

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



ИНФОМАЙН 

исследовательская группа

www.infomine.ru

Обзор рынка водорода и оборудования для его производства в России

3 издание

Москва
апрель, 2018

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: 138 стр.

Стоимость отчета – 60 000 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. 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 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. Информация, представленная в настоящем отчете, получена из открытых источников либо предоставлена упомянутыми в отчете компаниями. Дополнительная информация предоставляется по запросу. Этот документ или любая его часть не может распространяться без письменного разрешения Инфомайн либо тиражироваться любыми способами.

Copyright © ООО «ИГ «Инфомайн».

СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация	8
Введение.....	10
I. Технология производства водорода.....	16
I.1. Способы производства водорода.....	16
I.2. Оборудование для производства и компримирования водорода.....	20
I.2.1. Поставщики оборудования для производства электролитического водорода	23
АО "Уралхиммаш" (г. Екатеринбург)	23
ООО "Институт физико-технологических исследований" (ИФТИ), (г. Балашиха, Московская обл.)	26
Прочие производители	30
I.2.2. Разработчики оборудования для производства водорода методом конверсии природного газа	32
ООО "ФАСТ Инжиниринг" (г. Москва)	32
АО "НПП "Машипром" (г. Екатеринбург)	34
I.2.3. Поставщики оборудования для извлечения водорода из технологических потоков.....	36
ООО НПК "Грасис" (г. Москва).....	36
Прочие предприятия	39
I.2.4. Зарубежные производители и поставщики оборудования	40
Hydrogenics (Канада)	41
Air Liquide (Франция)	41
Прочие компании	43
I.2.5. Поставщики оборудования для компримирования водорода.....	45
АО "Уральский компрессорный завод" (г. Екатеринбург).....	45
ОАО "Борец" (г. Москва)	46
Прочие предприятия	47
I.3. Нормативная база на компримирование водорода.....	48
II. Производство водорода в России	53
II.1. Требования к качеству водорода различных марок.....	53
II.1.1. Водород технический газообразный.....	53
II.1.2. Водород газообразный чистый	54
II.1.3. Водород особо чистый; водород технический повышенной чистоты	55
II.2. Динамика производства водорода в России в 2004-2017 гг.	56
II.3. Структура производства водорода.....	58
II.4. Основные производители товарного водорода на российском рынке	60
II.5. Основные поставщики водорода на российский рынок	74

III. Структура цен на водород	81
III.1. Стоимость производства	81
III.2. Цены поставщиков водорода.....	84
III.3. Стоимость транспортировки	85
IV. Потребление водорода в России.....	88
IV.1. Объемы и структура потребления водорода в 2004-2017 гг.....	88
IV.2. Основные потребители водорода на российском рынке.....	90
IV.2.1. Потребители водорода в химической промышленности	91
IV.2.2. Потребители водорода в нефтепереработке	100
IV.2.3. Потребители водорода в металлургии	104
IV.2.4. Потребители водорода в электронной и электротехнической промышленности.....	112
IV.2.5. Потребители водорода в электроэнергетике	114
IV.2.6. Потребители водорода в стекольной промышленности	115
IV.2.7. Потребители водорода в пищевой промышленности	119
IV.2.8. Прочие потребители водорода.....	120
V. Транспортировка водорода в пределах России.....	123
V.1. Способы транспортировки водорода	123
V.2. География и объемы перевозок.....	126
VI. Хранение водорода	128
VII. Прогноз производства и потребления водорода до 2030 г.	132
Приложение 1. Адресная книга крупнейших российских предприятий-производителей водорода.....	134
Приложение 2. Адресная книга крупнейших российских предприятий-поставщиков водорода.....	135
Приложение 3. Установки риформинга на нефтеперерабатывающих предприятиях России	136
Приложение 4. Установки гидрокрекинга на нефтеперерабатывающих предприятиях России	138

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: Сравнительные характеристики электролизеров для производства водорода
- Таблица 4: Технические характеристики промышленных электролизеров СЭУ АО "Уралхиммаш"
- Таблица 5: Технические характеристики промышленных электролизеров БЭУ и ФВ АО "Уралхиммаш"
- Таблица 6: Основные технические характеристики электролизной установки ФС-10.25 производства "ИФТИ"
- Таблица 7: Предприятия-получатели, установок ФС-525 и ФС-525М производства ООО "ИФТИ"
- Таблица 8: Краткие технические характеристики генератора водорода "ЭЛДИС-130"
- Таблица 9: Технические характеристики установки конверсии природного газа УВР-250 (НПП "Машпром")
- Таблица 10: Технические характеристики мембранных водородных установок ООО "Грасис"
- Таблица 11: Технические характеристики адсорбционных водородных установок ООО "Грасис"
- Таблица 12: Крупнейшие иностранные поставщики промышленных электролизеров на российский рынок в 2007-2017 гг., штук
- Таблица 13: Технические характеристики атмосферного электролизера производства компании Norsk Hydro Electrolysers
- Таблица 14: Технические характеристики поршневых компрессоров типа 6ГШ
- Таблица 15: Технические характеристики поршневого компрессора 2ГМ4-9,6/161
- Таблица 16: Технические характеристики поршневых компрессоров фирмы CompAir
- Таблица 17: Норма для водорода технического газообразного (согласно ГОСТ 3022-80)
- Таблица 18: Норма для водорода чистого газообразного (согласно ГОСТ Р 51673-2000)
- Таблица 19: Показатели качества водорода особо чистого (ОСЧ) по ТУ 2118-06-18136415-05
- Таблица 20: Показатели качества водорода технического повышенной чистоты (ТПЧ) по ТУ 2118-05-18136415-05
- Таблица 21: Показатели экономического роста в Российской Федерации в сравнении с предыдущим годом в 2004-2017 гг., %
- Таблица 22: Производство водорода по отраслям в 2012-2017 гг., тыс. т

- Таблица 23: Крупнейшие российские производители товарного водорода
- Таблица 24: Некоторые показатели деятельности АО "СКТБЭ" в 2009-2016 гг.
- Таблица 25: Потребители водорода производства ПАО "Новосибирский завод химконцентратов" в 2002-2017 гг., кг
- Таблица 26: Крупнейшие российские поставщики водорода в баллонах
- Таблица 27: Физико-химические показатели водорода, выпускаемого ООО "НПК "Наука"
- Таблица 28: Преимущества и недостатки основных методов получения водорода
- Таблица 29: Стоимость 1 тонны товарного водорода при крупномасштабном производстве различными методами, \$
- Таблица 30: Цены на водород крупнейших поставщиков
- Таблица 31: Удельная стоимость трубопроводного транспортирования газообразного водорода при давлении 7МПа
- Таблица 32: Стоимость услуг торговых компаний по доставке водорода в баллонах автотранспортом, руб. (с учетом НДС)
- Таблица 33: Стоимость баллонов для хранения водорода
- Таблица 34: Производство аммиака и водорода в России в 2011-2017 гг., тыс. т
- Таблица 35: Производство метанола и водорода в России в 2011-2017 гг., тыс. т
- Таблица 36: Производство бутиловых спиртов и водорода в России в 2011-2017 гг., тыс. т
- Таблица 37: Производство электролитической каустической соды и водорода в России в 2011-2017 гг., тыс. т
- Таблица 38: Баланс водорода при неглубокой переработке нефти, тыс. т в год 100%-ного водорода
- Таблица 39: Изменение мощностей по переработке нефти в 2005-2015 гг. в России, млн т
- Таблица 40: НПЗ России, имеющие дополнительные установки по производству водорода
- Таблица 41: Условия проведения термической обработки холоднокатаного проката на металлургических предприятиях РФ
- Таблица 42: Объемы производства холоднокатаного проката и потребление водорода в России в 2004-2017 гг., тыс. т
- Таблица 43: Основные российские научно-исследовательские организации, участвующие в работах по водородной энергетике и топливным элементам
- Таблица 44: Технические характеристики железнодорожной и автомобильной цистерны для перевозки жидкого водорода
- Таблица 45: Объемы перевозок водорода в баллонах ж/д транспортом в 2002-2017 гг., шт.

СПИСОК РИСУНКОВ

Рисунок 1: Структура производства промышленных газов в России, (2016 г.) %

Рисунок 2: Электролизеры для получения водорода, производства АО "Уралхиммаш"

Рисунок 3: Установка УВР-250, разработанная АО НПП "Машпром"

Рисунок 4: Поршневой компрессор типа 6ГШ

Рисунок 5: Поршневой компрессор типа 2ГМ

Рисунок 6: Динамика производства водорода в России в 2004 -2017 гг., млн т

Рисунок 7: Изменение структуры производства водорода в РФ в 2004-2017 гг., %

Рисунок 8: Динамика производства водорода в ОАО "Редкинский опытный завод" в 2009-2017 гг., тыс. м³

Рисунок 9: Динамика производства водорода в АО "Конструкторское бюро химавтоматики" в 2011-2017 гг., тыс. м³

Рисунок 10: Блок-схема производства жидкого водорода АО "Ниихиммаш"

Рисунок 11: Баланс производства и потребления водорода в России

Рисунок 12: Структура потребления водорода в 2010 г. и 2017 г., %

Рисунок 13: Динамика потребления водорода российскими химическими предприятиями в 2004-2017 гг., тыс. т

Рисунок 14: Потребление водорода в нефтепереработке

Рисунок 15: Потребление водорода в металлургии

Рисунок 16: Производство металлизированного сырья (млн т) и потребление водорода в России (тыс. т) в 2004-2017 гг.

Рисунок 17: Основные российские производители листового стекла

Рисунок 18: Производство листового float-стекла в РФ в 2004-2017 гг. (в натуральном исчислении, млн м²) и потребление водорода, т

Рисунок 19: Автореципиент для перевозки водорода в сжатом состоянии

Рисунок 20: Прогноз производства водорода в России на период до 2030 г., млн т

Аннотация

Настоящий отчет является третьим изданием исследования российского рынка водорода и оборудования для его производства в 2004-2017 гг.

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

Объект исследования – водород.

Данная работа является кабинетным исследованием. В качестве источников информации использованы данные Росстата, таможенной статистики РФ, ж/д перевозок РФ, внешнеторговых операций ООН UNdate, базы данных ООО «Инфолайн», а также материалы отраслевой и региональной прессы, годовых и квартальных отчетов эмитентов ценных бумаг, интернет-сайтов производителей и потребителей водорода.

Хронологические рамки исследования: 2004-2017 гг.; прогноз – 2018-2030 гг.

География исследования: Российская Федерация – комплексный подробный анализ рынка.

Отчет состоит из 7 частей, содержит 138 страниц, в том числе 20 рисунков, 45 таблиц и 4 приложения.

Первая глава отчета посвящена технологии производства водорода. В ней рассмотрены способы производства водорода, оборудование для его производства, разработчики и поставщики оборудования (российские и зарубежные).

Во второй главе отражено производство водорода в России в 2004-2017 гг. В данном разделе приведены качественные показатели получаемой продукции. Дана характеристика тех немногочисленных предприятий, которые вырабатывают товарный водород с целью поставок его на внутренний рынок, а так же изучены специализированные газовые компании, занимающиеся продажей водорода.

В третьей главе рассмотрена структура цен на водород: стоимость производства, транспортировки, хранения. Даны цены поставщиков водорода в 2017-2018 гг.

Четвертая глава посвящена потреблению водорода в России. В ней рассмотрены объемы и структура потребления водорода в 2004-2017 гг. В данной главе представлены сводные таблицы по объемам потребления водорода по отраслям и предприятиям, а также дано описание водородных проектов, реализуемых в настоящее время в российских компаниях.

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.

Пятая и шестая главы посвящены вопросам транспортировки и хранению водорода.

В седьмой главе приводится прогноз производства и потребления водорода в России до 2030 года.

В приложениях приведены данные об установках гидроочистки и гидрокрекинга на НПЗ России, а также 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, $^{\circ}\text{K}$	293,15	293,15
Давление (абсолютн.), кПа	101,325	101,325
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	0,08376	0,08376
Удельная теплоемкость при постоянном давлении (C_p), $\text{кДж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{K}$	14,33	14,89
Показатель адиабаты (C_p/C_v)	1,416	1,383
Энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$	4129,1	4097,7
Внутренняя энергия, $\text{кДж}/\text{кг}$	2919,5	2888,0
Энтропия, $\text{кДж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{K}$	70,251	64,437
Скорость звука, м/с	1294	1294
Вязкость, $\text{мПа}\cdot\text{с}$	8,81	8,81
Теплопроводность, $\text{мВт}/\text{м}\cdot^{\circ}\text{K}$	183,8	191,4
Тепло преобразования нормального водорода в параводород при 300°K , $\text{кДж}/\text{кг}$	27,56	-
Коэффициент объемного расширения, $^{\circ}\text{K}^{-1}$	0,00333	0,00333
Свойства в критической точке (critical point CP)		
Температура, $^{\circ}\text{K}$	33,19	32,976
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	30,12	31,43
Скрытая теплота парообразования, $\text{кДж}/\text{кг}$	0	0
Удельная теплоемкость при постоянном давлении (C_p), $\text{кДж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{K}$	Очень большая	
Показатель адиабаты (C_p/C_v)	Большая	
Энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$	577,4	38,5
Внутренняя энергия, $\text{кДж}/\text{кг}$	-	2,8
Энтропия, $\text{кДж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{K}$	27,07	17,6
Скорость звука, м/с	-	350
Вязкость, $\text{мПа}\cdot\text{с}$	(3,5)	3,5
Теплопроводность, $\text{мВт}/\text{м}\cdot^{\circ}\text{K}$	Аномально большая	
Свойства при нормальной точке кипения (NBP)		
Температура, $^{\circ}\text{K}$	20,930	20,268
Давление (абсолютное), кПа	101,325	101,325
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	г	1,331
	ж	70,96
Скрытая теплота парообразования, $\text{кДж}/\text{кг}$	446,0	445,6
Удельная теплоемкость при постоянном давлении (C_p), $\text{кДж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{K}$	г	12,20;
	ж	9,772
Показатель адиабаты (C_p/C_v)	г	1,683
	ж	1,698
Энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$	г	717,98
	ж	272,0
Внутренняя энергия, $\text{кДж}/\text{кг}$	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 (Cp), кДж/кг·°К	г	10,53	10,52
	ж	6,563	6,513
	т	-	-
Показатель адиабаты (Cp/Cv)	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, °К		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.

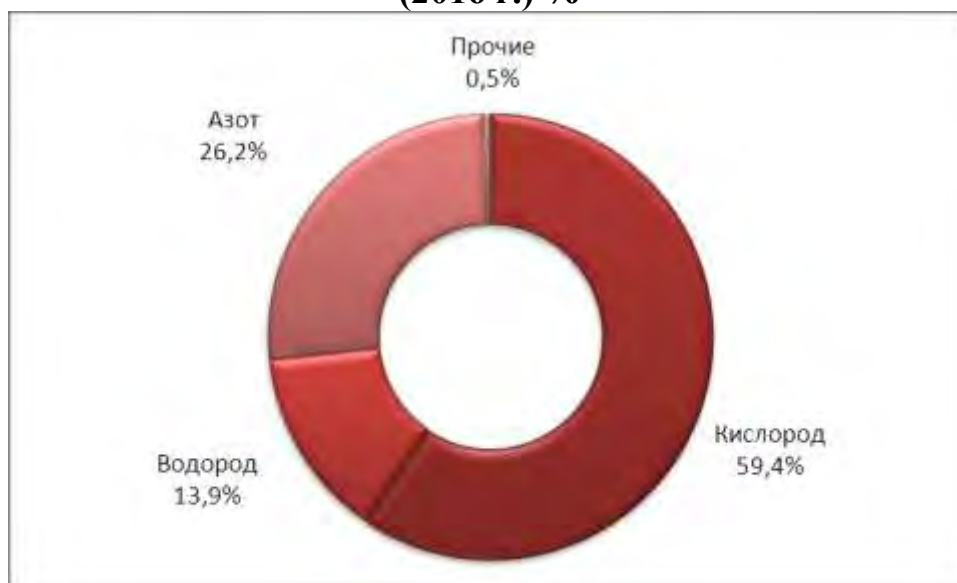
Практическое значение имеют реакции водорода с СО, при которых в зависимости от условий и катализатора образуется метанол и другие органические соединения. При повышенных температурах и давлениях, в присутствии катализатора водород взаимодействует с азотом с образованием аммиака. При нагревании водород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

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 (рисунок 1).

Рисунок 1: Структура производства промышленных газов в России, (2016 г.) %



Источник: Creon Energy

В отличие от других промышленных газов водород в России практически не является товарным продуктом: чаще всего он вырабатывается и используется на одном и том же предприятии.

Объем мирового производства водорода оценивается в XX млн т. Доля России составляет примерно XX %.

Компании – основные игроки на мировом водородном рынке:

Производители водорода:

Praxair (США)
Air Liquide (Франция)
BOC Group (Великобритания)
Iwatani International (производит 40% водорода в Японии)
Linde (Германия)

Емкости для хранения водорода:

ECD Ovonic (США)
HERA Hydrogen Storage Systems (Канада)
Dynetek (Канада)
Millennium Cell (США)

Оборудование для производства водорода:

ChevronTexaco (США)
H2Gen (США)
Hydro (Норвегия)
Hydrogenics (Канада)
HyRadix (США)

I. Технология производства водорода

I.1. 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.

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, водород 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	Другие углеводороды	CO ₂	N ₂	Давление, 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

Источник: данные НТК "Промтегра"

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

водородосодержащих газовых смесей (ВСГ) различных промышленных производств до технологически необходимого уровня даёт возможность возвращать водород обратно в производство, тем самым, увеличивая мощность и экономическую эффективность производства. 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 момент 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 15-20 лет в промышленности все большее применение находят *мембранные* способы разделения газообразных 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 России мембранная технология для выделения водорода из выбросных газов уже используется. Однако, все без исключения компании, производящие водородные мембранные установки, используют в своем оборудовании покупные импортные мембранные модули и позиционируются, таким образом, только как инжиниринговые компании. Стоит отметить, что больше половины стоимости мембранной установки составляет стоимость мембранного генератора, состоящего из импортных мембранных модулей. В мире всего несколько фирм-производителей мембранных аппаратов, применимых для указанной задачи, и, пользуясь практически монопольным положением, эти компании диктуют цены на свою продукцию. В России ведутся попытки освоения технологии производства полволоконных мембран и мембранных модулей на их основе.

В электрохимических методах выделение водорода 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 10%.

Значительные количества водорода образуются в качестве побочного продукта при получении хлора (Cl₂) и каустической соды (NaOH) электролизом водного раствора хлористого натрия (NaCl).

Химические методы являются наиболее распространенными способами получения водорода в целом и, в особенности, для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Большое промышленное применение находят следующие методы: *неполное окисление горючих ископаемых (газификация, конверсия) и термическое разложение горючих ископаемых.*

Значительная часть промышленных процессов получения водорода относится к первой группе. Они основаны на получении технологических газов, содержащих смесь H₂, CO, CO₂, из которых в последующих стадиях выделяется водород.

В процессах газификации и конверсии используются 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 нефтеперерабатывающих предприятиях является паро-кислородная газификация нефтяных остатков. Водород в процессах частичного дегидрирования (каталитический риформинг бензина, каталитическое дегидрирование бутана с получением бутилена и дегидрирование бутана с получением бутадиена, пиролиз этана), является хотя и ценным, но побочным

продуктом. Особенно значительны ресурсы водорода, полученного на НПЗ в процессе каталитического риформинга бензина.

Процесс термического разложения углей широко используется в коксохимической промышленности, где водород является побочным продуктом. Из коксового газа металлургических и коксохимических предприятий водород получают методом глубокого охлаждения.

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 России в настоящее время является метод каталитической конверсии природного газа с водяным паром.

В 80-х годах прошлого века общий объем производства водорода в СССР составлял около 3 млн т. в год. Из них доля электролитического водорода составляла порядка 300 тыс. т, то есть около 10%. Подобная структура производства водорода сохранилась и сегодня. Предприятия нефтехимической и химической промышленности используют, в основном, конверсионный водород (особенно если имеется прямой доступ к природному газу). Предприятия полупроводниковой, стекольной, пищевой промышленности, металлургия и энергетика используют электролитический водород, учитывая простоту и надежность водных электролизеров, высокую чистоту генерируемых водорода и кислорода, возможность получения указанных газов под высоким давлением непосредственно на штуцере электролизера, высокую степень автоматизации процесса и высокий ресурс установок.

1.2. Оборудование для производства и компримирования водорода

Установки для получения водорода конверсионным методом из природного газа имеют ограниченное применение (по количеству используемых установок, а не по объему производства водорода). Кроме того, в большинстве случаев эти агрегаты входят состав комплексов по производству конечного продукта (аммиака и метанола). Следует отметить, что такие установки могут применяться только в крупнотоннажных производствах, т.к. они имеют ограничения по минимальной производительности. В связи с этим, для производства водорода на местах чаще всего используются **электролизеры**. В РФ количество предприятий, на которых в настоящее время используются электролизные установки, составляет около 900.

В таблице 3 приведены сравнительные технико-экономические характеристики промышленных электролизеров российского и зарубежного производства.

Таблица 3: Сравнительные характеристики электролизеров для производства водорода

Изготовитель	Производительность по водороду м ³ /ч	Масса кг	Удельная металлоемкость кг/м ³ /ч	Энергозапраты кВт·ч/нм ³ Н ₂	Потребляемая мощность кВт	Электролит	
Hydrogenics Europe N.V., Бельгия	10	5080	508	4,2	42	30% КОН	
Electroliser corporation, Канада	1,8-9,9	755-2328	419-225	4,4-4,6	9,2-46	25% КОН	
Teledin Energy Systems, США	1,26-12,72	450-900	357-71	7-6	8,4-72	25% КОН	
	15,9-47,7	4082	85	5	79,5-238,5	25% КОН	
PIEL Division of ILT Tecnologie, Италия	12	1510	125	5	60	25% КОН	
Norsk Hydro, Норвегия	360	н/д	н/д	4,6	1700	25% КОН	
"Уралхим-маш", РФ	ФВ-500М	536	101360	н/д	5,3	2800	25% КОН
	БЭУ 250	250	134590	538	4,94	н/д	25% КОН
	СЭУ 40	40	10240	258	5,24	н/д	25% КОН
"ИФТИ", РФ	ФС-10.25	10	2500	250	4,8	70	25% КОН

Источник: "Справочное пособие" Московский энергетический институт

Электролизеры предназначены для получения водорода и кислорода методом электролитического разложения воды. Водород, получаемый методом электролиза, используется в основном для следующих целей:

- охлаждение генераторов тепловых и атомных электростанций;