



А. И. Агафонов
Р. А. Агафонов
В. И. Чернецов

 «Инфра-Инженерия»

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МЕТАНО-ВОДОРОДНОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ И ВОДОРОДНЫХ
ЭНЕРГОХИМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

А. И. Агафонов, Р. А. Агафонов, В. И. Чернецов

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МЕТАНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
И ВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

*Допущено УМО вузов России по образованию в области энергетики
и электротехники в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки
«Электроэнергетика» специальности «Водородная энергетика»*

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2023

УДК 620.92
ББК 31.15
А23

Рецензенты:

заведующий кафедрой общей химической технологии и катализа Санкт-Петербургского государственного технологического института (технологического университета) профессор, д. х. н. *Е. А. Власов*; д. т. н., профессор кафедры приборостроения ПГУ *Т. И. Мурашкина*

Агафонов, А. И.

А23 Основы проектирования метано-водородной энергетики и водородных энергохимических комплексов : учебное пособие / А. И. Агафонов, Р. А. Агафонов, В. И. Чернецов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 364 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-1426-5

Рассматриваются проблемы и перспективы развития водородной энергетики, дано обоснование задержки развития и внедрения атомно-водородного и солнечно-водородного направлений и перспектив их развития, обоснован выбор метано-водородного направления развития водородной энергетики. Дано обоснование возобновляемости запасов нефти и газа как основы развития метано-водородной энергетики, определена её сырьевая база на длительный период. Приведены основные направления повышения энергоэффективности и экологии метано-водородной энергетики. Даны основы химической кинетики, катализа, адсорбции и десорбции, активированного комплекса, термоэлектронной эмиссии на поверхности катализатора, химической технологии.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электротехника» специальности «Водородная энергетика».

УДК 620.92
ББК 31.15

ISBN 978-5-9729-1426-5

© Агафонов А. И., Агафонов Р. А., Чернецов В. И., 2023
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	8
1. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО НАПРАВЛЕНИЯ	18
1.1. Энергоресурсы мировой энергетики и проблемы экологической безопасности	18
1.2. О причинах появления и задержки развития концепции водородной энергетики	22
1.3. Состояние работ в России в области водородной энергетики	24
1.4. Общие сведения о физико-химических свойствах водорода с учётом его применения в энергетике	26
1.5. Анализ перспектив развития атомно-водородного и солнечно-водородного направлений водородной энергетики	28
1.6. Обоснование выбора метано-водородного направления водородной энергетики в XXI веке как наименее затратного, наиболее эффективного, широко применяемого в промышленности и поэтому быстро реализуемого направления	29
1.7. Анализ способов производства водорода и выбор наиболее эффективного, быстро внедряемого и в значительной мере возобновляемого способа производства водорода для энергетики.....	32
Литература к главе 1	34
2. СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА В ХИМИЧЕСКОЙ, НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ, НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ	36
2.1. Общая характеристика способов производства водорода	36
2.2. Физические методы извлечения водорода из водородосодержащих газов	36
2.3. Электрохимический способ получения водорода	37
2.4. Термическое разложение углеводородов	40
2.5. Биологические способы получения водорода	41
2.6. Промышленные методы производства водорода, структура потребления и основные направления повышения их эффективности.....	43
2.7. Общие представления о процессе паровой каталитической конверсии природного газа (метана) и жидких углеводородов	45
2.8. Техничко-экономическое и экологическое обоснование выбора способа производства водорода для энергетики	47
Литература к главе 2	50

3. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....	52
3.1. Анализ проблем применения водорода в энергетике.....	52
3.2. Проблема «лучистой энергии» при сжигании водорода.....	53
3.3. Анализ проблемы взрывоопасности, пожароопасности применения водорода в энергетике и обоснование необходимости «водородного всеобуча»	54
3.4. О проблеме выбора сырьевой базы водородной энергетики и источника энергии для получения водорода.....	55
Литература к главе 3	57
4. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ВОДОРОДА	59
4.1. О проблемах хранения, транспортирования и аккумуляирования водорода	59
4.2. Способ хранения водорода в баллонах под давлением.....	59
4.3. Способ хранения водорода в криогенном состоянии в баллонах	60
4.4. Способ хранения водорода в интерметаллических аккумуляторах.....	61
4.5. Перспективный способ хранения водорода в химических соединениях	62
Литература к главе 4	62
5. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОСТИ ЗАПАСОВ НЕФТИ И ПРИРОДНОГО ГАЗА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСНОЙ БАЗЫ МЕТАНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	63
5.1. Анализ современного состояния проблем происхождения нефти и природного газа	63
5.2. Сравнительный анализ органической и неорганической («минеральной») концепций нефтегазообразования.....	63
5.3. Научная концепция нефтегазообразования д. г.-м. н. В. Ларина.....	65
5.4. Научная концепция Р. А. Исмагилова и М. Ф. Фархутдинова.....	67
5.5. Научная концепция по энергетике осадочных процессов П. П. Тимофеева, А. В. Щербакова, В. А. Ильина	67
5.6. Открытие академика Якутского филиала СО АН СССР Н. В. Черского об активном участии в процессах непрерывного нефтегазообразования упругих волн сейсмотектонических процессов как из органических, так и из неорганических веществ с экспериментальным подтверждением.....	71
5.7. Практические подтверждения возобновляемости запасов нефти и природного газа	73
5.8. О проблемах образования и добычи природного газообразного водорода из скоплений водорода в недрах Земли в результате её дегазации	75
5.9. Определение сырьевой базы метано-водородной энергетики	78
Литература к главе 5	79

6. О РОЛИ И ОСНОВАХ ХИМИЧЕСКОЙ НАУКИ, ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ: КИНЕТИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ, КАТАЛИЗА, ЭНЕРГИИ ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ И ЕЁ АКТИВАЦИИ, АДСОРБЦИИ И ДЕСОРБЦИИ В РАЗВИТИИ МЕТАНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	83
6.1. О роли химической науки и химической технологии в развитии современной цивилизации.....	83
6.2. Понятие о химической технологии, о разработке экономичных способов крупномасштабного производства и потребления водорода, объединяющего энергетику и химическую технологию	87
6.3. Основные законы химии.....	89
6.4. Общие представления о химической кинетике и термодинамике	97
6.5. Химическая связь в веществах.....	99
6.6. Активация молекул и проблемы реакционной способности	116
6.7. Основы катализа	119
6.8. Основные стадии и кинетические особенности гетерогенно-каталитических процессов	124
6.9. Каталитические свойства переходных металлов периодической системы для катализаторов	139
6.10. Активированный комплекс, поверхность металлов, термоэлектронная и фотоэлектронная эмиссия	144
Литература к главе 6	150
7. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ ВОДОРОДА, ПОЛУЧЕННОГО СПОСОБОМ ПАРОВОЙ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА	152
7.1. Особенности обоснования энергоэффективности ПКК природного газа в водород для энергетики	152
7.2. Сравнительный анализ термодинамических, термохимических, каталитических и энергетических процессов как при термической диссоциации природного газа и воды, так и при ПКК природного газа в водород для энергетики	153
7.3. Анализ энергетической схемы, связывающей теплоты образования веществ, энергии связи, энергий сгорания, диссоциации на атомы, их синтеза в простые вещества, сложные соединения	156
7.4. Сравнительный анализ теплоты окисления природного молекулярного углерода (угля, графита, алмаза) и теплоты окисления атома углерода молекулы метана (CH ₄) с атомом кислорода молекулы воды при ПКК природного газа	158
7.5. Обоснование и расчёт энергоэффективности применения в энергетике водорода, полученного способом ПКК природного газа.....	162

7.6. О применении водородного пароперегрева как способа повышения энергоэффективности, экологии и электрического КПД при сжигании водорода в кислороде.....	166
Литература к главе 7	169

8. ОБ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ, ЭКОЛОГИИ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИИ, СНИЖЕНИИ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ ПРИ СОЗДАНИИ ВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....

8.1. Анализ технических способов повышения КПД ПКС природного газа, ресурсосбережения, экологии при проведении ПКС природного газа	171
8.2. Обоснование применения технологии разделения воздуха на кислород и азот как при ПКС природного газа в водород, так и при применении водорода в энергетике, производстве химической продукции	175
8.3. О роли химической технологии в повышении эффективности производства водорода для энергетики	179
8.4. О разработке новых способов повышения КПД, экологической чистоты при производстве водорода способом ПКС природного газа	182
8.5. О разработке и применении комплексной, высокоэффективной, экологически чистой и безотходной технологии производства водорода способом ПКС природного газа и его применение в энергетике, в производстве химической продукции, чистого пара (воды)	189
Литература к главе 8	204

9. ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА СПОСОБОМ ПАРОВОЙ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА КАК ОСНОВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....

9.1. Состояние работ в области производства водорода способом ПКС природного газа в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности и металлургии.....	211
9.2. Подготовка сырья к каталитической конверсии	212
9.3. Производство водорода и синтез-газа способом паровой каталитической конверсии природного газа	213
9.4. Основное технологическое оборудование производства водорода. Химические реакторы	225
9.5. Основные правила эксплуатации установок производства водорода	239
9.6. Основные правила аварийной остановки производства	262
9.7. Контроль производства и автоматическое управление производством.....	267
9.8. Техника безопасности при производстве и использовании водорода.....	269
Литература к главе 9	282

10. О ПРОЕКТЕ СОЗДАНИЯ ДЕМОСТРАЦИОННЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТАНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПО БЕЗОТХОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ И ПОЛНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ.....	284
10.1. Научно-техническая и практическая база создания демонстрационных образцов водородной энергетики	286
10.2. Назначение и цели создания демонстрационных образцов (дем. обр.)	286
Литература к главе 10	290
11. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЕКТА СОЗДАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И МЕТАНО-ВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	296
11.1. Научные результаты прикладных исследований в области создания метано-водородной энергетики и водородных энергохимических комплексов	296
11.2. Основные технико-экономические, экологические и интеллектуальные показатели проекта создания и крайние сроки внедрения метано-водородной энергетики	323
11.3. Основные этапы после завершения работ по созданию демонстрационных образцов метано-водородной энергетики, их изготовления, проведения испытаний и получения положительных результатов испытаний	350
Литература к главе 11	353