127
7.1. Общие принципы выбора аппаратов	127
7.2. Ядерно-безопасное сушильное и прокалочное оборудование для получения оксидов обогащенного U, Pu и трансурановых элементов	128
7.3. Сушилки, используемые в производстве оксидов редких и радиоактивных металлов	133
7.3.1. Пленочная роторная сушилка	134
7.3.2. Трубы-сушилки для влажных солей	135
7.4. Аппараты периодического действия	138
7.5. Вращающиеся трубчатые и шнековые аппараты	141

7.5.1. Конструкции и применение в промышленности	141
7.5.2. Расчет трубчатых и шнековых аппаратов	149
7.6. Аппараты с движущимся слоем	155
7.7. Аппараты с псевдоожиженным слоем	158
7.7.1. Применение псевдоожиженного слоя для получения радиоактивных элементов	159
7.7.2. Конструкция и расчет газораспределительных решеток	171
7.8. Аппараты с виброкипящим слоем	177
7.8.1. Конструкции аппаратов	177
7.8.2. Расчет аппаратов	179
7.9. Циклонные прокалочные камеры	181
7.10. Распылительные сушильно-прокалочные аппараты	184
7.10.1. Особенности конструкции и примеры промышленного использования	184
7.10.2. Методика расчета распылительного сушильно-прокалочного аппарата	191
7.11. Пламенные реакторы	197
7.11.1. Конструкции и применение в промышленности	197
7.11.2. Порядок расчета пламенного реактора	199
7.12. Аппаратура и технология плазменных процессов	202
7.12.1. Плазматроны и плазмохимические реакторы	202
7.12.2. Примеры использования плазмы для термической обработки дисперсных материалов	207
7.13. Аппаратура для термического синтеза оксидов	209
7.14. Перспективы применения новых высокоэффективных аппаратов	214
7.15. Оборудование для переработки порошков	215
7.15.1. Мельницы	215
7.15.2. Атриторы	229
7.16. Смесительное оборудование	230
7.16.1. Смесители периодического действия	231
7.16.2. Смесители непрерывного действия	237
7.17. Сепарирующее оборудование	243

7.17.1. Вибрационные сепараторы	244
7.17.2. Пневматические сепараторы	249
7.17.3. Гидравлические сепараторы	254
7.17.4. Магнитные сепараторы	258
 Глава 8	
ТЕОРИЯ ФОРМОВАНИЯ КЕРАМИКИ	260
8.1. Формование изделий	260
8.2. Полусухое прессование	265
8.3. Вибрационное формование	271
8.4. Шликерное литье	274
 Глава 9	
СПЕКАНИЕ	287
9.1. Процессы, протекающие при спекании	287
9.2. Стадии спекания	295
9.3. Усадка при спекании	304
9.4. Кинетика спекания	313
9.5. Технологические факторы, ускоряющие спекание	316
 Литература	 320