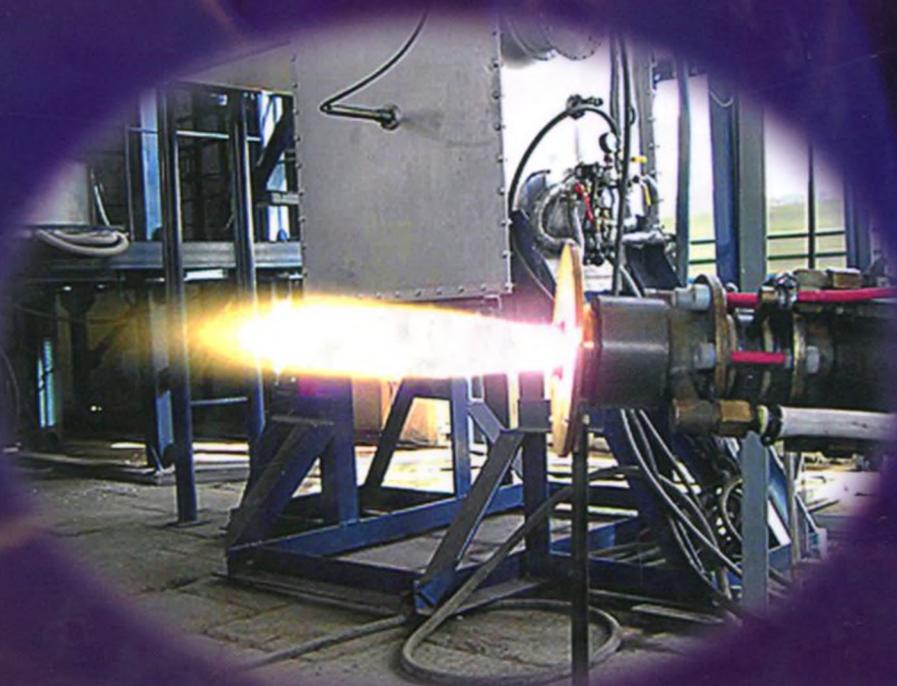


662.76  
П30



С. В. Петров, В. А. Жовтянский

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ПАРОПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ГАЗА

С. В. ПЕТРОВ, В. А. ЖОВТЯНСКИЙ

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ  
ПАРОПЛАЗМЕННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ**

---

*ПРОЕКТ  
«НАУКОВА КНИГА»*

---

КИЕВ • НАУКОВА ДУМКА • 2019

УДК 662.65: 662.763: 621.387.14: 537.528

В монографии обобщены и развиты методы применения пароводяной плазмы для конверсии углеродсодержащих материалов и переработки отходов, в первую очередь опасных. Основной акцент сделан на перспективу промышленного применения процессов с использованием пароводяной плазмы как в небольших мобильных установках, так и в крупнотоннажном производстве. Изложены методики инженерных расчетов пароводяных плазмотронов.

Для экологов, специалистов в областях обращения с отходами и возобновляемых источников энергии, плазмы, высокотемпературных химических процессов и плазмохимического аппаратостроения.

У монографії узагальнено та розвинено методи застосування пароводяної плазми для конверсії вуглецевмісних матеріалів і переробки відходів, у першу чергу небезпечних. Основний наголос зроблено на перспективу промислового застосування процесів із використанням пароводяної плазми як в невеликих мобільних установках, так і у великотоннажному виробництві. Викладено методики інженерних розрахунків пароводяних плазмотронів.

Для екологів, фахівців у сферах поводження з відходами та відновлюваних джерел енергії, плазми, високотемпературних хімічних процесів і плазмохімічного апаратобудування.

Рецензенты :

академик НАН Украины, доктор технических наук *И. В. Кривцун*,  
доктор технических наук *И. Я. Сигал*

*Утверждено к печати ученым советом Института газа НАН Украины  
(протокол № 10 от 27.07.2017 г.)*

*Видання здійснено за кошти Цільової комплексної програми  
«Створення та розвиток науково-видавничого комплексу  
НАН України»*

Научно-издательский отдел физико-математической  
и технической литературы

Редактор *О. А. Микитенко*

ISBN 978-966-00-1683-5

© С. В. Петров, В. А. Жовтянский, 2019  
© НПП «Видавництво “Наукова думка”  
НАН України», дизайн, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	5
<b>Глава 1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ С ИЗВЛЕЧЕНИЕМ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА .....</b>	<b>9</b>
1.1. Отходы как возобновляемый источник энергии .....	9
1.2. Классические технологии конверсии топлив. Краткий исторический экскурс.....	11
1.3. Плазменные технологии в проблеме конверсии низкокачественных топлив.....	13
1.4. Газификаторы с применением плазменных технологий и инсинераторы .....	21
1.5. Газификация отходов: экологические и технологические риски.....	23
1.5.1. Загрязнения в газовой фазе .....	23
1.5.2. Загрязняющие вещества в конденсированной фазе .....	28
1.5.3. Опасность загрязнения тяжелыми металлами .....	30
1.6. О применимости приближения равновесного состояния .....	32
1.6.1. Модели равновесного состояния. Принцип детального равновесия .....	32
1.6.2. Отклонения от равновесного состояния плазмы.....	32
1.6.3. Условия равновесия в классических технологиях газификации.....	33
1.6.4. Условия равновесия в установках для газификации с применением плазменных технологий .....	37
1.7. Методика термодинамического расчета процесса газификации с применением плазменных технологий.....	37
1.8. Водоиловая смесь и донные илы: условия образования, состав и результаты предварительных лабораторных исследований процессов их газификации .....	48
1.9. Термодинамический анализ процессов плазменно-парокислородной конверсии донного ила .....	53
1.9.1. Стехиометрический режим производства синтез-газа.....	54
1.9.2. Конверсия донного ила с введением избыточного количества кислорода .....	58
1.10. Сопоставление эффективности кислородного и воздушного дутья в процессах газификации с применением плазменных технологий .....	64
1.10.1. Общие закономерности плазменно-паровоздушной газификации донных илов .....	65
1.10.2. Учет образования оксидов азота в процессах плазменно-паровоздушной газификации донных илов .....	69
1.11. Анализ энергетических показателей донных илов .....	70
1.11.1. Сопоставление полуэмпирических формул для определения теплотворной способности некондиционных топлив .....	71
1.11.2. Уточнение состава донных илов .....	72
1.12. Лабораторные исследования процессов плазменно-паровой газификации донных илов станции водоочистки Ивано-Франковска .....	73
1.12.1. Термодинамическое моделирование .....	74

## Оглавление

1.12.2. Экспериментальные исследования плазменно-паровой газификации донных илов и их смеси с резиновым крошечком изношенных шин .....	75
1.13. Пилотный вариант технологической линии для переработки донных илов.....	79
1.14. Сопоставление некоторых технологий переработки отходов по ценовым показателям .....	80
1.15. Перспективы переработки радиоактивных отходов .....	81
<b>Г л а в а 2. ПАРОВОДЯНАЯ ПЛАЗМА В ПРИБЛИЖЕНИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ .....</b>	<b>84</b>
2.1. Расчет термодинамического равновесия .....	86
2.2. Аномальность свойств пароводяной плазмы .....	90
2.3. Переносные свойства паровой плазмы .....	93
<b>Г л а в а 3. ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ ПАРОВОДЯНАЯ ПЛАЗМА В НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ .....</b>	<b>116</b>
3.1. История исследований и особенности неравновесной плазмы атмосферного давления .....	116
3.2. Химически активная плазма водяного пара с неравновесным колебательным возбуждением молекул.....	135
3.3. Колебательная релаксация неравновесной плазмы водяного пара .....	160
3.4. Неравновесные плазмохимические процессы .....	170
3.5. Особенности влияния неравновесности .....	177
<b>Г л а в а 4. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ПАРОВОДЯНОЙ ПЛАЗМЫ .....</b>	<b>186</b>
4.1. Принципиальные схемы электродуговых генераторов пароводяной плазмы .....	187
4.2. Особенности работы паро вихревого плазмотрона .....	190
4.3. Условия стабильной работы паровихревого плазмотрона .....	192
4.4. Электрическая дуга в водяном паре .....	200
4.5. Электродуговые генераторы пароводяной плазмы .....	203
4.5.1. Конструктивные особенности и схемы паровихревых плазмотронов .....	203
4.5.2. Параметры теплообмена в плазмотроне с вихревой стабилизацией дуги водяным паром .....	210
4.5.3. Обобщенные энергетические характеристики паровихревых плазмотронов .....	213
4.5.4. Обобщенная вольт-амперная характеристика электрической дуги в паровихревых плазмотронах .....	215
4.5.5. Обобщенная тепловая характеристика паровихревого плазмотрона .....	219
4.5.6. Паровихревые автоплазмтроны .....	224
4.5.7. Энергетические характеристики автоплазмтрона .....	231
<b>Г л а в а 5. НЕРАВНОВЕСНОСТЬ В СВЧ-РАЗРЯДЕ .....</b>	<b>237</b>
5.1. Источник неравновесной микроволновой плазмы атмосферного давления .....	242
5.2. Неравновесность движущегося СВЧ-разряда .....	249
5.3. Неравновесный стримерный СВЧ-разряд .....	255
5.4. О технологических применениях СВЧ $H_2O$ плазмы атмосферного давления .....	260
<b>Г л а в а 6. КОНВЕРСИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ В ПАРОВОЙ ПЛАЗМЕ .....</b>	<b>272</b>
6.1. Плазменные технологии газификации энергетических углей .....	274
6.2. Конверсия углеводородов в плазме водяного пара .....	294
6.3. Газификация углеродсодержащих отходов.....	304

## Оглавление

6.4. Плазменно-паровая деструкция и обеззараживание полихлорированных бифенилов и галогенизированных углеводов с озоноразрушающими и парниковыми свойствами .....	343
6.5. Плазменная технология в безопасной минимизации радиоактивных отходов.....	355
6.6. Газификация биомассы .....	368
6.7. Удаление смолы электрическим разрядом .....	384
6.8. Экономический анализ малотоннажных плазменных систем преобразования отходов в энергию .....	388
<b>Глава 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ВОДНОМ РАСТВОРЕ .....</b>	<b>393</b>
7.1. Феноменология и инициирование разряда.....	394
7.2. Поверхностные явления .....	406
7.3. Поведение газового пузыря с электрическим разрядом .....	413
7.4. Электрический разряд в диспергированной жидкости .....	421
7.5. Электрический разряд в воде — источник химически активных частиц.....	427
7.6. Трансформация озono-гидроксильной смеси в условиях электрического разряда .....	446
7.7. Физико-химические процессы, инициируемые плазмой в растворе.....	456
7.8. Технологические процессы в водных растворах, стимулируемые электрическим разрядом .....	462
7.8.1. Извлечение ионов тяжелых металлов из водных растворов .....	462
7.8.2. Извлечение радионуклидов из водных растворов .....	475
7.8.3. Воздействия электрического разряда в газожидкостном потоке на микроорганизмы .....	485
7.8.4. Плазменная деструкция растворенных в воде органических веществ.....	494
7.8.5. Электроимпульсная дезинтеграция упорных руд золота, дана и редких металлов .....	504
7.9. О создании промышленного оборудования плазмохимической обработки водных растворов с использование импульсного электрического разряда .....	508
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	519