

66.047

Ф263

Национальный исследовательский ядерный университет



Н.В. Дедов, А.Н. Жиганов, Ю.Ф. Иванов

**ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ  
ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СВОЙСТВА**

Москва 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**Н.В. Дедов, А.Н. Жиганов, Ю.Ф. Иванов**

**ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ  
Порошковых материалов  
СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СВОЙСТВА**

Монография

Москва 2016

УДК 66.047.75

ББК 34.39

Д 26

**Дедов Н.В., Жиганов А.Н., Иванов Ю.Ф.** Плазмохимический синтез порошковых материалов. Структура, фазовый состав, свойства: Монография. – М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – 208 с.

В монографии приведены результаты исследований по применению плазмохимического способа получения наноструктурных простых и смешанных порошков оксидов и некоторых металлов из предварительно подготовленных растворов заданного состава с применением высокочастотной низкотемпературной плазмы. В основу технологии заложен процесс высокотемпературного разложения водных растворов солей путем распыления исходного раствора в поток газатеплоносителя (воздуха), нагретого до 5000 – 6000 К в генераторе низкотемпературной плазмы (плазмотроне). Процесс высокопроизводителен, малостадийен, не требуются реагенты для осаждения солей, отсутствуют технологические операции фильтрации и прокалки осадков, получаемые порошки химически активны. Приводится теоретическое обоснование плазмохимического синтеза материалов из растворов, описаны процессы, протекающие в реакторе. Даны технологическая схема и описание отдельных аппаратов установки. Описаны методы и рассмотрены результаты анализов структуры и свойств порошков на конкретных материалах. Рассмотрена роль модификаторов в формировании структуры свойства порошков.

Предназначена для научных работников, инженеров и других специалистов, работающих в области плазмохимии, преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

*Рецензенты:*

председатель президиума ТНЦ СО РАН, член-корр. РАН Н.А. Ратахин,  
руководитель отдела структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН,  
д-р техн. наук Ю.М. Максимов

ISBN 978-5-7262-2235-6

© Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ», 2016

Редактор Шумакова Е.Е.

Подписано в печать 16.03.2016. Формат 60х84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>

Печ. л. 13,0. Уч.-изд. л. 13,0. Тираж 150 экз.

Изд. № 001-2. Заказ № 101

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
115406, Москва, Каширское ш., д. 31.

Типография НИЯУ МИФИ.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение.....</b>                                                                                                                   | <b>7</b>  |
| <br><b>Глава 1. Использование математического моделирования при разработке и исследованиях плазмохимических реакторов.....</b>         | <b>11</b> |
| 1.1. Основные положения одномерного моделирования реактора.....                                                                        | 13        |
| 1.2. Расчет реакционной камеры плазмохимического реактора.....                                                                         | 19        |
| 1.3. Расчет оптимальных условий ведения процесса денитрации на основе одномерной модели.....                                           | 27        |
| 1.4. Расчет движения и тепломассообмена полидисперсной системы капель жидкости в высокотемпературном газовом потоке.....               | 31        |
| 1.4.1. Представление непрерывной совокупности капель конечным числом монодисперсных фракций...                                         | 31        |
| 1.4.2. Основные результаты расчета по модели.....                                                                                      | 35        |
| 1.5. Компоновка модели с учетом смещения капельно-воздушного факела форсунок с потоком плазменного теплоносителя.....                  | 41        |
| 1.5.1. Расчет распространения турбулентной газовой струи при наличии тяжелых примесей в сносящем потоке плазменного теплоносителя..... | 42        |
| 1.5.2. Расчет соударения струй.....                                                                                                    | 45        |
| 1.5.3. Двухзонная математическая модель рабочего процесса в плазмохимическом реакторе.....                                             | 47        |
| 1.5.4. Расчет рабочего процесса в плазмохимическом реакторе с учетом стадии термического разложения нитратной соли.....                | 56        |

|                                                                                                                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Глава 2. Разработка и доводка конструкции специального плазмохимического оборудования, исследование и отработка параметров технологических процессов.....</b> | <b>63</b> |
| 2.1. Описание технологической схемы установки.....                                                                                                               | 63        |
| 2.1.1. Разработка генераторов низкотемпературной плазмы (плазмотронов).....                                                                                      | 64        |
| 2.1.2. Исследование процесса денитрации растворов урана на лабораторных установках с высокочастотным факельным и индукционным разрядами.....                     | 66        |
| 2.1.3. Разработка опытно промышленного плазмохимического реактора с длительным ресурсом работы на основе высокочастотного индукционного разряда.....             | 71        |
| 2.1.4. Устройство для возбуждения плазмы в индукционных плазмотронах.....                                                                                        | 83        |
| 2.2. Плазмохимический реактор.....                                                                                                                               | 87        |
| 2.3. Разработка узла улавливания ультрадисперсных (нано-) частиц из высокотемпературного газового потока.....                                                    | 102       |
| 2.3.1. Исследование некоторых характеристик газового потока, выходящего из реактора в процессе денитрации азотнокислых растворов.....                            | 102       |
| 2.3.2. Исследования и разработка оборудования для выделения ультрадисперсных (нано-) порошков оксидов из высокотемпературного газового потока...                 | 107       |
| 2.3.2.1. Исследование и опытно-промышленная проверка модели вихревого осадителя.....                                                                             | 107       |
| 2.3.2.2. Разработка конструкции фильтра на основе тканой металлической сетки и исследование его характеристик.....                                               | 107       |