

Объединение независимых экспертов в области минеральных ресурсов,
металлургии и химической промышленности



**Обзор рынка
водорода («серого»,
«голубого», «зеленого»)
и оборудования для
его производства
в России и мире**

5 издание

Москва
май, 2024

Демонстрационная версия

С условиями приобретения полной версии отчета можно ознакомиться на странице сайта по адресу: <http://www.infomine.ru/research/14/248>

Общее количество страниц: 166 стр.

Стоимость отчета различных комплектаций поставки:

1. **Базовая** - файл формата PDF - 96 тыс.рублей
2. **Расширенная** - файлы формата PDF + Word - 102 тыс.рублей
3. **Пользовательская** - файлы формата PDF + Word + первичные базы в Excel - 108 тыс.рублей
4. **Представительская** - файлы формата PDF + Word + первичные базы в Excel + 2 экз. печатной версии подписанных, прошитых, с подписью генерального директора и скрепленных печатью компании - 113 тыс.рублей
5. **Максимальная** - файлы формата PDF + Word + первичные базы в Excel + 2 экз. печатной версии подписанных, прошитых, с подписью генерального директора и скрепленных печатью компании + презентация, изготовленная на основании данных отчета в .ppt - 133 тыс.рублей

Этот отчет был подготовлен экспертами ООО «ИГ «Инфомайн» исключительно в целях информации. Содержащаяся в настоящем отчете информация была получена из источников, которые, по мнению экспертов Инфомайн, являются надежными, однако Инфомайн не гарантирует точности и полноты информации для любых целей. Инфомайн приложил все возможные усилия, чтобы проверить достоверность имеющихся сведений, показателей и информации, содержащихся в исследовании, однако клиенту следует учитывать наличие неустраняемых сложностей в процессе получения информации, зачастую касающейся непрозрачных и закрытых коммерческих операций на рынке. Исследование может содержать данные и информацию, которые основаны на различных предположениях, некоторые из которых могут быть неточными или неполными в силу наличия изменяющихся и неопределенных событий и факторов. Кроме того, в ряде случаев из-за погрешности при округлении, различий в определениях, терминах и их толкованиях, а также использования большого числа источников, данные могут показаться противоречивыми. Инфомайн предпринял все меры для того, чтобы не допустить очевидных несоответствий, но некоторые из них могут сохраняться.

Информация, представленная в этом отчете, не должна быть истолкована, прямо или косвенно, как информация, содержащая рекомендации по инвестициям. Все мнения и оценки, содержащиеся в настоящем материале, отражают мнение авторов на день публикации и подлежат изменению без предупреждения. Инфомайн не проводит какую-либо последующую работу по обновлению, дополнению и изменению содержания исследования и проверке точности данных, содержащихся в нем. Инфомайн не несет ответственность за какие-либо убытки или ущерб, возникшие в результате использования любой третьей стороной информации, содержащейся в настоящем отчете, включая опубликованные мнения или заключения, а также последствия, вызванные неполнотой представленной информации.

Этот документ или любая его часть не может распространяться без письменного разрешения Инфомайн либо тиражироваться любыми способами. Заказчик имеет право проводить аудит (экспертизу) исследований рынков, полученных от Исполнителя только в компаниях, имеющих членство ассоциации промышленных маркетологов ПРОММАР (<http://www.prommar.ru>) или силами экспертно-сертификационного совета ассоциации ПРОММАР. В других случаях отправка исследований на аудит или экспертизу третьим лицам считается нарушением авторских прав.

Copyright © ООО "ИГ " Инфомайн ".

СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация	10
Введение	12
I. Способы производства водорода	17
II. Краткая характеристика мирового рынка водорода в 1990-2023 гг.	22
II.1. Анализ текущего состояния рынка, традиционные направления использования водорода.....	22
II.2. Анализ перспектив использования водорода в новых секторах потребления	28
II.2.1. Энергетика	30
II.2.2. Транспорт.....	33
II.2.3. Здания.....	36
II.2.4. Промышленность	37
II.3. Драйверы роста потребления водорода в мире	38
II.4. Прогноз развития мировой водородной экономики на период до 2050 г.	40
III. Российский рынок водорода	42
III.1. Качество выпускаемой продукции	42
III.2. Производство водорода	44
III.2.1. Динамика и структура производства в 2004-2023 гг.	44
III.2.2. Основные производители и поставщики товарного водорода на российском рынке	50
III.3. Структура цен на водород.....	59
III.3.1. Стоимость производства водорода.....	59
III.3.2. Цены поставщиков водорода.....	62
III.3.3. Стоимость транспортировки и хранения.....	63
III.4. Потребление водорода.....	65
III.4.1. Объемы и структура потребления в 2004-2023 гг.	65
III.4.2. Характеристика основных потребляющих отраслей	68
Химическая промышленность	68
Нефтепереработка	79
Металлургия.....	84
Электроника и электротехника	92
Электроэнергетика	94
Прочие	95
III.5. Транспортировка водорода в пределах России	100
III.5.1. Способы транспортировки.....	100
III.5.2. География и объемы поставок товарного водорода	103
III.6. Хранение водорода.....	105
III.7. Оборудование для производства и компримирования водорода.....	109

III.7.1. Электролизеры	112
III.7.2. Установки для производства водорода методом конверсии природного газа	121
III.7.3. Установки для извлечения водорода из технологических потоков	125
III.7.4. Компрессоры	129
III.7.5. Зарубежные поставщики оборудования	132
III.8. Прогноз производства и потребления водорода	137
III.8.1. Концепция развития водородной энергетики в РФ.....	137
III.8.2. Прогноз производства и потребления водорода в России (вне рамок развития «водородной энергетики») на период до 2035 г.....	150
Приложение 1. Контактная информация крупнейших российских предприятий-производителей водорода.....	152
Приложение 2. Контактная информация крупнейших российских предприятий-поставщиков водорода.....	153
Приложение 3. Долгосрочные программы крупнейших стран и регионов мира по развитию водородной энергетики	154
Приложение 4. Установки риформинга на нефтеперерабатывающих предприятиях России	163
Приложение 5. Установки гидрокрекинга на нефтеперерабатывающих предприятиях России	165

СПИСОК ТАБЛИЦ

- Таблица 1: Выборочные свойства нормального водорода и параводорода, имеющие отношение к его безопасности
- Таблица 2: Содержание водорода в основных промышленных источниках сбросных водородосодержащих газов, %
- Таблица 3: Типы водорода в зависимости от способа получения и используемого сырья
- Таблица 4: Заявленные национальные цели по сокращению выбросов парниковых газов
- Таблица 5: Национальные цели по распространению водородных автомобилей на топливных элементах (тыс. штук) и заправок (штук)
- Таблица 6: Драйверы глобального «энерготехнологического перехода»
- Таблица 7: Прогноз мирового потребления водорода по сегментам, млн т
- Таблица 8: Норма для водорода технического газообразного (согласно ГОСТ 3022-80)
- Таблица 9: Норма для водорода чистого газообразного (согласно ГОСТ Р 51673-2000)
- Таблица 10: Показатели качества водорода особо чистого (ОСЧ) по ТУ 2118-06-18136415-05
- Таблица 11: Показатели качества водорода технического повышенной чистоты (ТПЧ) по ТУ 2118-05-18136415-05
- Таблица 12: Производство водорода предприятиями России в 2021-2023 гг., тыс. м³, тыс. т
- Таблица 13: Производство водорода по отраслям в 2010-2023 гг., тыс. т
- Таблица 14: Крупнейшие российские производители товарного водорода
- Таблица 15: Производство водорода предприятиями ООО "Эр Ликид" в 2014-2023 гг., тыс. м³, т
- Таблица 16: Преимущества и недостатки основных методов получения водорода
- Таблица 17: Стоимость 1 тонны товарного водорода при крупномасштабном производстве различными методами, \$
- Таблица 18: Цены на водород крупнейших поставщиков
- Таблица 19: Удельная стоимость трубопроводного транспортирования газообразного водорода при давлении 7МПа
- Таблица 20: Стоимость баллонов для хранения водорода
- Таблица 21: Производство аммиака и водорода в России в 2017-2023 гг., тыс. т
- Таблица 22: Производство метанола и водорода в России в 2017-2023 гг., тыс. т
- Таблица 23: Производство бутиловых спиртов и водорода в России в 2017-2023 гг., тыс. т
- Таблица 24: Производство электролитической каустической соды и водорода в России в 2017-2023 гг., тыс. т
- Таблица 25: Баланс водорода при неглубокой переработке нефти, тыс. т в год 100%-ного водорода

- Таблица 26: Изменение мощностей по переработке нефти в 2005-2021 гг. в России, млн т, %
- Таблица 27: НПЗ России, имеющие дополнительные установки по производству водорода
- Таблица 28: Условия проведения термической обработки холоднокатаного проката на металлургических предприятиях РФ
- Таблица 29: Объемы производства холоднокатаного проката и потребление водорода в России в 2010-2023 гг., тыс. т
- Таблица 30: Технические характеристики железнодорожной и автомобильной цистерны для перевозки жидкого водорода
- Таблица 31: Крупнейшие российские поставщики водорода в баллонах
- Таблица 32: Объемы перевозок водорода в баллонах ж/д транспортом в 2005-2023 гг., шт.
- Таблица 33: Сравнительные характеристики электролизеров для производства водорода
- Таблица 34: Технические характеристики промышленных электролизеров СЭУ АО "Уралхиммаш"
- Таблица 35: Технические характеристики промышленных электролизеров БЭУ и ФВ АО "Уралхиммаш"
- Таблица 36: Основные технические характеристики электролизной установки ФС-10.25 производства "ИФТИ"
- Таблица 37: Предприятия-получатели установок серии ФС производства ООО "ИФТИ"
- Таблица 38: Краткие технические характеристики генератора водорода "ЭЛДИС-130"
- Таблица 39: Технические характеристики установки конверсии природного газа УВР-250 (НПП "Машпром")
- Таблица 40: Технические характеристики мембранных водородных установок ООО "Грасис"
- Таблица 41: Технические характеристики адсорбционных водородных установок ООО "Грасис"
- Таблица 42: Технические характеристики поршневых компрессоров типа 6ГШ
- Таблица 43: Технические характеристики поршневого компрессора 2ГМ4-9,6/161
- Таблица 44: Технические характеристики поршневых компрессоров фирмы ComAir
- Таблица 45: Крупнейшие поставщики промышленных электролизеров на российский рынок в 2010-2023 гг., штук
- Таблица 46: Технические характеристики атмосферного электролизера производства компании Norsk Hydro Electrolysers
- Таблица 47: Целевые показатели по российскому экспорту водорода на период до 2050 г., млн т, млрд \$
- Таблица 48: Мероприятия и сроки реализации плана «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 г.»

Таблица 49: Стратегические инициативы и ключевые меры по развитию водородной энергетики в РФ

Таблица 50: Основные российские научно-исследовательские организации, участвующие в работах по водородной энергетике и топливным элементам

Таблица 51: Этапы развития «водородной энергетики» в России

Таблица 52: Основные российские проекты в сфере водородной энергетики

СПИСОК РИСУНКОВ

- Рисунок 1: Динамика мирового производства водорода (чистого и в составе смесей) в 1990-2023 гг. и прогноз до 2030 г., млн т
- Рисунок 2: Структура мирового производства водорода по способу получения, %
- Рисунок 3: Структура мирового потребления водорода (включая газовые смеси) по отраслям, %
- Рисунок 4: Отраслевая структура мирового потребления водорода (без учета газовых смесей), %
- Рисунок 5: Региональная структура мирового потребления водорода, %
- Рисунок 6: Динамика выбросов CO₂ в мире и цель по снижению к 2030 г., млрд т
- Рисунок 7: Изменение отраслевой структуры потребления водорода к 2050 г., млн т
- Рисунок 8: Мировой парк автомобилей на водородных топливных элементах в 2017-2018 гг. и прогноз на 2030 г., тыс. штук
- Рисунок 9: Динамика производства водорода в России в 2004-2023 гг., млн т
- Рисунок 10: Динамика российского производства водорода крупнейшими отраслями-производителями в 2004-2023 гг., тыс. т
- Рисунок 11: Изменение структуры производства водорода в РФ в 2004-2023 гг., %
- Рисунок 12: Динамика производства водорода в АО "Редкинский опытный завод" в 2009-2023 гг., тыс. м³
- Рисунок 13: Баланс производства и потребления водорода в России в 2004-2023 гг., тыс. т
- Рисунок 14: Структура потребления водорода в 2010 г., 2017 г., 2020 г. и 2023 г., %
- Рисунок 15: Динамика потребления водорода российскими химическими предприятиями в 2004-2023 гг., тыс. т
- Рисунок 16. Динамика и структура производства капролактама в России в 2019-2023 гг., тыс. т
- Рисунок 17: Потребление водорода в нефтепереработке
- Рисунок 18: Динамика потребления водорода в нефтепереработке в России в 2004-2023 гг., тыс. т
- Рисунок 19: Потребление водорода в металлургии
- Рисунок 20: Производство металлизированного сырья (млн т) и потребление водорода в России (тыс. т) в 2004-2023 гг.
- Рисунок 21: Основные российские производители листового стекла
- Рисунок 22: Автореципиент для перевозки водорода в сжатом состоянии
- Рисунок 23: Электролизеры для получения водорода, производства АО "Уралхиммаш"
- Рисунок 24: Установка УВР-250, разработанная АО НПП "Машпром"
- Рисунок 25: Поршневой компрессор типа 6ГШ

Рисунок 26: Поршневой компрессор типа 2ГМ

Рисунок 27: Регионы внедрения водородных технологий на железнодорожном транспорте в РФ

Рисунок 28: Прогноз производства водорода в России на период до 2035 г., млн
т

Аннотация

Настоящий отчет является **пятым изданием** исследования мирового и российского рынка водорода («серого», «голубого», «зеленого» и др.) и оборудования для его производства.

Цель исследования – анализ мирового и российского рынка водорода и оборудования для его производства.

Объект исследования – водород («белый», «серый», «голубой», «зеленый», «коричневый», «желтый» и др.), оборудование для его производства.

Представленная работа является **кабинетным исследованием**. В качестве **источников информации** использовались Росстата; Федеральной таможенной службы РФ (до 2022 г.); статистики железнодорожных перевозок; базы СБИС; годовых и квартальных отчетов эмитентов ценных бумаг; отраслевой и региональной прессы, материалов конференций, интернет-сайтов предприятий-производителей и потребителей исследуемой продукции; научно-технической литературы (elibrary и др.), база патентов ФИПС; база данных «Инфомайн» и т.д.

Особенностями исследования являются: разделение объекта исследования на типы («серый», «голубой», «зеленый» и др. водород), а также подробное рассмотрение имеющихся концепций развития «водородной» энергетики различных стран.

Хронологические рамки исследования: 2004-2023 гг.; прогноз – 2024-2035 гг.

География исследования: мир – краткий обзор, Российская Федерация – комплексный подробный анализ рынка и концепции развития.

Отчет состоит из **3** основных частей, содержит **166** страниц, в том числе **28** рисунков, **52** таблицы и **5** приложений.

Первая глава отчета посвящена технологии производства водорода. В ней рассмотрены способы производства водорода («серого», «голубого», «зеленого» и др.).

Во **второй главе** исследован мировой рынок водорода («серого», «голубого», «зеленого» и др.). В частности, представлено краткое описание текущего состояния рынка (динамика и структура производства и потребления), а также анализ перспектив использования водорода в новых секторах потребления, в том числе, в рамках национальных стратегий развития «водородной» энергетики.

Третья глава посвящена описанию и характеристике российского рынка. В частности, представлены требования к качеству выпускаемой продукции, отражено производство водорода в России в 2004-2023 гг. Дана характеристика тех немногочисленных предприятий, которые вырабатывают товарный водород с целью поставок его на внутренний рынок, а также изучены специализированные газовые компании, занимающиеся продажей водорода.

Кроме того, в главе рассмотрена структура цен на водород: стоимость производства, транспортировки, хранения. Даны цены поставщиков водорода в 2018-2024 гг.

Несколько подразделов главы посвящены исследованию потребления, транспортировки и хранения водорода. Приведены объемы и структура потребления, краткие характеристики текущего состояния основных потребляющих отраслей. Подробно рассмотрены способы хранения и транспортировки водорода, а также география и объемы поставок.

Внешняя торговля водородом практически не ведется, т.к. отсутствует сеть водородопроводов. Существуют лишь небольшие поставки газа в баллонах, не оказывающие заметного влияния на внутренний рынок. Поэтому раздел, посвященный экспорту-импорту водорода, в данной работе отсутствует.

В одном из подразделов главы подробно охарактеризована российская концепция развития «водородной» энергетики, а также дан прогноз производства и потребления водорода в России до 2035 года.

В приложениях приведены данные об особенностях «водородных» Стратегий крупнейших экономик мира, а также установках гидроочистки и гидрокрекинга на НПЗ России, дана контактная информация основных российских предприятий, выпускающих и поставляющих на отечественный рынок товарный водород.

Целевая аудитория исследования:

- участники рынка водорода – производители, потребители, трейдеры;
- потенциальные инвесторы.

Предлагаемое исследование претендует на роль **справочного пособия** для служб маркетинга и специалистов, принимающих управленческие решения, работающих на рынке водорода.

Введение

Водород – бесцветный газ без вкуса и запаха, слабо растворимый в воде (2:100 по объему). Он легко воспламеняется при поджигании и на воздухе горит бледно-голубым, почти невидимым пламенем.

Природный водород состоит из смеси 2 устойчивых изотопов: лёгкого водорода, или протия (1H), и тяжёлого водорода, или дейтерия (2H , или D). В природных соединениях водорода на 1 атом 2H приходится в среднем 6800 атомов 1H . Искусственно получен радиоактивный изотоп – сверхтяжёлый водород, или тритий (3H , или T), с мягким β -излучением и периодом полураспада $T_{1/2} = 12,262$ года. В природе тритий образуется, например, из атмосферного азота под действием нейтронов космических лучей; в атмосфере его ничтожно мало ($4 \cdot 10^{-15}\%$ от общего числа атомов водорода). Получен крайне неустойчивый изотоп 4H . Массовые числа изотопов 1H , 2H , 3H и 4H , соответственно 1, 2, 3 и 4, указывают на то, что ядро атома протия содержит только 1 протон, дейтерия – 1 протон и 1 нейтрон, трития – 1 протон и 2 нейтрона, 4H – 1 протон и 3 нейтрона. Большое различие масс изотопов водорода обуславливает более заметное различие их физических и химических свойств, чем в случае изотопов других элементов.

Водород наиболее легкий химический элемент, он в 14,38 раз легче воздуха. Будучи самым легким газом, водород обладает наибольшей скоростью диффузии. Этим же обусловлена и его высокая теплопроводность, которая при нормальной температуре и атмосферном давлении примерно в 7 раз выше теплопроводности воздуха. На этом свойстве основано применение водорода для охлаждения турбоэлектрогенераторов.

Молекулы H_2 настолько малы, что способны легко проходить не только через мелкие поры, но и сквозь металлы. Некоторые из них, например, никель, могут поглощать большое количество водорода и удерживать его в атомарном виде в пустотах кристаллической решетки. Водород хорошо растворим во многих металлах, лучше всего в палладии. Нагретая до 250°C палладиевая фольга свободно пропускает водород; этим пользуются для тщательной очистки его от других газов.

Водород может находиться в орто- и пара- состояниях. Ортоводород ($o\text{-H}_2$) имеет параллельную (одного знака) ориентацию ядерных спинов, параводород ($p\text{-H}_2$) – антипараллельную. Это обуславливает некоторое различие магнитных, оптических и термических свойств указанных модификаций. При обычных и высоких температурах нормальный водород ($n\text{-H}_2$) представляет собой смесь 75% орто- и 25% пара- модификаций (3:1), которые могут взаимно превращаться друг в друга (орто-пара- превращения). При превращении $o\text{-H}_2 \leftrightarrow p\text{-H}_2$ выделяется тепло (1418 Дж/моль).

Самопроизвольное орто-пара- превращение водорода при низкой температуре происходит очень медленно, что позволяет получать жидкий водород, близкий по орто-пара- составу к $n\text{-H}_2$, хотя термодинамически устойчив при этих условиях только $p\text{-H}_2$.

В таблице 1 представлены выборочные свойства нормального водорода и параводорода, имеющие отношение к его безопасности.

Таблица 1: Выборочные свойства нормального водорода и параводорода, имеющие отношение к его безопасности

Свойства	Нормальный водород	Параводород
Свойства при нормальной температуре и давлении (NTP)		
Температура, °К	293,15	293,15
Давление (абсолютн.), кПа	101,325	101,325
Плотность, кг/м ³	0,08376	0,08376
Удельная теплоемкость при постоянном давлении (Cp), кДж/кг·°К	14,33	14,89
Показатель адиабаты (Cp/Cv)	1,416	1,383
Энтальпия, кДж/кг	4129,1	4097,7
Внутренняя энергия, кДж/кг	2919,5	2888,0
Энтропия, кДж/кг·°К	70,251	64,437
Скорость звука, м/с	1294	1294
Вязкость, мПа·с	8,81	8,81
Теплопроводность, мВт/м·°К	183,8	191,4
Тепло преобразования нормального водорода в параводород при 300 °К, кДж/кг	27,56	-
Коэффициент объемного расширения, °К ⁻¹	0,00333	0,00333
Свойства в критической точке (critical point CP)		
Температура, °К	33,19	32,976
Плотность, кг/м ³	30,12	31,43
Скрытая теплота парообразования, кДж/кг	0	0
Удельная теплоемкость при постоянном давлении (Cp), кДж/кг·°К	Очень большая	
Показатель адиабаты (Cp/Cv)	Большая	
Энтальпия, кДж/кг	577,4	38,5
Внутренняя энергия, кДж/кг	-	2,8
Энтропия, кДж/кг·°К	27,07	17,6
Скорость звука, м/с	-	350
Вязкость, мПа·с	(3,5)	3,5
Теплопроводность, мВт/м·°К	Аномально большая	
Свойства при нормальной точке кипения (NBP)		
Температура, °К	20,930	20,268
Давление (абсолютное), кПа	101,325	101,325
Плотность, кг/м ³	г	1,331
	ж	70,96
Скрытая теплота парообразования, кДж/кг	446,0	445,6
Удельная теплоемкость при постоянном давлении (Cp), кДж/кг·°К	г	12,20;
	ж	9,772
Показатель адиабаты (Cp/Cv)	г	1,683
	ж	1,698
Энтальпия, кДж/кг	г	717,98
	ж	272,0
Внутренняя энергия, кДж/кг	г	641,9
		113,6

Свойства		Нормальный водород	Параводород
	ж	270,7	-257,7
Энтропия, кДж/кг·°К	г	39,16	29,97
	ж	17,32	7,976
Скорость звука, м/с	г	357	355
	ж	1101	1093
Вязкость, мПа·с	г	1,1	1,1
	ж	13,2	13,2
Теплопроводность, мВт/м·°К	г	16,9	16,9
	ж	99,0	99,0
Коэффициент объемного расширения, °К ⁻¹	г	0,0642	0,0642
	ж	0,0164	0,0164
Тепло преобразования нормального водорода в параводород, кДж/кг		527,14	-
Свойства в тройной точке (triple point TP)			
Температура, °К		13,957	13,803
Давление (асолют.), кПа		7,205	7,042
Плотность, кг/м ³	г	0,1298	0,1256
	ж	77,21	77,021
	т	86,71	86,50
Удельная теплоемкость при постоянном давлении (C _p), кДж/кг·°К	г	10,53	10,52
	ж	6,563	6,513
	т	-	-
Показатель адиабаты (C _p /C _v)	г	1,695	1,693
	ж	1,388	1,382
	т	-	-
Скрытая теплота парообразования, кДж/кг		452,0	449,2
Скрытая теплота плавления, кДж/кг		58,09	58,29
Скрытая теплота сублимации, кДж/кг		-	507,39
Энтальпия, кДж/кг	г	669,67	140,3
	ж	217,6	-308,9
	т	159,5	-367,2
Внутренняя энергия, кДж/кг	г	612,52	84,23
	ж	215,8	-309,0
	т	157,7	-367,3
Энтропия, кДж/кг·°К	г	46,4	37,52 (Г); 4,961 (Ж);
	ж	14,2	-
	т	10,1	0,739 (Т)
Скорость звука, м/с	г	307	305
	ж	1282	1273
	т	-	-
Вязкость, мПа·с	г	0,74	0,74
	ж	26,0	26,0
	т	-	-
Теплопроводность, мВт/м·°К	г	12,4	12,4
	ж	73,0	73,0
	т	900	900
Коэффициент объемного расширения, °К ⁻¹	г	0,0752	0,0752
	ж	0,0102	0,0102

Свойства	Нормальный водород	Параводород
	т	0,00494
Другие свойства		
Молекулярная масса	2,01594	2,01594
Эквивалент объем газа при NTP/ объем жидкости при NBP	847,1	845,1
Эквивалент объем газа при CP/ объем жидкости при NBP	2,357	2,252
Эквивалент объем газа при NBP/ объем жидкости при NBP	53,30	52,91
Эквивалент объем газа при TP/ объем жидкости при NBP	546,3	563,8
Эквивалент объем жидкости при TP/ объем жидкости при NBP	0,9190	0,9190
Эквивалент объем твердого вещества при TP/ объем жидкости при NBP	0,8184	0,8181
Давление, необходимое для поддержания плотности жидкости при NBP GH_2 (фиксированный объем, при отсутствии вентилирования), МПа		172 ^b
Максимальная температура инверсии Джоуля – Томсона, °K		200
Коэффициент диффузии в воздухе при NTP, $\text{см}^2/\text{с}$		0,61
Скорость диффузии в воздухе при NTP, $\text{см}/\text{с}$		$\leq 2,0$
Скорость плавучести в воздухе при NTP, $\text{м}/\text{с}$		от 1,2 до 9
Скорость парообразования (в стабильном состоянии) из жидкости без горения, $\text{мм}/\text{с}$		от 0,42 до 0,83

Источник: обзор научно-технической литературы

Сжижение водорода происходит при температуре -253°C . Получается бесцветная жидкость – самая легкая из всех известных (жидкий водород в 14 раз легче воды). Низкая температура жидкого водорода обуславливает затвердевание в его среде почти всех газов, кроме гелия. При -259°C жидкий водород замерзает, превращаясь в бесцветные кристаллы.

Водород имеет двойственную химическую природу, проявляя как окислительную, так и восстановительную способность. В большинстве реакций он выступает в качестве восстановителя, образуя соединения, в которых его степень окисления равна +1. Но в реакциях с активными металлами он выступает в качестве окислителя: его степень окисления в соединениях с металлами равна -1.

При обычных условиях молекулярный водород сравнительно мало активен, без нагревания реагирует лишь с фтором, а на свету и с хлором. Однако при нагревании он вступает в реакции со многими элементами. Атомарный водород обладает повышенной химической активностью по сравнению с молекулярным.

С кислородом реагирует практически необратимо, образуя воду с выделением 285,75 МДж/моль тепла. При обычных температурах реакция протекает крайне медленно, выше 550°C – со взрывом.

Водород используется для восстановления многих металлов, так как отнимает кислород у их оксидов. С галогенами водород образует галогеноводороды, при этом, взаимодействуя со фтором, водород взрывается (даже в темноте и при -252°C), с хлором и бромом реагирует лишь при освещении или нагревании, а с йодом - только при нагревании.

Практическое значение имеют реакции водорода с СО, при которых в зависимости от условий и катализатора образуется метанол и другие органические соединения. При повышенных температурах и давлениях, в присутствии катализатора водород взаимодействует с азотом с образованием аммиака. При нагревании водород энергично реагирует с серой, в результате получается сероводород, значительно труднее – с селеном и теллуrom.

Водород реагирует с некоторыми металлами (щелочными, щёлочноземельными и др.), образуя гидриды. Металлогидриды применяются для хранения водорода. В этом отношении металлогидридные системы являются наиболее привлекательными с точки зрения безопасности и компактности.

Водород нетоксичен, но пожаро- и взрывоопасен. Температура взрывного самовоспламенения в воздухе 577°C; КПВ в воздухе 4-75%, в O₂ – 4,65-96% по объему. Жидкий водород при попадании на открытые участки тела может вызвать сильное обморожение.

На сегодняшний день водород входит в тройку наиболее востребованных промышленностью газов, уступая лишь кислороду и азоту.

I. Способы производства водорода

Водород относится к числу важнейших видов сырья современной химической и нефтехимической промышленности. Его получают различными способами, которые можно сгруппировать следующим образом:

- физические;
- электрохимические;
- химические;
- термохимические или биохимические.

К физическим методам относятся те процессы, в которых исходное сырье (газовая смесь) уже содержит свободный водород и требуется тем или иным физическим путем освободить его от остальных компонентов. В частности, из *нефтезаводских газов*, представляющих собой смесь углеводородов с водородом, H_2 извлекается с помощью физических методов: глубокого охлаждения; абсорбции; адсорбции; диффузии через мембраны с избирательной проницаемостью для водорода. Указанные методы можно использовать не только для выделения водорода из нефтезаводских газов, но и для выделения его в различных процессах производства водорода.

Перспективным источником водорода являются *выбросные или продувочные газы ряда отраслей промышленности*, таких как, производство ацетилена, синтез аммиака и метанола, процессы риформинга и крекинга, содержащие достаточно большое количество водорода (таблица 2).

Таблица 2: Содержание водорода в основных промышленных источниках сбросных водородосодержащих газов, %

Наименование ВСГ	H_2	CO	CH_4	Др. угле- водороды	CO_2	N_2	P, МПа
Аммиачное производство	64	-	13,5	-	-	17	13
Каталитический риформинг	80	-	10	9	-	-	2,5
Гидроочистка	85	-	14	0,5	-	-	4,5
Гидрокрекинг	71	2,5	6,0	7,5	4,6	7,5	2,3
Коксование	55	5	30	-	5	5	0,3
Пиролиз твердых бытовых отходов	25	35	-	-	27	3	0,1-0,2
Окисление метанола (получение формальдегида)	18	1,5	1,5	-	5	73	1
Сжигание угля каменного (бурого)	12 (15)	28 (29)	2 (2)	-	5 (3)	54 (54)	0,1
Газ канализационных коллекторов	51	18	19	2	4	6	0,1

ВСГ – водородсодержащие газы, P – давление

Источник: данные НТК «Промтегра»

Во многих производствах H_2 используется не полностью, некоторая его часть выводится из процессов или теряется, в лучших случаях используется как низкокалорийное топливо. Концентрирование его из выбросных водород-

содержащих газовых смесей различных промышленных производств до технологически необходимого уровня даёт возможность возвращать H_2 обратно в производство, тем самым, увеличивая его мощность и экономическую эффективность. С другой стороны, даже при условии утилизации ВСГ путем сжигания, повышение объемного содержания водорода способствует возрастанию энергетического потенциала выбросных газов.

Традиционными и широко распространенными в промышленности методами концентрирования водорода из смесей газов можно назвать криогенный и адсорбционный методы.

Криогенное разделение позволяет получать водород высокой чистоты, однако, на сегодняшний день применительно к процессу выделения водорода криогенная технология является несколько устаревшей. Криогенные воздухоразделительные установки (ВРУ) имеют высокую стоимость оборудования, сложность аппаратного оформления и необходимость поддержки специфических условий процесса (используются температуры близкие к 0 К), длительный пусковой период, большие габариты.

Технология короткоциклового адсорбции (КЦА) широко применяется на нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах. Область использования адсорбционных водородных установок в нефтепереработке весьма широка. Из отдувочных газов гидрокрекинга и гидроочистки выделяется водород с чистотой 99-99,99%, который может быть возвращен обратно в процесс, или быть использован в других процессах переработки и нефтехимии, в частности, изомеризации, каталитическом гидрировании и т.д.

Принцип работы адсорбционного блока заключается в поглощении адсорбентом сопутствующих веществ и выработке потока чистого водорода.

Современные адсорбционные установки позволяют достичь достаточно высокой концентрации водорода (до 99,9999%), но обладают такими недостатками, как низкая мобильность, сложное аппаратное оформление, сложность обслуживания, необходимость регенерации адсорбента.

В последние 20 лет в промышленности все большее применение находят мембранные способы разделения газовых смесей, отличающиеся простотой и надежностью (отсутствие движущихся частей, относительно простое аппаратное оформление), экономичностью (длительный срок службы мембран – 10-15 лет, основные затраты энергии связаны только с компримированием разделяемого воздуха), легкостью варьирования масштаба производства (модульность конструкции современных мембранных аппаратов), высокой мобильностью (возможность создания передвижных установок). Удельные капиталовложения при создании мембранных газоразделительных установок (ГРУ) сравнительно невелики, а срок окупаемости их незначителен. С помощью мембранного разделения возможно концентрирование водорода до чистоты 99,9%, а также эффективная работа даже в условиях изменения производительности установки.

В электрохимических методах выделение H_2 из его химических соединений осуществляется разложением последних под действием электрического тока. Довольно широко используется в промышленности метод получения водорода (и одновременно кислорода) *электролизом воды*. Электролитом служит водный раствор КОН (350-450 г/л), давление в электролизерах – от атмосферного до 4МПа. Однако производительность электролизных установок невелика (4-500 м³/ч), и суммарный объем производства водорода данным способом не превышает 5%.

Значительные количества водорода образуются в качестве побочного продукта при получении хлора (Cl_2) и каустической соды (NaOH) *электролизом водного раствора хлористого натрия (NaCl)*.

Химические методы являются наиболее распространенными способами получения водорода. Большое промышленное применение находят такие методы, как неполное окисление горючих ископаемых (газификация, конверсия) и термическое разложение горючих ископаемых. Значительная часть промышленных процессов получения водорода относится к первой группе. Они основаны на использовании технологических газов, содержащих смесь H_2 , CO, CO_2 , из которых в последующих стадиях выделяется водород.

В *процессах газификации и конверсии* используют газообразные углеводороды (природный, попутный нефтяной газы, газы нефтепереработки и нефтехимических производств и др.), жидкие углеводороды (мазут, высоковязкие и высокосернистые прямогонные бензины, а также любые фракции нефтепродуктов), твердые горючие ископаемые.

Одним из хорошо разработанных методов получения водорода на НПЗ является *паро-кислородная газификация нефтяных остатков*. Водород в процессах частичного дегидрирования (каталитический риформинг бензина, каталитическое дегидрирование бутана с получением бутилена и дегидрирование бутилена с получением бутадиена, пиролиз этана), является хотя и ценным, но побочным продуктом. Особенно значительны ресурсы водорода, полученного на НПЗ в процессе *каталитического риформинга бензина*.

Наибольший объем (до 70% мирового выпуска) производится методом *паровой конверсии природного газа/метана*. При этом водяной пар при температуре 700-1000°C смешивается с метаном под давлением в присутствии катализатора с получением смеси CO и H_2 .

Водород из биомассы получается **термохимическим** или **биохимическим способом**. При *термохимическом методе* биомассу нагревают без доступа кислорода до температуры 500-800°C (для отходов древесины), что намного ниже температуры процесса газификации угля. В результате процесса выделяется H_2 , CO и CH_4 .

В *биохимическом процессе фиксации азота* водород вырабатывают различные бактерии, например, *Rhodobacter sphaeroides*. Биохимические методы

наиболее затратны (5-7 \$ за килограмм водорода по сравнению с 1-2 \$/кг водорода, полученного методом паровой конверсии природного газа).

Таким образом, по степени сложности процессов и оборудования самым сложным является способ паровой конверсии природного газа. Однако водород, произведенный из природного газа, обходится в несколько раз дешевле электролизного водорода. Поэтому основным способом получения водорода в мире в настоящее время является метод каталитической конверсии природного газа с водяным паром. При этом сжигается около половины исходного газа, а продукты его сгорания выбрасываются в атмосферу.

В зависимости от способа получения и объемов выбросов CO₂ существует цветовая градация водорода (таблица 3).

Таблица 3: Типы водорода в зависимости от способа получения и используемого сырья

Тип водорода	Сырье, способ производства	Степень «углеродности»
«Бурый»/«коричневый»	Образуется в процессе газификации угля в результате чего получают синтез-газ (смесь углекислого газа CO ₂ , монооксида углерода CO, водорода, метана и этилена).	высокоуглеродный
«Серый»	Образуется при переработке углеводородного сырья (паровая конверсия метана) без улавливания CO ₂ из отходящих газов. На 1 т получаемого H₂ образуется ≈10 т CO₂.	высокоуглеродный
«Голубой»	Образуется при переработке углеводородного сырья (паровая конверсия метана) с обязательным улавливанием CO ₂ из отходящих газов (технология CCS – carbon capture and storage) с последующим его захоронением или использованием, что снижает выбросы примерно вдвое.	среднеуглеродный
«Бирюзовый»	Получают пиролизом природного газа (метана) при химическом связывании выделяемого CO ₂ (например, посредством выработки углерода).	малоуглеродный
«Желтый»/«оранжевый»/ «розовый»	Образуется электролизом воды при использовании энергии, вырабатываемой АЭС.	безуглеродный
«Зеленый»	Образуется электролизом воды при использовании возобновляемых источников энергии (солнце, ветер) – ВИЭ.	безуглеродный
«Белый»	Природный, вырабатываемый естественным образом и присутствующий в земной коре	безуглеродный

Источник: «Инфомайн» на основе обзора специализированной литературы

Водород, выпускаемый методом парового риформинга (конверсии) метана (steam methane reforming – метод SMR), назван **«серым»**. Он противопоставляется **«зеленому»** водороду, который производится из воды

методом электролиза с помощью энергии из возобновляемых источников. Рынок «зеленого» водорода пока крайне мал из-за его дороговизны.

«Желтый» (оранжевый, розовый) водород также получают путем электролиза воды, но его питают атомные электростанции.

Также существует **«голубой»** водород – производимый методом паровой конверсии метана или угля, но с обязательным улавливанием и хранением CO₂. «Голубой» водород существенно дороже «серого» из-за дорогих очистителей, однако выбросы CO₂ при его получении сокращаются более, чем в 2 раза.

Наибольший интерес вызывают сегменты производства «голубого» и «зеленого» водородов. Предполагается, что в ближайшем будущем существенно возрастет производство «голубого» водорода, который сейчас гораздо дешевле «зеленого». Так, в конце 2020 г. американское информационное агентство S&P Global Platts оценило приведенные затраты на производство «серого» водорода (включая CAPEX и плату за выбросы CO₂) в 1,24 € за 1 кг, «голубого» – в 1,31 € за 1 кг, а «зеленого» (электролиз PEM, включая CAPEX) – в 3,43 € за 1 кг. По прогнозу Aurora Energy Research, затраты на «голубой» и «зеленый» водород сблизятся только к 2045 г. Тогда «зеленый» водород станет постепенно вытеснять «голубой» водород с рынка.

Водород, получаемый при переработке угля – **«бурый»** («коричневый») – считается самым «грязным» с точки зрения выбросов.

Самым «чистым» считается **«белый»** водород. Газообразный водород естественным образом образуется в земной коре в результате реакций вода-горная порода. Этот процесс включает взаимодействие между молекулами воды и богатыми железом минералами, такими как оливин, при высоких температурах и давлениях.

При реакции воды с этими минералами выделяется газообразный водород, который проникает через земную кору и может накапливаться в подземных ловушках, откуда его можно добывать, однако это тоже может косвенно способствовать выбросам.