

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМЕНИ А. В. ЛЫКОВА

**С. И. Футько**  
**С. А. Жданок**

# **ХИМИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ**



МИНСК  
«БЕЛАРУСКАЯ НАВУКА»  
2004

УДК 536.46+536.2+541.123

**Ф у т ь к о С. И.** Химия фильтрационного горения газов / С. И. Футько, С. А. Жданок. — Мн.: Бел. наука, 2004. — 319 с. ISBN 985-08-0611-7.

Представлено новое направление фильтрационного горения газов (ФГГ). Рассмотрены особенности протекания химических превращений в процессах ФГГ и влияние кинетических особенностей на основные характеристики фильтрационного горения, что важно для разработки и оптимизации работы многих устройств: от промышленных мусоросжигающих печей до технологий конверсии топлив в целевые продукты, отличающихся повышенными энергетическими и экологическими показателями.

Впервые систематизированы и обобщены результаты по химической структуре волн ФГГ на обедненных и обогащенных смесях. Подробно рассмотрены особенности образования оксидов азота, зависимости макрохарактеристик волн горения от кинетических свойств смеси, интенсифицирующее влияние турбулентности и возможности достижения предельной эффективности теплового регенеративного цикла в волне ФГГ.

Особое внимание уделено многим практически важным инновационным технологиям на основе фильтрационного горения: термохимической конверсии углеводородов в синтез-газ, фильтрационным радиационным нагревателям, методом очистки пористой среды от органических примесей, эффективной утилизации городских отходов и т. д.

Предназначена для широкого круга научных работников, инженеров и преподавателей в области горения, химической технологии, тепло- и массопереноса, теплоэнергетики и смежных областей. Может быть использована в качестве спецкурса по теории и практике фильтрационного горения для студентов и аспирантов ВУЗов теплотехнических, теплофизических и химико-технологических специальностей.

Табл. 13. Ил. 128. Библиогр.: 305 назв.

#### Р е ц е н з е н т ы:

член-корреспондент НАН Беларуси В. А. Бородуля  
доктор физико-математических наук Б. Б. Хина

*В 389020*

ЦНБ им. Я. КОЛАСА  
НАН Беларуси

© Футько С. И., Жданок С. А., 2004

© Оформление. РУП

«Беларуская навука», 2004

ISBN 985-08-0611-7

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	8
<b>Часть I. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И МОДЕЛИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ ...</b>	<b>11</b>
<i>Глава 1. Внутрипоровая гидродинамика.....</i>	<i>11</i>
1.1. Основные характеристики пористых сред.....	11
1.2. Режимы течения в пористой среде .....	15
1.2.1. Режим Дарси .....	16
1.2.2. Инерционный ламинарный режим.....	17
1.2.3. Нестационарный ламинарный режим .....	17
1.2.4. Турбулентный режим .....	18
1.3. Зависимость гидравлического сопротивления от режима течения .....	19
1.4. Особенности режимов течений в сложных за- сыпках .....	22
1.5. Зависимость коэффициента теплообмена от ре- жима течения.....	24
1.6. Детальная структура турбулентного внутрипо- рового потока газа .....	27
<i>Глава 2. Детальные кинетические механизмы окисле- ния углеводородов .....</i>	<i>37</i>
2.1. Основные способы описания кинетики .....	37
2.1.1. Глобальные (брутто) схемы .....	37
2.1.2. Детальные кинетические схемы .....	38
2.1.3. Скелетные схемы .....	39
2.1.4. Сокращенные схемы .....	40
2.2. Основные методы теоретического анализа де- тальных кинетических механизмов .....	41

2.2.1. Анализ производства (расходования) реагентов .....	42
2.2.2. Анализ чувствительности.....	43
2.3. Методы построения детальных кинетических механизмов .....	44
2.4. Современные детальные механизмы окисления метана .....	45
2.5. Детальные механизмы сложных углеводородов	46
2.5.1. Алканы .....	47
2.5.2. Циклоалканы .....	55
2.5.3. Алкены .....	58
2.5.4. Алкины.....	60
2.5.5. Ароматические соединения .....	62
2.5.6. Оксигенаты.....	65
2.6. Моделирование практических углеводородных топлив. ....	65
2.6.1. Природный газ .....	66
2.6.2. Бензин.....	66
2.6.3. Керосин .....	67
2.6.4. Дизельное топливо.....	69

**Глава 3. Базовые математические модели волн фильтрационного горения газов .....** 71

3.1. Введение.....	71
3.2. Экспериментальные данные.....	74
3.3. Двухтемпературная модель ФГГ.....	79
3.4. Однотемпературное приближение.....	85
3.5. Влияние внешних теплопотерь .....	92
3.6. Обобщение модели с узкой реакционной зоной на случай детальных кинетических схем .....	95

**Часть II. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ...** 101

**Глава 4. Механизм ограничения максимальных температур в волнах фильтрационного горения газов .....** 101

4.1. Экспериментальные данные и их обработка....	102
4.1.1. Классификация по параметру $\varphi_1$ .....	106
4.1.2. Автомодельность решения для волны ФГГ при $\varphi_1 \rightarrow 1$ .....	108
4.2. Аналитические решения при $\varphi_1 \ll 1$ и $\varphi_1 \rightarrow 1$ .	109
4.3. Влияние состава смеси.....	111

4.4. Оценка кинетических коэффициентов.....	115
4.5. Предельная эффективность теплового рекуперативного цикла волны ФГГ.....	117

**Глава 5. Учет турбулентности в моделях фильтрационного горения газов.....** 123

5.1. Модель турбулентного пламени.....	123
5.2. Поправка на турбулентность для стабилизированных пламен. ....	125
5.3. Поправка на турбулентность для волны ФГГ... ..	129
5.4. Режимы турбулентного ФГГ.....	132

**Часть III. ХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ВОЛН ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ.....** 135

**Глава 6. Химическая структура волн фильтрационного горения обедненных метановоздушных смесей.....** 135

6.1. Экспериментальные данные.....	136
6.2. Кинетический анализ химической структуры волн ФГГ обедненных метановоздушных смесей.....	138
6.2.1. Структура тепловыделения.....	142
6.2.2. Область «низких» температур в зоне предварительного подогрева.....	144
6.2.3. «Промежуточная» область в зоне предварительного подогрева.....	147
6.2.4. Область «высоких» температур. Экзотермический пик 1.....	153
6.2.5. Экзотермический пик 2.....	156

**Глава 7. Химическая структура волн фильтрационного горения обогащенных метановоздушных смесей.....** 159

7.1. Зависимость выходного состава продуктов горения от максимальной температуры газа в волне ФГГ.....	159
7.2. Неравновесность состава продуктов в волне ФГГ обогащенных метановоздушных смесей.....	163
7.3. Кинетический анализ химической структуры волн ФГГ обогащенных метановоздушных смесей.....	164
7.3.1. Структура тепловыделения.....	164
7.3.2. Область «низких» температур в зоне предварительного подогрева.....	167

7.3.3. «Промежуточная» область в зоне предварительного подогрева .....	169
7.3.4. Область «высоких» температур. Экзотермический пик.....	174
7.3.5. Эндотермическая зона .....	178
<b>Глава 8. Влияние кинетических свойств смеси на макрохарактеристики волн фильтрационного горения газов.</b>	182
8.1. Кинетические особенности обогащенных смесей по сравнению с обедненными.....	184
8.2. Влияние состава смеси и расхода газа на макрохарактеристики волн ФГГ.....	193
<b>Глава 9. Анализ механизмов образования оксидов азота при фильтрационном горении газов.....</b>	200
9.1. Образование $\text{NO}_x$ в волне ФГГ обедненных смесей .....	204
9.2. Особенности генерации оксидов азота в волне ФГГ обогащенных смесей .....	209
<b>Часть IV. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ.....</b>	214
<b>Глава 10. Фильтрационный радиационный нагреватель дискового типа .....</b>	216
10.1. Математическая модель .....	217
10.2. Зависимость локализации фронта горения от калорийности смеси и внешних теплопотерь .....	221
10.3. Экспериментальные данные и их обсуждение .....	224
<b>Глава 11. Очистка пористой среды от органических примесей методом встречных волн фильтрационного горения.....</b>	229
11.1. Эксперимент .....	229
11.2. Математическая модель .....	232
11.3. Зависимость характеристик волны от содержания метана, конденсированной органики и воды..	235

<b>Глава 12. Термохимическая конверсия углеводородов в синтез-газ в режиме фильтрационного горения.....</b>	<b>246</b>
12.1. Фильтрационное горение водорода.....	247
12.2. Фильтрационное горение метана.....	250
12.3. Фильтрационное горение сероводорода.....	263
12.4. Фильтрационное горение керосина.....	269
12.5. Фильтрационное горение гептана.....	274
12.6. Фильтрационное горение сланцев.....	277
12.7. Фильтрационное горение биомассы.....	280
Литература.....	291
Предметный указатель.....	317