



О водороде без иллюзий

**Бессель Валерий
Владимирович**

- **исполнительный вице-президент
ГК «НьюТек Сервисез»;**
- **профессор кафедры
«Термодинамики и тепловых
двигателей» РГУ нефти и газа
имени И.М. Губкина.**

Доклад на секции Нефти и Газа РАЕН, Москва, 18.05.2021 г.

Локальные проблемы

- Энергообеспечение удаленных и автономных объектов НГК в регионах страны, где либо нет энергетической инфраструктуры, либо она там недостаточно развита.
- Повышение энергетической эффективности объектов НГК за счет максимального сбережения товарных углеводородов, используемых на технологические цели.

Глобальные проблемы

- НГК России является важнейшей частью ТЭК страны, поэтому развитие проектов альтернативных источников энергии позволит компенсировать в системе энергообеспечения страны ожидаемое снижение добычи углеводородов в долгосрочной перспективе.

**+ декарбонизация глобальной
мировой энергетики**

Структура потребления энергии в 2019 году

2019 год	Единица измерения	Нефть	Газ	Уголь	Атомная энергия	Органическое топливо	Тепловая энергетика
Потребление энергии	Эксаджоуль	193,0	141,5	157,9	24,9	492,3	517,3
	Млн т н.э.	4610,5	3378,5	3770,4	595,3	11759,4 (84,3%)	12354,7 (88,6%)
Генерация электроэнергии	ТВт*час	825,3	6297,9	9824,1	2796,0	16947,3	19743,3
	Млн т н.э.	202,8	1547,2	2413,5	595,3	4163,5 (62,8%)	4758,7 (73,1%)
Доля топлива в генерации электроэнергии	%	4,40%	45,80%	64,01%	100,00%	35,41%	38,52%

- Проблема устойчивого глобального энергетического развития на долгосрочную перспективу при приемлемых для Человечества затратах финансовых и материальных ресурсов на модернизацию существующей энергетической инфраструктуры упирается в поисках новых видов **ТЕПЛОВОЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ:**

- Термоядерный синтез?

- **Водородная энергетика?**

Понятие «водородная энергетика»

Понятие **«водородная энергетика» (ВЭ)** в последние годы приобрело медийную популярность в связи с проблемой истощения источников органического топлива и растущими эколого-климатическими проблемами современной энергетики, причем зачастую **«водородная энергетика»** противопоставляется **«органической»** энергетике.

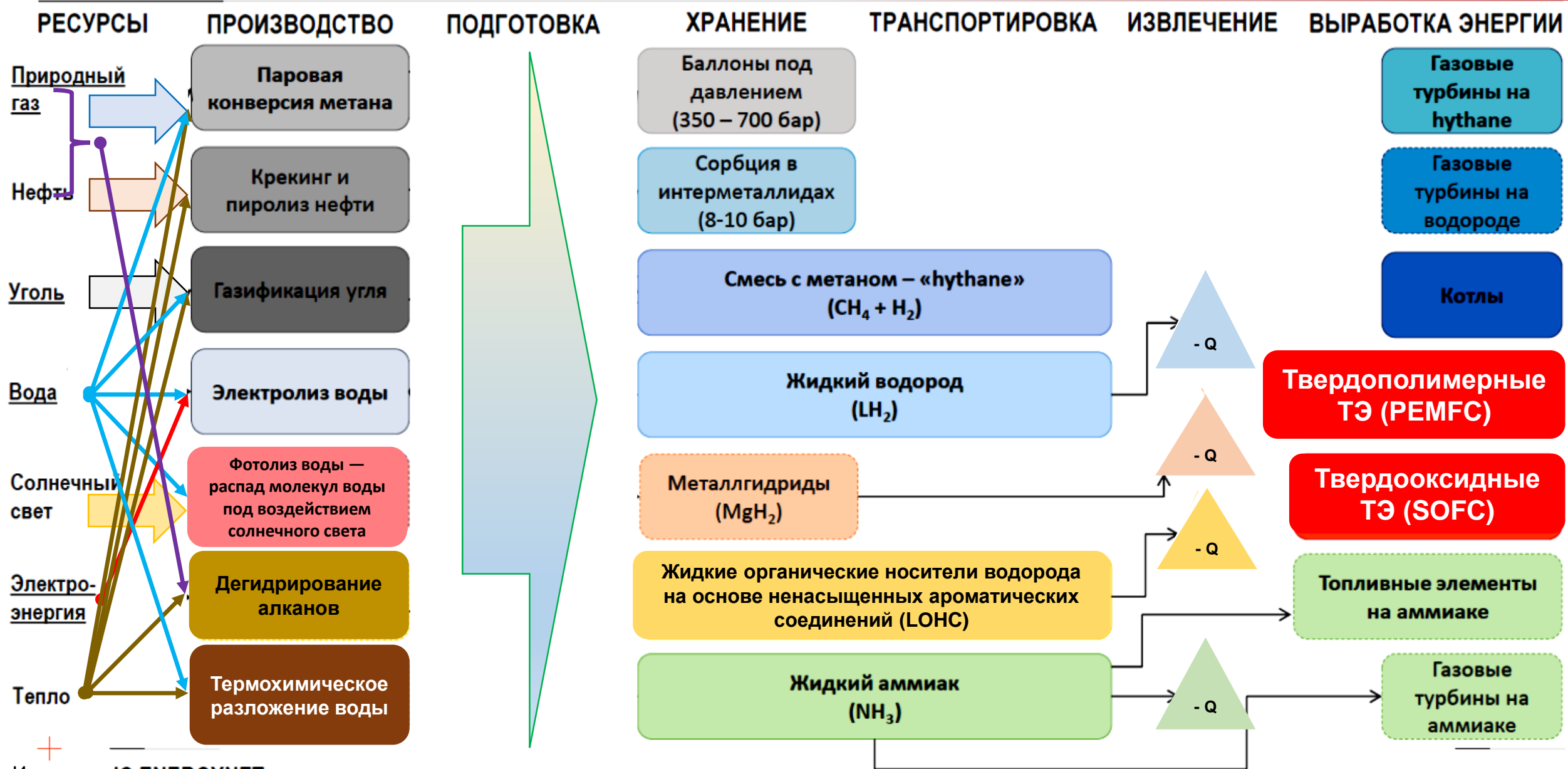
В существующих реалиях **«водородная энергетика»**, дополняющая традиционную энергетику, основанную на органическом топливе, атомной и возобновляемой энергетике – рассматривается как способ **оптимизации удовлетворения устойчиво растущих потребностей человечества в экологически чистой энергии.**

Концепция **«водородной энергетике»** включает в себя решение целого комплекса проблем:

- **Производство водорода с использованием невозобновляемых и возобновляемых источников энергии (органическое топливо, энергия АЭС, гидроэнергетика, энергия солнца, ветра, биомассы);**
- **Надежная хранение и транспортировка водорода;**
- **Использование водорода в энергетике, промышленности, на транспорте и в быту;**
- **Обеспечение надежности и безопасности водородных энергетических систем.**

В настоящей презентации рассмотрены некоторые технологические достижения, которые могут оказать существенное влияние на дальнейшее развитие водородной энергетики, а также программы развития водородных технологий глобальными энергетическими компаниями.

Технологические цепочки «водородной энергетики»

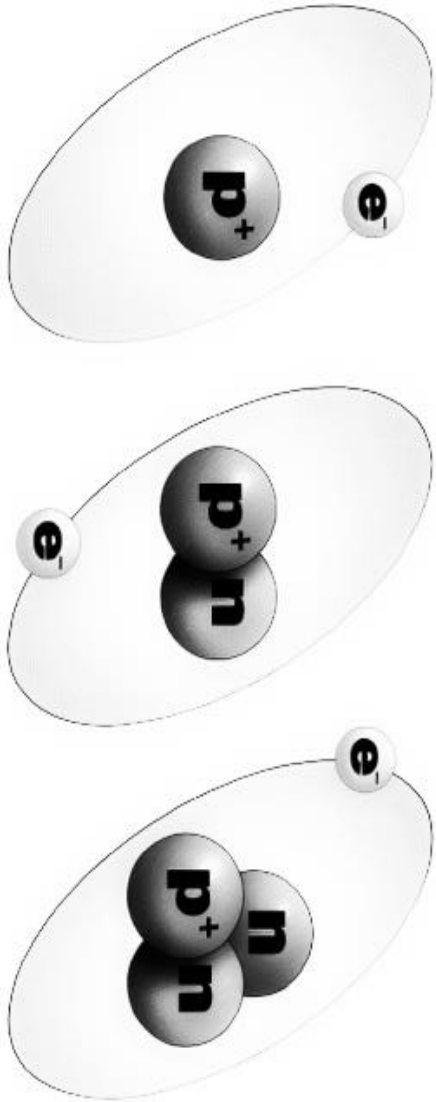


Содержание



- **Водород, физико-химические и энергетические свойства**
- Развитие водородной энергетики
- Получение водорода
- Хранение водорода
- Транспортировка водорода
- Применение водорода
- Экологическая и промышленная безопасность
- Проекты НГК в области водородной энергетики

Что такое водород?



Водород - самый лёгкий и распространённый элемент в пределах изученной нами Вселенной - масса водорода составляет ~75% всей *барионной* (состоящей из *барионов* (*нейтронов, протонов*) и электронов) массы материи и ~92% всего вещества.

Природные изотопы водорода:

- **Протий** - самый распространённый и лёгкий изотоп водорода, **ядро состоит из одного протона + на орбитали 1 электрон**. Является кандидатом на роль главного элемента «водородной» энергетики.
- **Дейтерий** - тяжёлый водород, **ядро состоит из одного протона и одного нейтрона + на орбитали 1 электрон**. Используется в атомной энергетике в качестве замедлителя нейтронов в тяжеловодных ядерных реакторах, работающих на природном необогащённом уране.
- **Тритий** - радиоактивный изотоп водорода с периодом полураспада немногим более 12 лет, **ядро состоит из одного протона и двух нейтронов + на орбитали 1 электрон**. Используется в военной и научно-исследовательской сфере, является сырьём для запуска термоядерного реактора.

Природный водород состоит из 99,985% протия и 0,015% дейтерия. **На Земле в чистом виде водорода практически нет**, он встречается в связанном с другими атомами состоянии.

При «сжигании» водорода в чистом кислороде единственными продуктами горения являются тепло и водяной пар.

Физико-химические свойства водорода

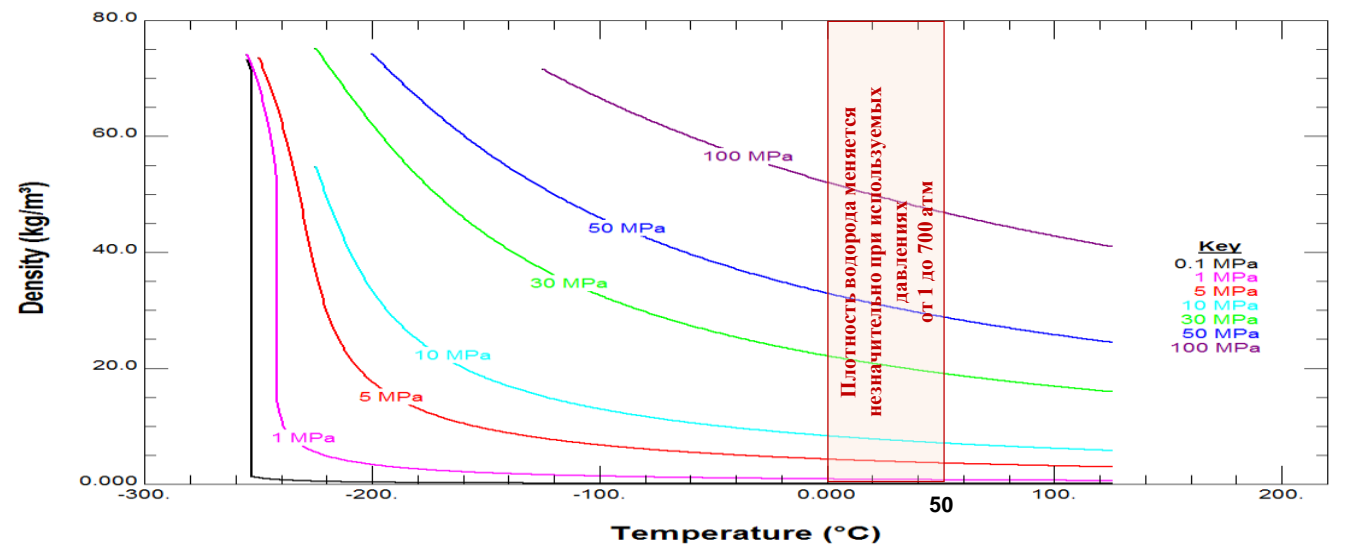
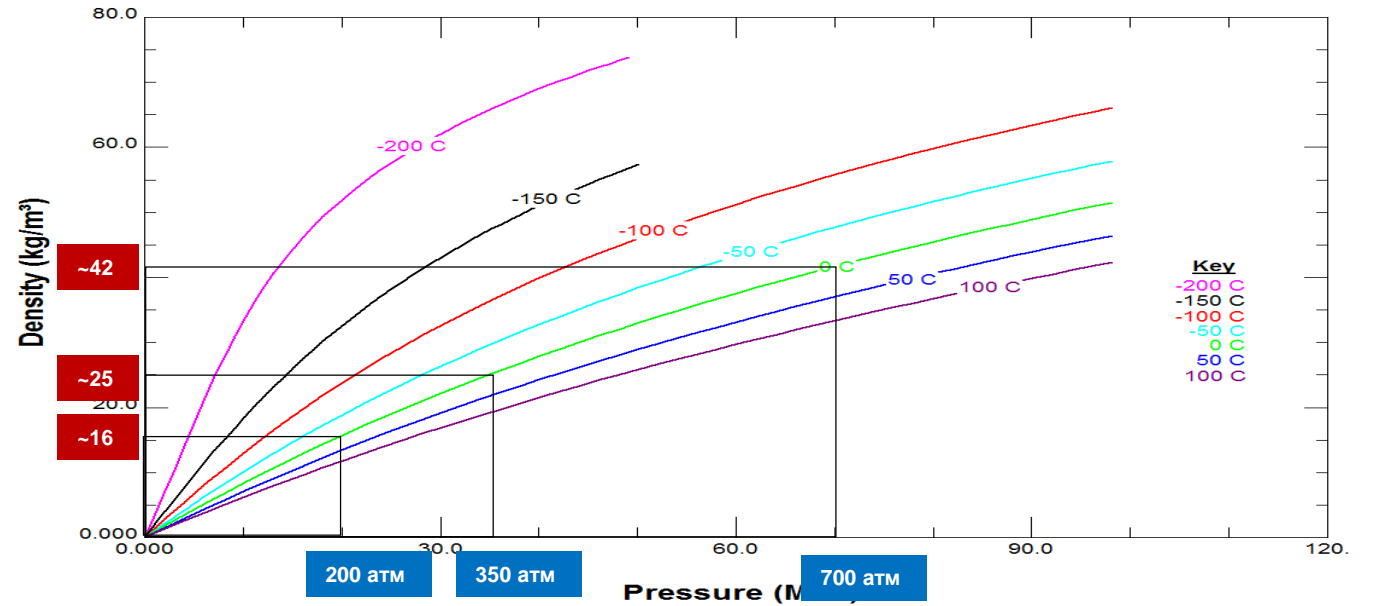
- **Водород** – газ, состоящий из двухатомных молекул с **молярной массой – 2,016 г/моль**, без цвета, без запаха, мало растворим в воде, самый легкий из газов - в 14,5 раз легче воздуха, в 7,8 раз легче метана.
- Температура **сжижения** водорода **-253°С (20°К)**, **кристаллизации** водорода **-259°С (14°К)**.
- Благодаря ничтожному размеру, молекулы водорода могут **диффундировать через резину, стекло и даже через металлы**.
- Температура пламени смеси **«водород-воздух» – 2300°К**, в то время как смеси «бензин-воздух» - 1600-1700°К, «метан-воздух» - 1970°К, «пропан-бутан-воздух» - 2200°К.
- В смеси с одним объемом кислорода два объема водорода образует взрывчатую смесь - **гремучий газ**.
- Некоторые металлы, например, **платина и палладий**, способны поглощать значительные количества газообразного водорода. С,
- При взаимодействии с **щелочными и щелочноземельными** металлами образует **гидриды металлов**.
- При комнатной температуре реагирует с **фтором**, на свету с **хлором**, при нагревании – с **кислородом, серой, азотом**.

Свойства водорода как энергоносителя

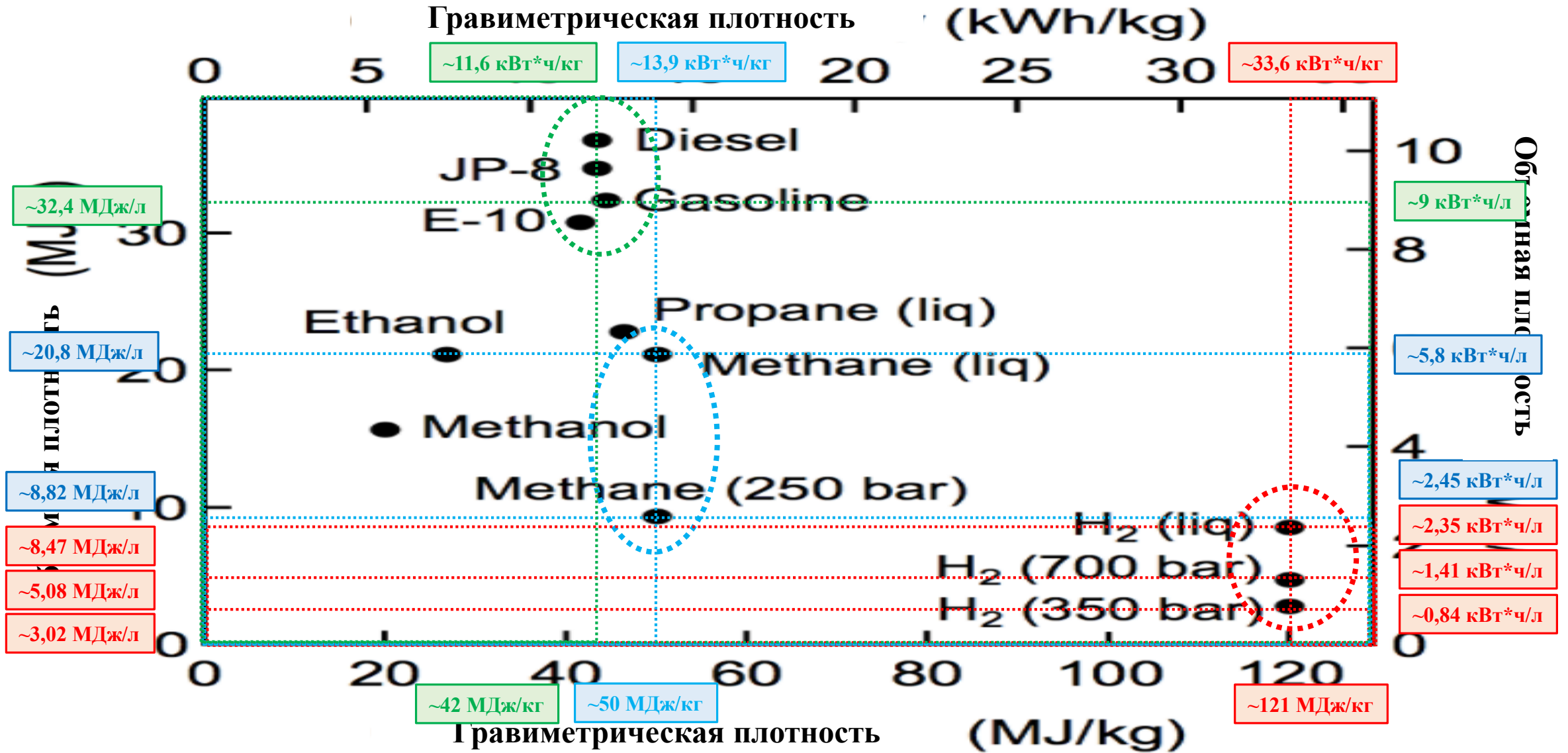
Показатель	Единицы измерения	Значение	
Температура точки кипения	К	20,39	
Плотность твердого водорода в тройной точке	кг/м ³	86,7	
Плотность жидкого водорода в тройной точке	кг/м ³	~70 г/л	
Плотность газообразного водорода при нормальных условиях (давление 0,101325 МПа, температура 273,15 К)	кг/м ³	~0,09 г/л	
Удельная теплота сгорания на единицу массы	высшая	МДж/кг	~121 МДж/кг или ~33,6 кВт*ч/кг
	низшая	МДж/кг	
Удельная теплота сгорания на единицу объема	высшая	МДж/м ³	~10,9 КДж/л или ~3,03 Вт*ч/л
	низшая	МДж/м ³	

Зависимость плотности водорода (кг/м³) от давления (Мпа) и температуры (°С)

Temperature (°C)	Pressure (MPa)						
	0,1	1	5	10	30	50	100
-255	73,284	74,252					
-250	1,1212	68,747	73,672				
-225	0,5081	5,5430	36,621	54,812	75,287		
-200	0,3321	3,3817	17,662	33,380	62,118	74,261	
-175	0,2471	2,4760	12,298	23,483	51,204	65,036	
-150	0,1968	1,9617	9,5952	18,355	43,079	57,343	
-125	0,1636	1,6271	7,9181	15,179	37,109	51,090	71,606
-100	0,1399	1,3911	6,7608	12,992	32,614	46,013	66,660
-75	0,1223	1,2154	5,9085	11,382	29,124	41,848	62,322
-50	0,1086	1,0793	5,2521	10,141	26,336	38,384	58,503
-25	0,0976	0,9708	4,7297	9,1526	24,055	35,464	55,123
0	0,0887	0,8822	4,3036	8,3447	22,151	32,968	52,115
25	0,0813	0,8085	3,9490	7,6711	20,537	30,811	49,424
50	0,0750	0,7461	3,6490	7,1003	19,149	28,928	47,001
75	0,0696	0,6928	3,3918	6,6100	17,943	27,268	44,810
100	0,0649	0,6465	3,1688	6,1840	16,883	25,793	42,819
125	0,0609	0,6061	2,9736	5,8104	15,944	24,474	41,001



Энергетическая «плотность» водорода и других видов топлива



Содержание



- Водород, физико-химические и энергетические свойства
- **Развитие водородной энергетики**
- Получение водорода
- Хранение водорода
- Транспортировка водорода
- Применение водорода
- Экологическая и промышленная безопасность
- Проекты НГК в области водородной энергетики

Развитие «водородной энергетики»

Первый двигатель внутреннего сгорания, работающий на водороде, полученным электролизом воды, создал *Франсуа Исаак де Риваз в 1806 году*. В блокадном Ленинграде, где бензин был в дефиците, военный техник *Борис Исаакович Шелищ* предложил использовать воздушно-водородную смесь для работы заградительных аэростатов, на смесь перевели двигатели внутреннего сгорания лебёдок аэростатов и около 600 автомобилей ГАЗ-АА.

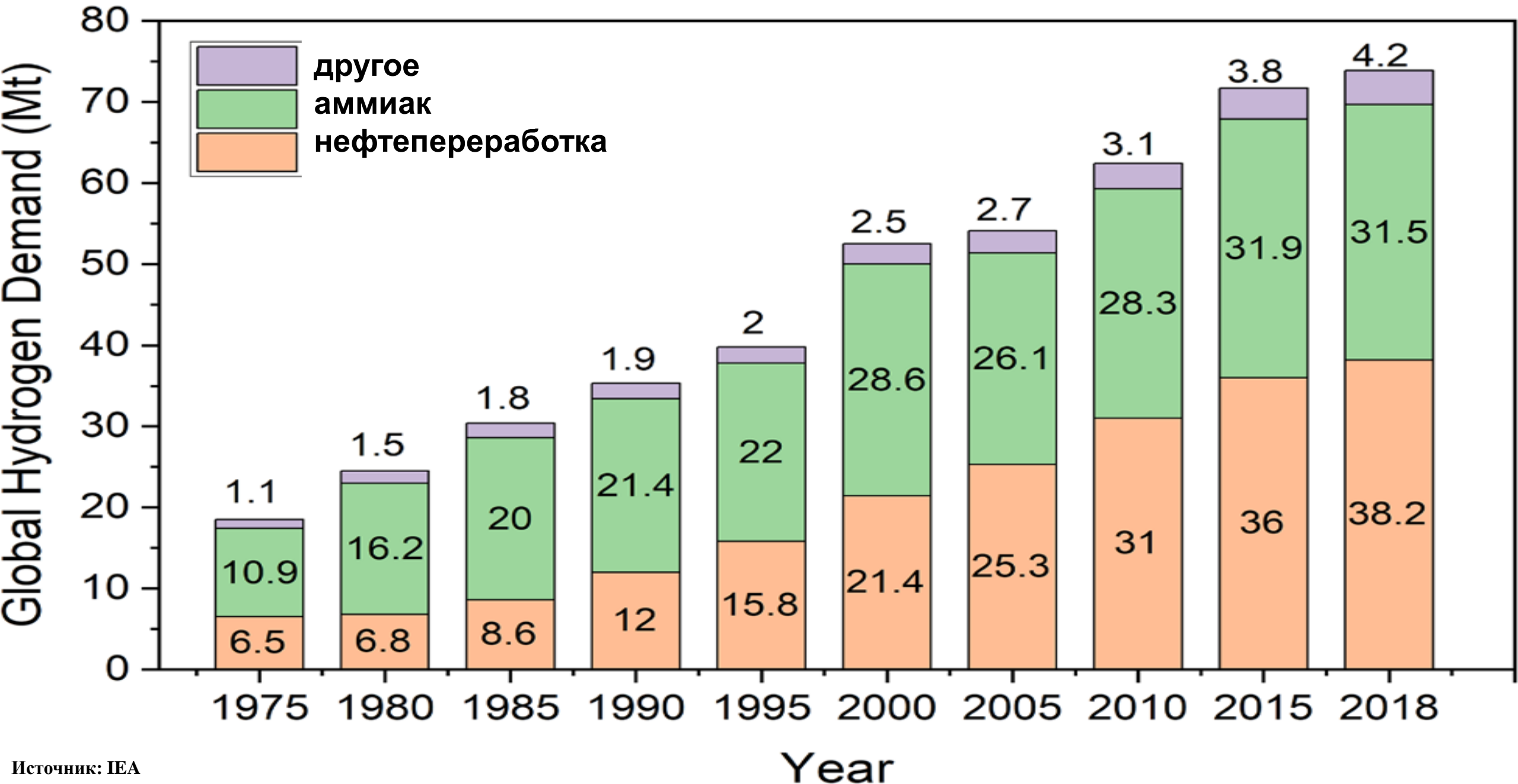
Понятие **«водородная энергетика»** было сформулировано в середине 1970-х годов в результате исследований, проводимых в области применения *водорода как источника энергии*, что явилось в тот момент следствием энергетического кризиса, охватившего большое число стран, а также в связи с изменениями климата. Важной вехой развития явились исследования, проведённые в конце 1980-х годов в американском НИИ чистой энергии при университете Майями, в результате которых было показано, что *экологическая чистота водорода как источника энергии делает его использование потенциально рентабельным в целом ряде производств*.

Направление **«водородная энергетика»** изучает полный жизненный цикл водородной отрасли: получение, хранение, транспортировку, использование водорода, а также все сопутствующие проблемы реализации каждого этапа.

Существующие направления использования водорода



Динамика использования водорода в мире



Содержание



- Водород, физико-химические и энергетические свойства
- Развитие водородной энергетики
- **Получение водорода**
- Хранение водорода
- Транспортировка водорода
- Применение водорода
- Экологическая и промышленная безопасность
- Проекты НГК в области водородной энергетики

Классификация водорода по методам получения

«Зеленый водород» - является самым экологичным, т. к. получают его с помощью электролиза, если электричество поступает от ВИЭ, таких как ветер, солнечная или гидроэнергия, выбросы CO₂ отсутствуют.

«Желтый (оранжевый) водород» – как и зеленый получают путем электролиза, однако источником энергии являются атомные электростанции, выбросы CO₂ отсутствуют, но метод не является абсолютно экологичным.

«Бирюзовый водород» - получают разложением метана на водород и твердый углерод путем пиролиза. Дает относительно низкий уровень выброса углерода, который может быть либо захоронен, либо использован в промышленности, например, в производстве стали или резины, но он не попадает в атмосферу.

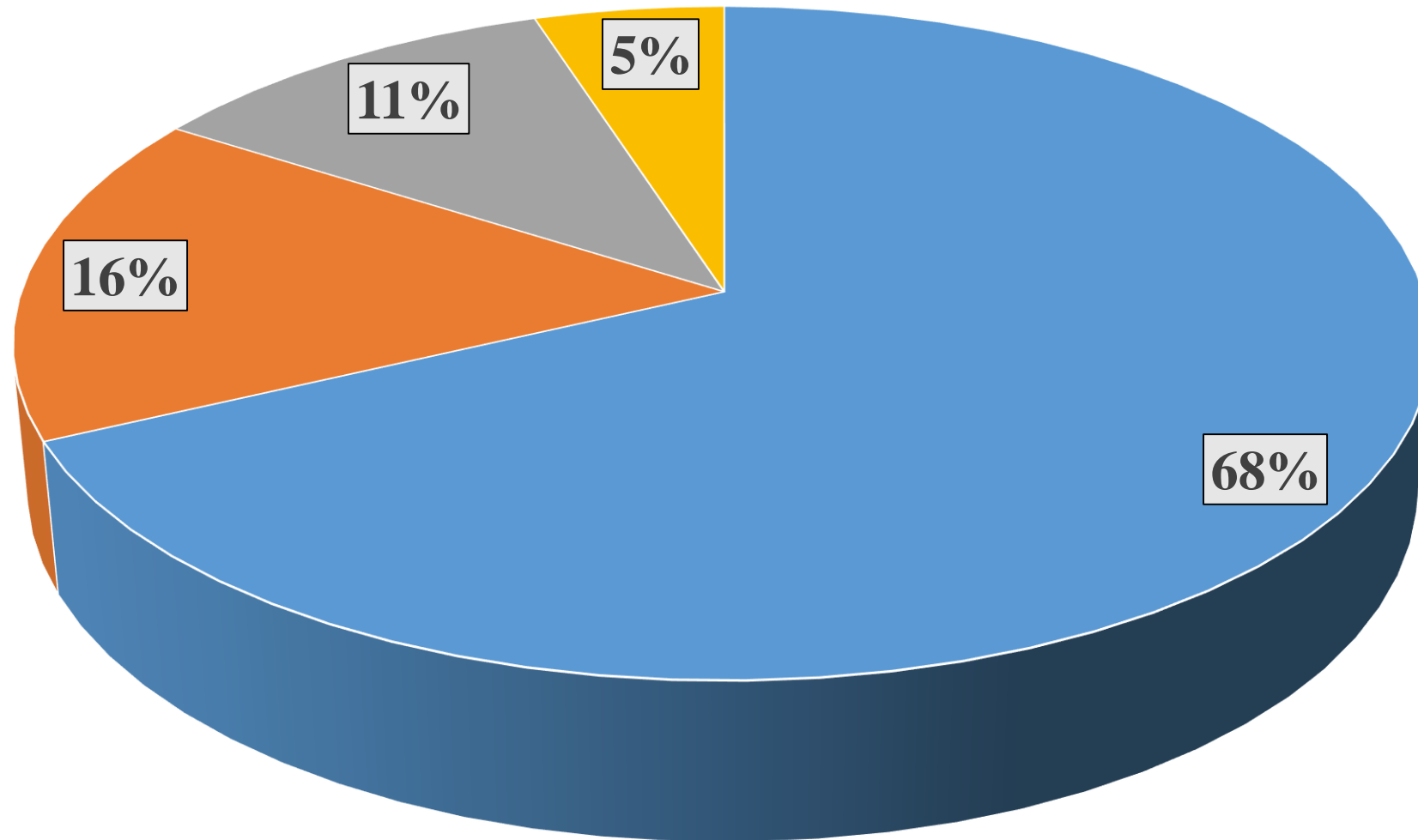
«Серый водород» - производится путем паровой конверсии метана. Исходным сырьем для такой реакции служит природный газ. Этот процесс легко осуществим с практической точки зрения, однако в ходе химической реакции выделяется углекислота, причем в тех же объемах, что и при сгорании природного газа.

«Голубой водород» - производится путем паровой конверсии метана, но при условии улавливания и хранения углерода, что дает примерно двукратное сокращение выбросов углерода.

«Коричневый (бурый) водород» - получают с помощью газификации бурого угля, в результате чего образуется синтез-газ - смесь углекислого газа (CO₂), монооксида углерода (CO), водорода, метана и этилена. Очень неэкологичный процесс по сравнению с другими методами.

Способы получения водорода

■ природный газ ■ нефть ■ уголь ■ электролиз воды



Сегодня в качестве сырья для производства водорода используют:

- природный газ - 68%,
- нефть – 16%,
- уголь - 11%,

- электролиз воды – 5% .

В настоящий момент относить «водородную энергетику» к категории «возобновляемой» и «экологически чистой» никак нельзя.

Синий водород ~95%

Зеленый водород ~5%
(себестоимость производства
«зеленого» водорода
в 2÷6 раз больше, чем «синего»)

Электролиз воды



Впервые электролитическое разложение воды на кислород и водород было осуществлено в 1800 году, а промышленное освоение этого метода началось с 1888 года, когда стали широко доступны генераторы постоянного тока. Воду можно разложить на составляющие - кислород и водород:



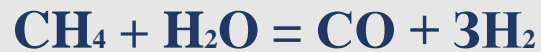
- Электролиз воды - дорогая технология получения водорода, на неё приходится всего ~5% от общего производимого объёма водорода.
- Технология электролиза воды выглядит привлекательной в связи с экологической чистотой получения и возможности создания установок с широким диапазоном производительности.
- Способ прост и удобен в эксплуатации, обладает высокой чистотой производимого водорода.
- **Электролиз воды - перспективный метод экологически чистого получения водорода при использовании энергии ВИЭ, атомных или гидроЭС.**

Промышленная установка щелочного электролиза воды

Тип электролизёра	Энергетическая емкость водорода ~3,03 кВт*час/м ³ , электрическая ~2,2 кВт*час/м ³	Темпера- тура, К	Производи- тельность, Н ₂ м ³ /ч	Давление, МПа	КПД, %
щелочной	4,5–5,5	320–370	до 500	0,1–5	50–70
с твердым поли- мерным электро- литом (ТПЭ)	3,5–4,5	350–370	до 100	0,1–15	80–90
с твердым оксид- ным электролитом	2,5–4	1070–1270	—	0,1–3	≥85

Паровая конверсия метана ПКМ

Получение водорода из метана в настоящее время - наиболее рентабельный способ производства. Процесс отделения водорода от углерода протекает в трубчатых печах (химических паровых риформерах) с внешним подводом теплоты при температурах **750–850°C** через стенку трубы на каталитических поверхностях (никель, корунд):



Образующиеся газообразные продукты реагируют между собой:



Это самый дешёвый и рентабельный способ получения водорода. Себестоимость процесса ~ 2÷5 долларов США за 1 кг водорода.



Установка производства водорода методом парового риформинга

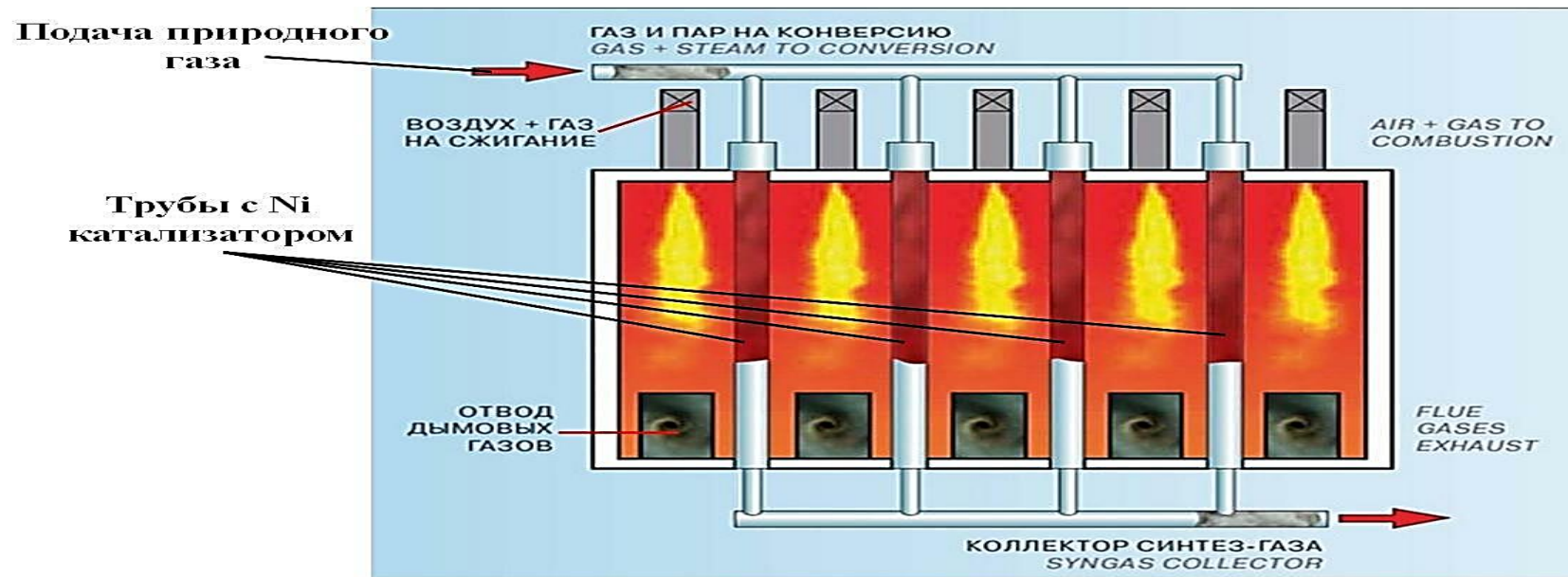
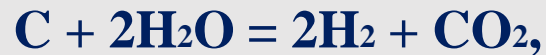
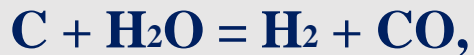


Схема реактора паровой конверсии метана

Газификация угля

Получение водорода из угля является старейшим методом - первый газогенератор был построен в Великобритании в 40-х годах XIX века. Получение водорода газификацией угля заключается в обработке угля воздушно-паровой или кислородно-паровой смесью при температуре свыше **1000°C**. Для получения синтез-газа (сингаза) используются реакции паровой, парокислородной конверсии и неполного окисления угля, которые описываются следующими уравнениями:



Продукты газификации содержат H_2 , CO , H_2O , H_2S , NH_3 , N_2 , легкие углеводороды, смолу и шлаки, поэтому необходимо проводить дополнительно очистку получаемого водорода.



Установка газификации угля

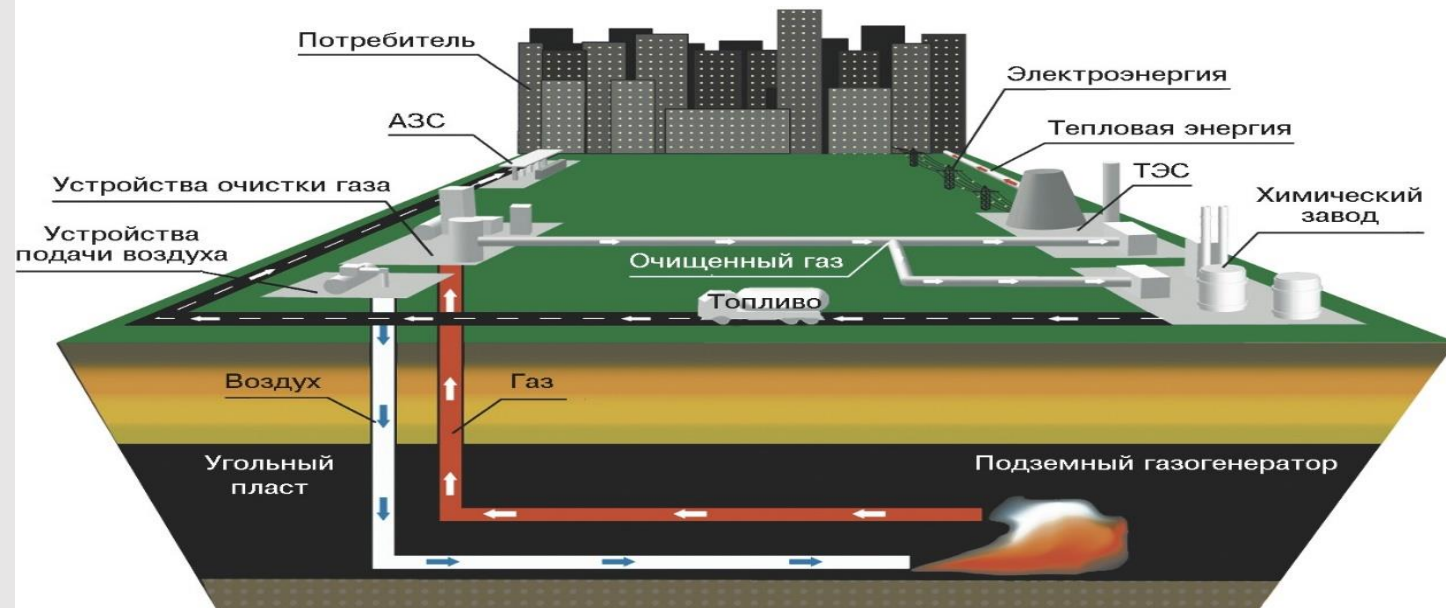
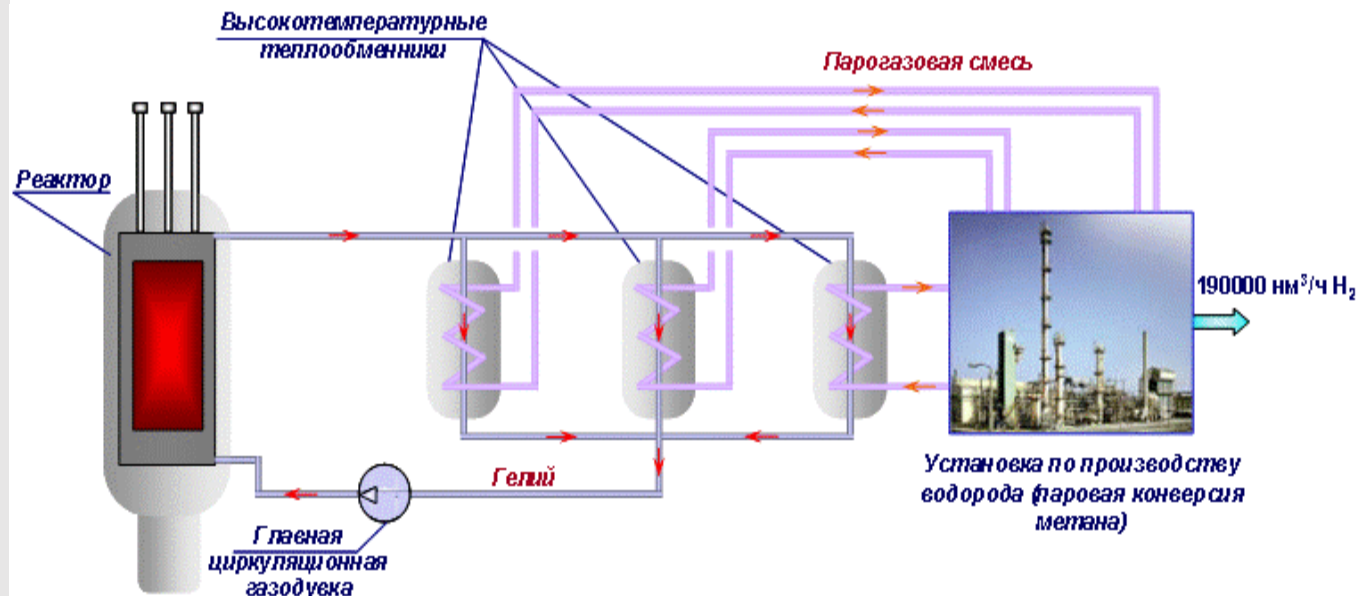
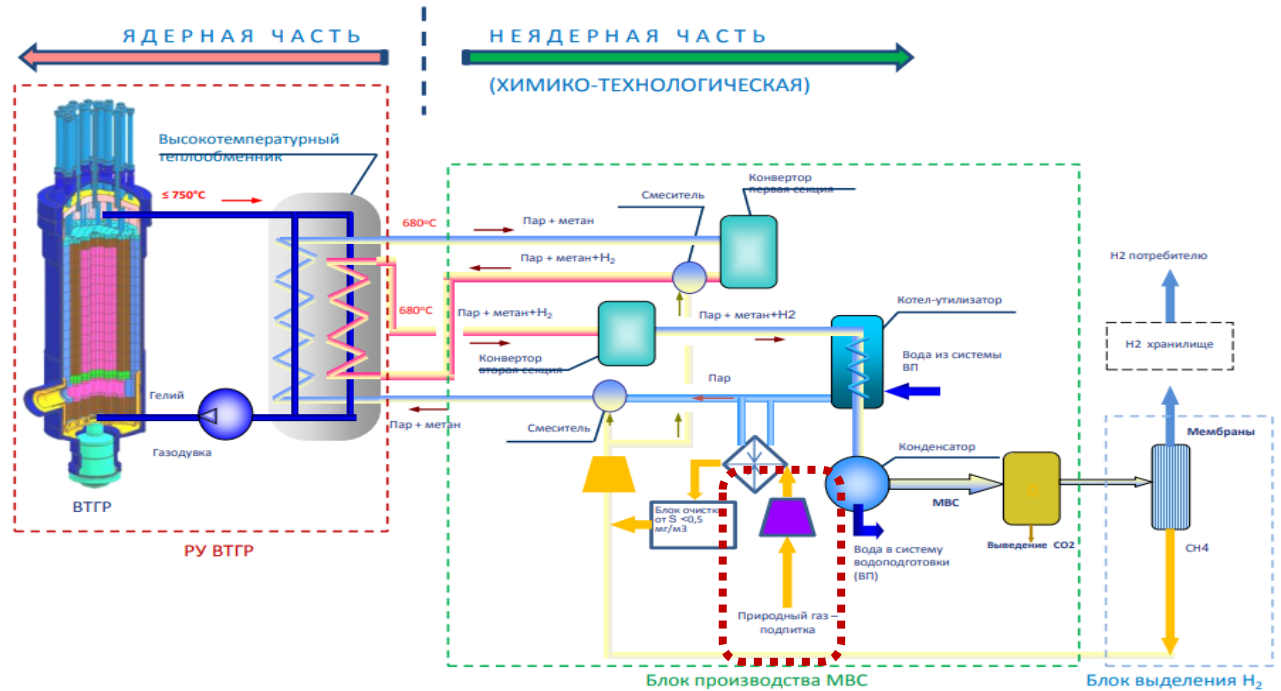


Схема подземной газификации угля

Использование ядерной энергетики (концепция атомно-водородной энергетики)

Первые **высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР)** созданы в 1960-х. В 1970-х годах родилась целая концепция атомно-водородной энергетики. В ВТГР могут быть применены как замкнутые, так и открытые топливные циклы с использованием урана, плутония и тория.

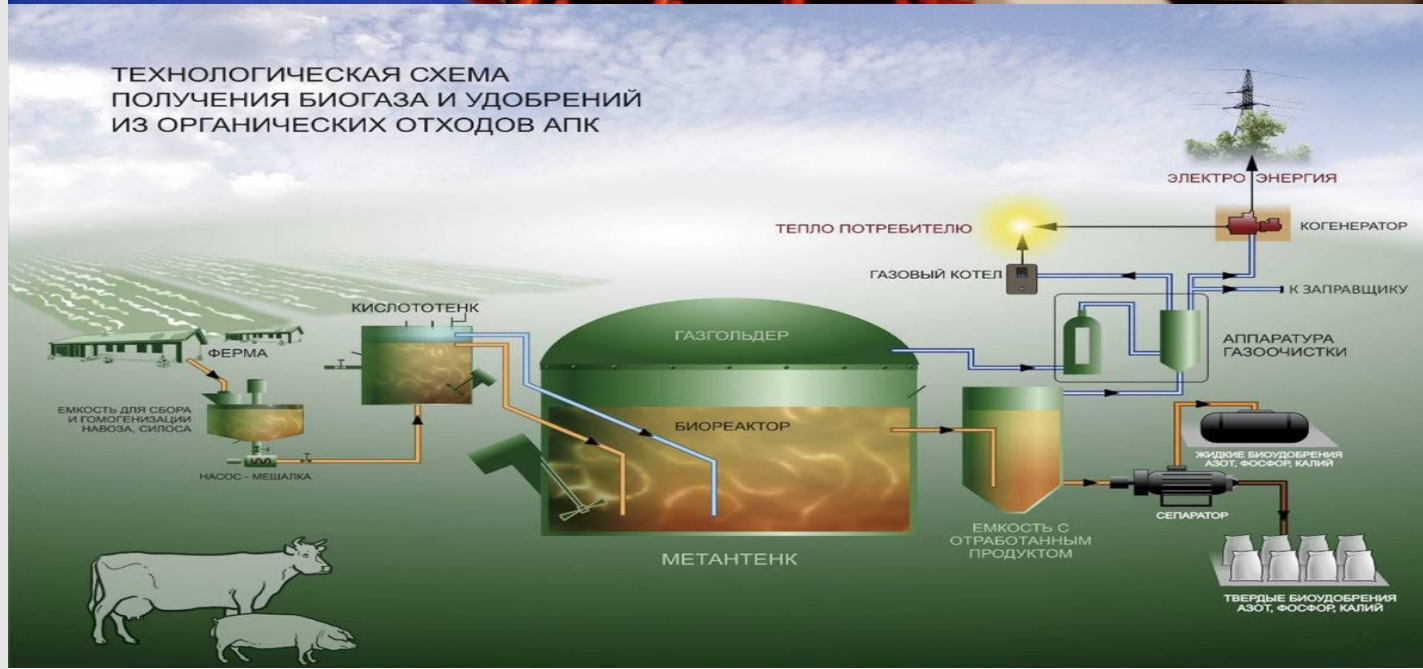
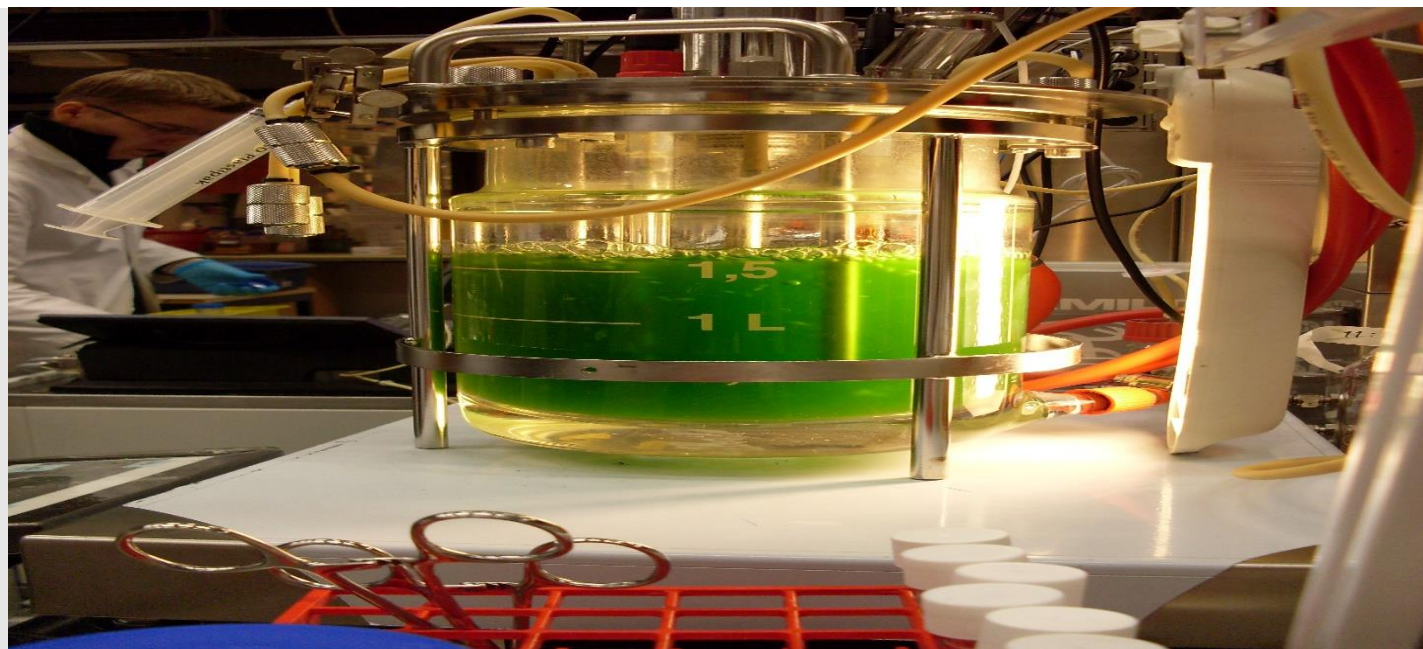
Проведенные к настоящему времени исследования дают основания для уверенности в том, что высокотемпературный реактор с гелиевым теплоносителем – это ядерная технология, которая может реально обеспечить высокотемпературным теплом промышленное производство водорода и другие энергоемкие технологические процессы.



Биотехнологии получения водорода

➤ **Биологическое получение водорода при помощи водорослей** - процесс биологического расщепления воды, сопровождающийся выделением молекулярного водорода, которое осуществляется в замкнутом **фотобиореакторе** одноклеточными зелёными водорослями - **хламидомонадами** или **хлореллами**.

➤ **Переработке биомассы и промышленно-бытовых отходов** с целью производства синтез-газа, в состав которого входят водород и прочие газы. При термохимической обработке биомассы её нагревают без доступа кислорода до температуры 500–800 °С, в результате чего образуются синтез-газ (сингаз). Для выделения водорода из синтез-газа используются разнообразные методы: адсорбция, абсорбция, диффузии через мембраны, электрохимическая конверсия, глубокое охлаждение, катализ.



Получение водорода из ТБО

В 2006 году **Лондонское водородное партнерство** опубликовало исследование о возможности производства водорода из муниципального и коммерческого мусора. Согласно исследованию, только в Лондоне можно ежедневно производить 141 тонну водорода как пиролизом, так и анаэробным сбраживанием мусора, а из муниципального мусора можно производить 68 тонн водорода.

В 2013 году **Университет в г. Лунд (Швеция)** провел исследования получения водорода из золы, которую можно использовать в качестве ресурса за счёт рекуперации водородного газа вместо того, чтобы выпускать его в атмосферу. Процесс получения водорода включает в себя размещение золы в бескислородной среде. Зола смачивается водой, после чего образуется газообразный водород. Газ всасывается через трубы и хранится в резервуарах.



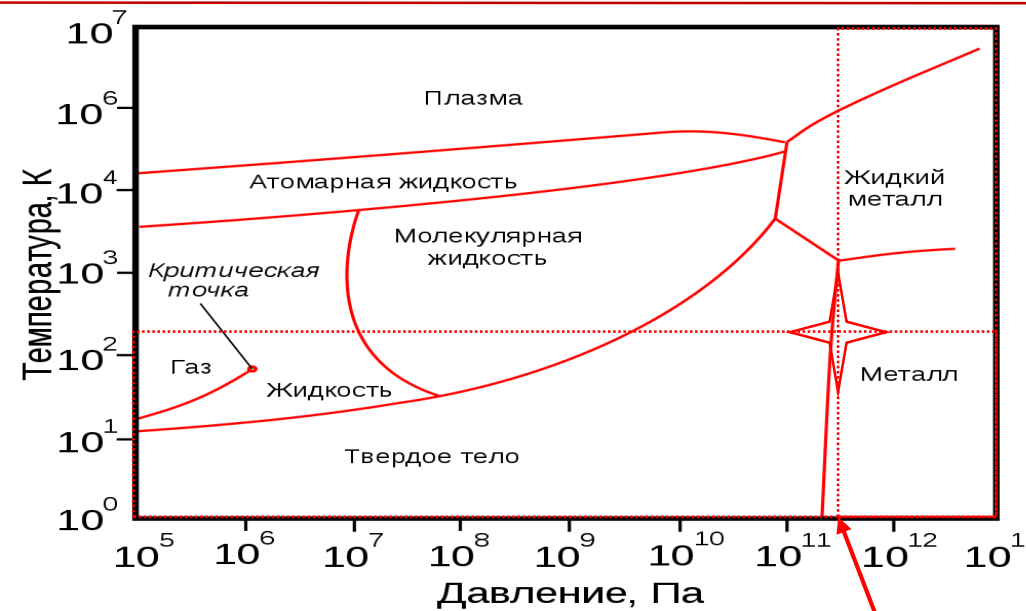
Водород из солнечной и ветровой энергии



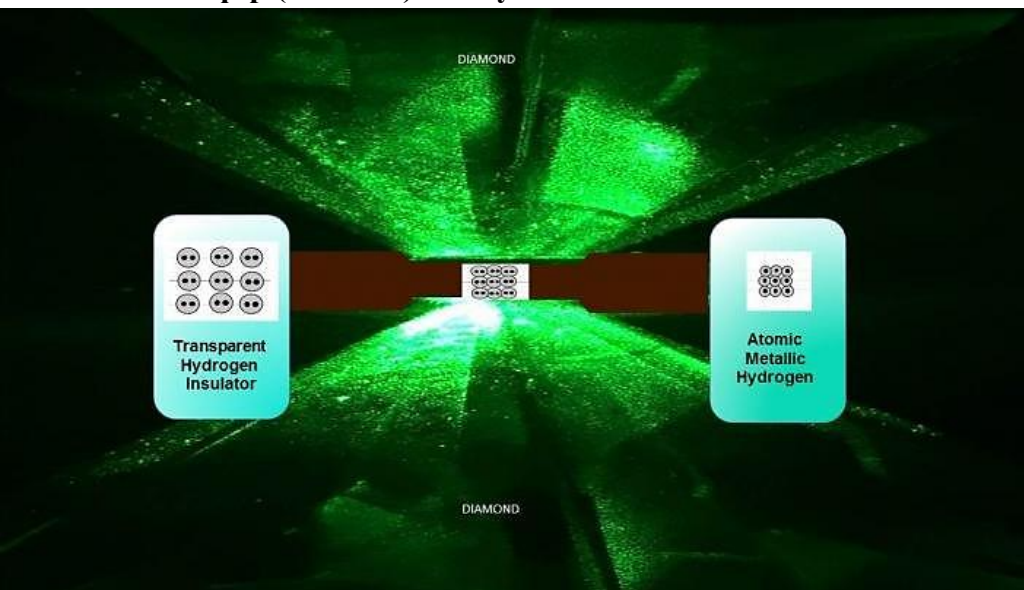
Концепция производства водорода **высокотемпературным разложением воды при помощи солнечного света** была разработана швейцарской компанией **“Clean Hydrogen Producers”**. При температуре более 1700 °С вода распадается на водород и кислород. Получить подобные температуры можно при фокусировке солнечного света в солнечной башне с помощью линз либо параболических зеркал.

Департамент энергетики США совместно с национальной исследовательской энергетической лабораторией проводят исследовательские работы в рамках разработки концепции «Водород из ветра», исследуя электролитические методы производства водорода **с помощью энергии ветра**. Построены электролизные заправочные станции с ветрогенераторами в качестве источника энергии мощностью до 100 кВт в Национальной лаборатории по изучению возобновляемой энергии.

Перспективы использования металлического водорода



Металлический водород получен при давлении **5 миллионов атмосфер (500 ГПа)** между алмазными наковальнями.



Эффективность водородной энергетики зависит от увеличения **плотности** и, соответственно, **повышения энергоёмкости водорода**. В 2017 году физики из США заявили о получении **металлического водорода**, в 2019 году французскими физиками были подтверждены условия существования водорода в металлической форме - при увеличении внешнего давления **до сотен ГПа (миллионов атмосфер)** атомы водорода начинают проявлять металлические свойства - **ядра водорода сближаются друг с другом существенно ближе «боровского» радиуса** таким образом, что сила связи электрона с ядром становится нелокализованной, связь электронов с протонами ослабевает и они формируют свободный «электронный газ» так же, как в металлах.

Металлический водород – метастабильный материал, представляющий компактное, эффективное и чистое топливо. При этом высвобождаемая энергия не требует окисления с кислородом, а выделяется при фазовом переходе из металлического состояния в газообразное.

Плотность металлического водорода сравнима с плотностью воды, поэтому энергетическая емкость металлической водородной ячейки объёмом 1 литр (1 кг) составляет ~216 МДж энергии, что только **в ~6,5 раза превышает энергоёмкость того же объема жидкого углеводородного топлива** при огромной энергоёмкости процесса.

Содержание



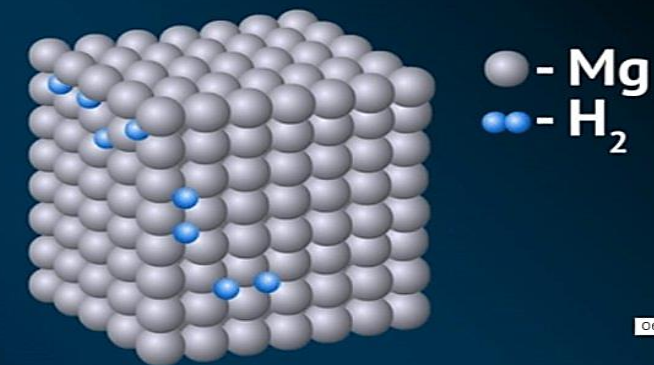
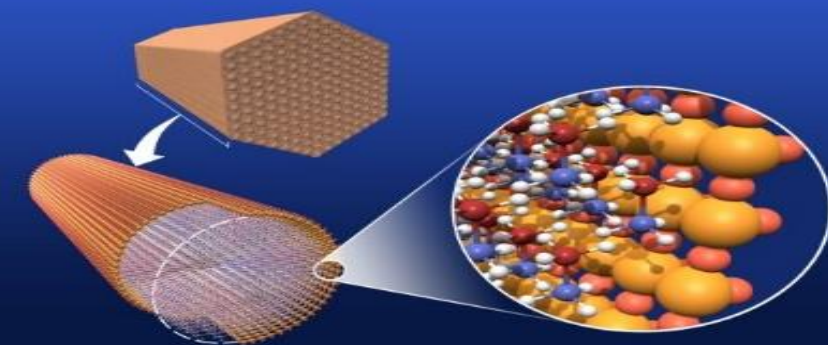
- Водород, физико-химические и энергетические свойства
- Развитие водородной энергетики
- Получение водорода
- **Хранение водорода**
- Транспортировка водорода
- Применение водорода
- Экологическая и промышленная безопасность
- Проекты НГК в области водородной энергетики

Хранение водорода

Хранение водорода – сложный, а поэтому дорогой процесс из-за очень низкой плотности водорода как в газообразном, так и в жидком состоянии и, как следствие, в технических рисках больших утечек. К хранению водорода предъявляются строгие требования, среди которых главным является то, что системы хранения должны выдерживать либо криогенные температуры, либо высокие давления, либо содержать активные материалы, которые взаимодействуют с водой или воздухом. Условия хранения водорода – всегда неблагоприятные, требующие обеспечения высокой надёжности и безопасности.

Способы хранения водорода можно разделить на:

- **Физические** – в сжатом или сжиженном состоянии;
- **Физико-химические** - в первую очередь в адсорбированном состоянии, наиболее перспективны для этого способа хранения являются наноматериалы, так как способность к адсорбции у них очень велика;
- **Химические** – в связанном состоянии в металлогидридах (химических соединениях водорода с переходными металлами и редкоземельными элементами).



Хранение газообразного водорода под давлением



В России принят стандарт окраски и маркировки баллонов содержащий сжатый водород: *темно-зеленый баллон, с красной надписью*

Самый простой метод хранения водорода – **в газообразном состоянии под давлением**. Но так как плотность газообразного водорода при нормальных условиях $\sim 90 \text{ г/м}^3$, для хранения 1 кг водорода потребуются $\sim 11,2 \text{ м}^3$ объёма. В обычных стальных баллонах хранится водород под давлением до 200 атмосфер - при таком давлении в 1 м^3 хранится $\sim 16 \text{ кг}$ водорода. То есть для хранения 1 кг водорода при таком давлении необходимы ~ 62 литра объема (бак легкового автомобиля). В то же время, в том же самом объеме, но уже при нормальном давлении, могут храниться $\sim 50 \text{ кг}$ бензина (энергоемкость $\sim 580 \text{ кВт*час}$).

Компримированный до давления 20 МПа водород, хранящийся в баке 62 литра, имеет меньшую в 17,3 раз энергетическую емкость, чем жидкое углеводородное топливо.

Хранение водорода в жидком виде

Плотность **жидкого водорода** составляет ~ 70 кг/м³, что в 1,67 раза больше чем в газообразной форме при давлении в 70 Мпа (~ 42 кг/м³), соответственно, объемная энергетическая плотность жидкого водорода при нормальном давлении $\sim 8,5$ МДж/л, **что в 2,45 раза ниже чем у жидкого метана ($\sim 20,8$ МДж/л).**

Точка кипения водорода $\sim 20^\circ\text{K}$, поэтому процесс сжижения водорода очень энергозатратный - от 25 до 45 % энергии сжижаемого водорода расходуется на процесс сжижения.

Хранится жидкий водород в криогенных контейнерах, для производства которых используются высококачественные стали, предназначенные для требуемых температурных диапазонов. Резервуары оснащены фильтрами тонкой очистки жидкого водорода и имеют высокоэффективную теплоизоляционную систему, однако имеют место существенные потери водорода, особенно заметные для небольших резервуаров с большим соотношением поверхности к объему (**уникальные способности водорода диффундировать через поверхность материала**).

Наибольших успехов в плане уменьшения утечек добились специалисты BMW. Они разработали и испытали несколько автомобилей с водородным топливом, хранящимся в жидком виде в специальных баллонах - удалось уменьшить потери до 1,5 % массы в день.



Резервуар для хранения жидкого водорода на 12-ти осных сцепных транспортёрах



На BMWHydrogen 7 установлен бензобак 74 литра и баллон для хранения 5,2 кг водорода

Химически связанный водород в жидкостях

1. **Аммиак** сжижается при комнатной температуре и давлении 1 МПа, в жидком виде аммиак можно легко транспортировать и хранить, а потом получать водород:



Чтобы получить килограмм водорода, нужно использовать 5,65 кг аммиака - *теплота сгорания полученного водорода превышает только на ~15% теплоту сгорания использованного в процессе разложения аммиака.*

2. Водород из **метанола** может быть получен:

➤ Методом каталитического разложения:



с последующей каталитической конверсией CO

➤ Методом каталитической паровой конверсии:



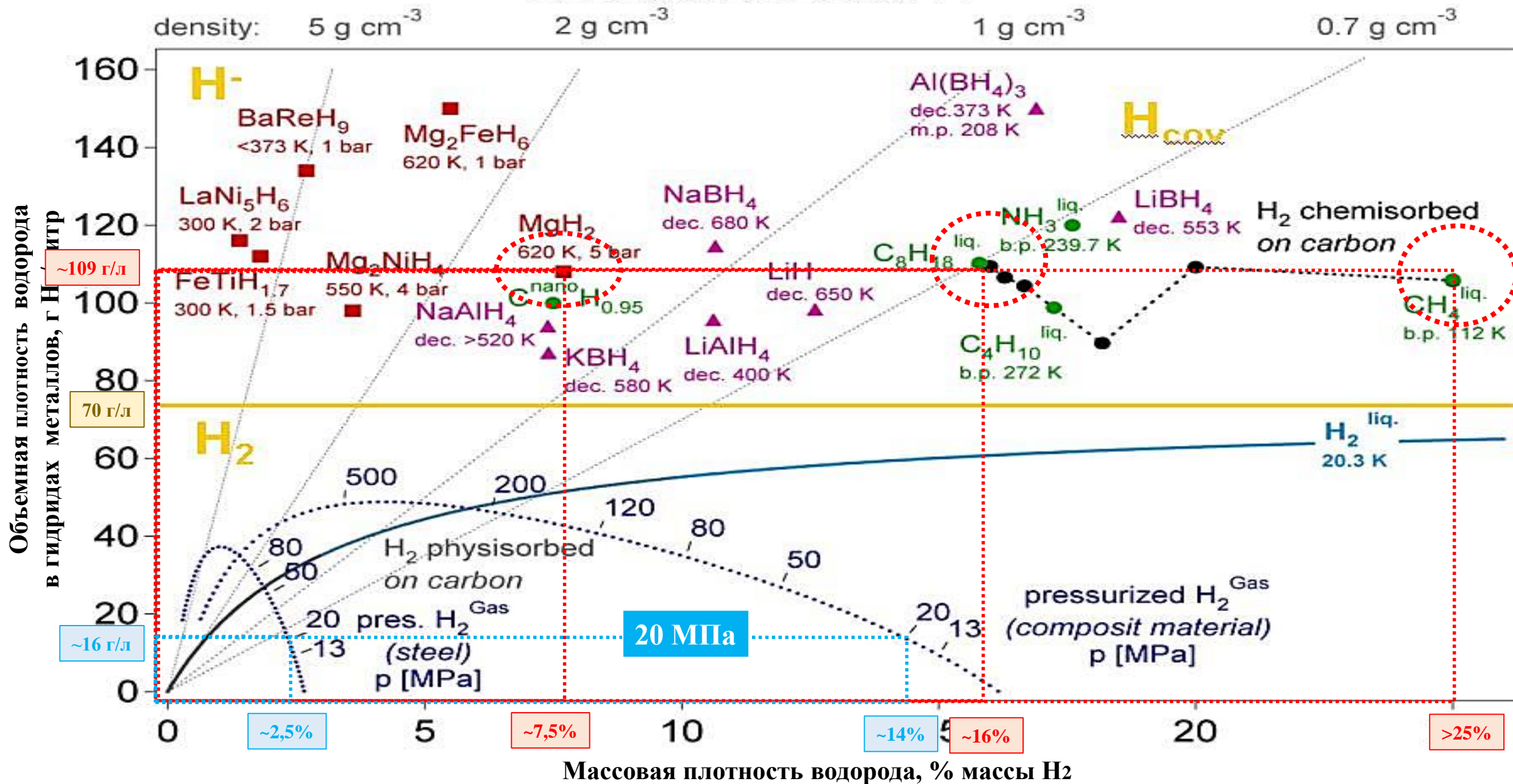
с использованием цинк-хромовый катализаторов и температуре процесса 300–400 °С.

Недостаток подобных методов хранения водорода заключается в однократном использовании среды хранения.



Шаровые резервуары объемом до 5000 м³ используются для хранения под избыточным давлением сжиженных углеводородных газов, жидких продуктов химических производств, например аммиака

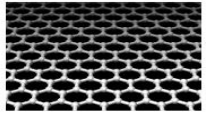
Хранение водорода в гидридах металлов



Гидрид магния (MgH_2) – на сегодня самый изученный, доступный, массовый и недорогой материал. Объемная плотность водорода в гидриде магния **~109 г/л (сопоставима с объемной плотностью водорода в бензине и жидком метане при существенно меньшей массовой плотности %)**, однако гидрид магния имеет термодинамические ограничения – водород не **адсорбируется** при температуре **ниже 200 °С**, а десорбция происходит при температуре **выше 400 °С**

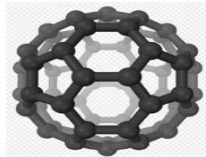
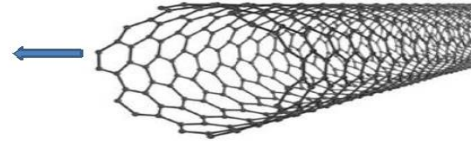
Хранение водорода с помощью наноматериалов

Наноструктуры



→ Графен

← Углеродные нанотрубки



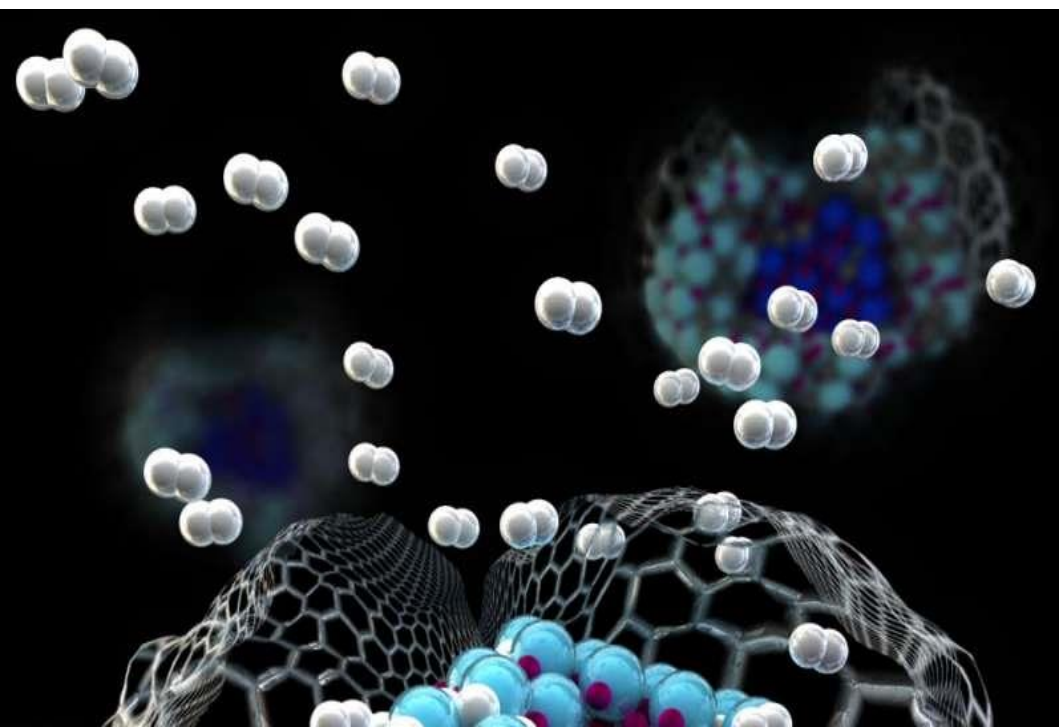
→ Фуллерены

Среди множества адсорбирующих водород материалов **углеродные наноструктуры** обладают одним из наиболее высоких сорбционных показателей.

Наибольший интерес представляют **углеродные нанотрубки (УНТ)**, которые могут заполняться газообразными веществами и связывать большое его количество. Проведенные многочисленные исследования показали наличие очень высокой адсорбции водорода при температурах, близких к комнатной, и давлениях, близких к атмосферному.

Нанотрубки значительно удобнее и практичнее графита в качестве адсорбирующей водород среды, поскольку они способны удерживать водород даже при комнатной температуре, а их изогнутая поверхность увеличивает энергию связи молекул водорода с графитом.

В настоящее время продолжают интенсивные поиски путей повышения водород-углеродного отношения при аккумулировании до практически приемлемого уровня.

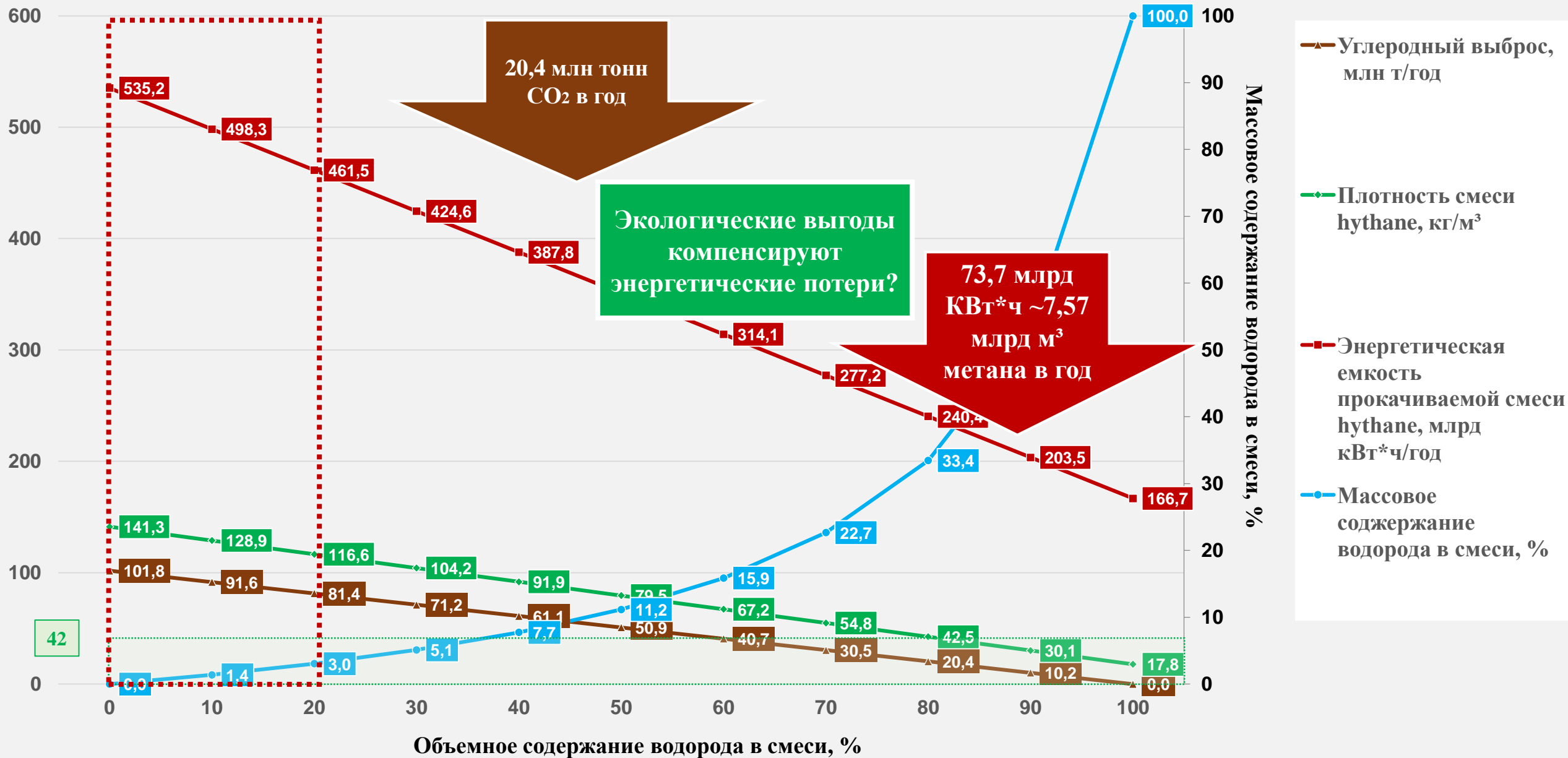


Содержание



- Водород, физико-химические и энергетические свойства
- Развитие водородной энергетики
- Получение водорода
- Хранение водорода
- **Транспортировка водорода**
- Применение водорода
- Экологическая и промышленная безопасность
- Проекты НГК в области водородной энергетики

Моделирование прокачки «метан – водородной» смеси по «Северному Поток-2»

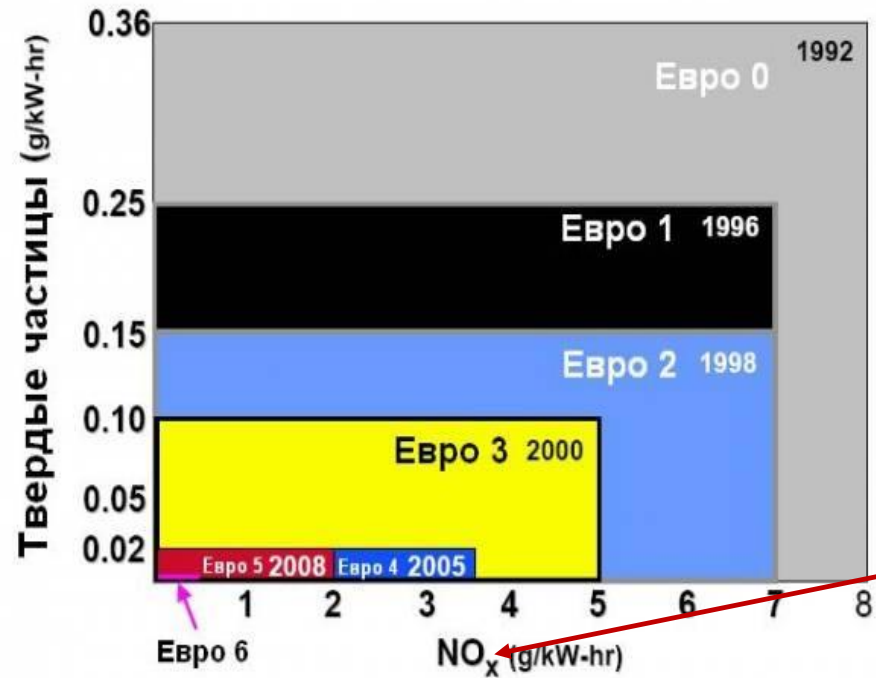


Содержание



- Водород, физико-химические и энергетические свойства
- Развитие водородной энергетики
- Получение водорода
- Хранение водорода
- Транспортировка водорода
- **Применение водорода**
- Экологическая и промышленная безопасность
- Проекты НГК в области водородной энергетики

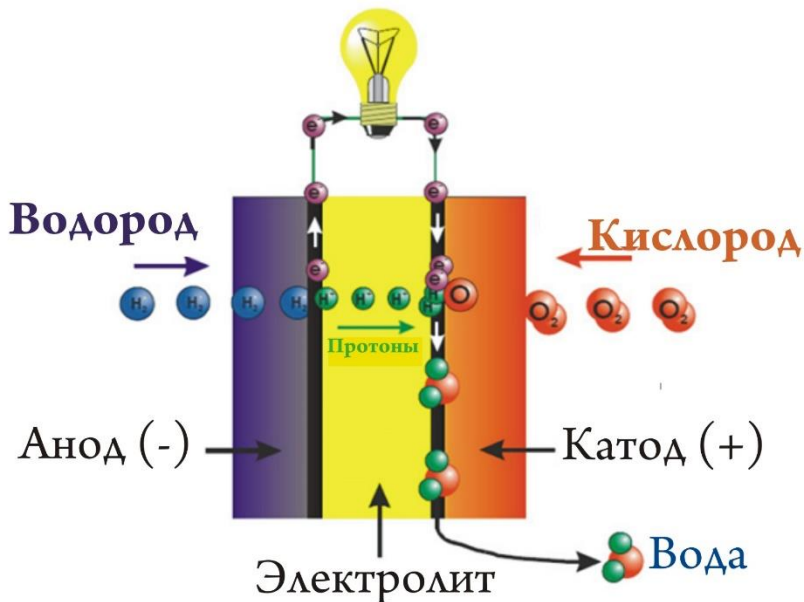
Применение водорода на транспорте



Водородная энергетика на транспорте развивается по двум основным направлениям:

➤ **Непосредственное сжигание водорода в модифицированных ДВС**, при этом в результате сгорания образуются водяной пар и **оксиды азота**, т.е. процесс не является абсолютно экологически чистым. Это делает проблемным такой способ применения водорода как топлива из-за существенно большей стоимости по сравнению с традиционной углеводородным топливом.

➤ **Совершенствование водородных топливных элементов**, принцип действия которых был открыт в 1839 году и в которых химическая энергия топлива преобразуется в электрическую без горения. Тем самым повышается КПД и надежность процесса преобразования энергии, а также достигается экологическая чистота.

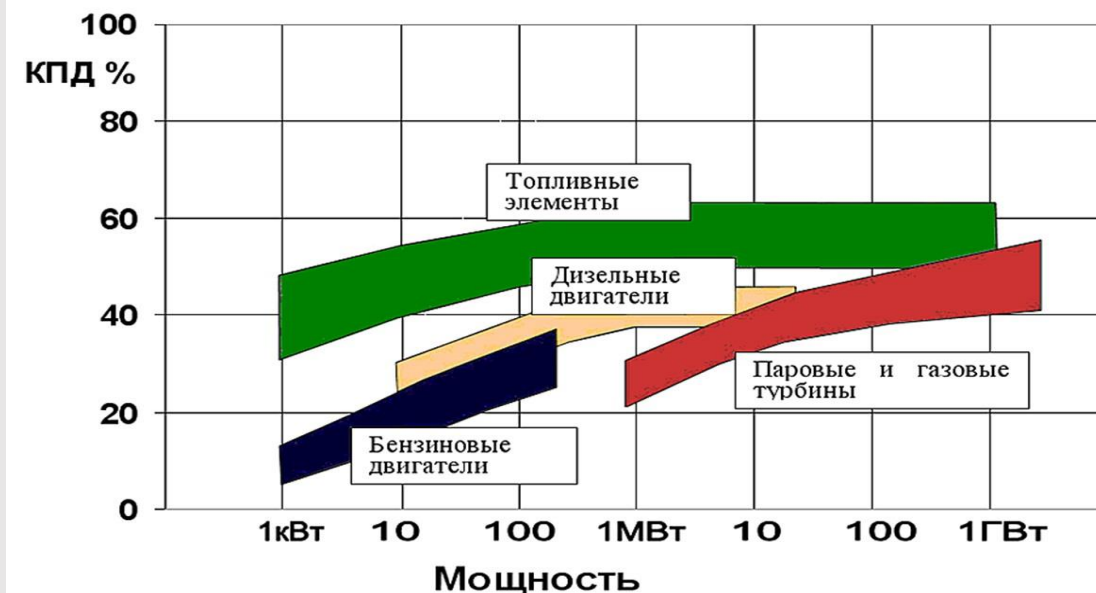
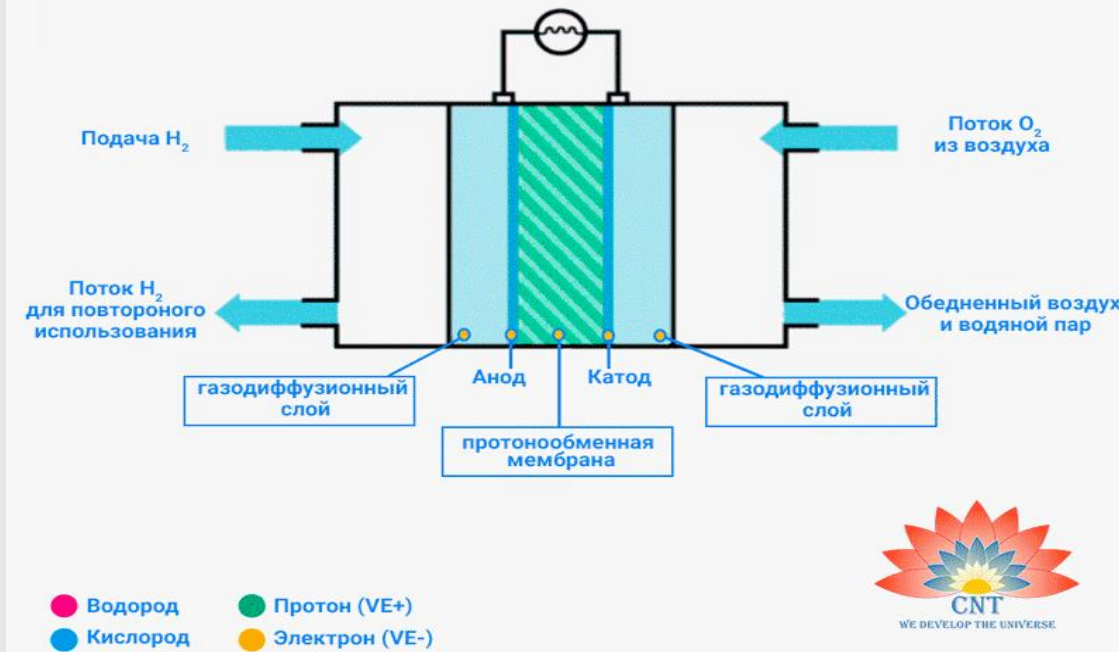


Принцип действия топливного элемента

Топливный элемент — электрохимическое устройство для получения энергии с внешней подачей вещества для проходящей в нем реакции. Имеют очень высокий коэффициент преобразования химической энергии в электрическую.

Конструкция любого топливного элемента состоит из двух газодиффузионных электродов - анода и катода, и находящегося между ними слоя электролита — среды, обеспечивающей перемещение ионов от одного электрода к другому и блокирующей движение электронов. Для того чтобы реакция протекала с более высокой скоростью, в электродах используют катализаторы.

В зависимости от типа топливного элемента, в качестве топлива могут использоваться газообразный водород, природный газ (метан), а также жидкое углеводородное топливо (например, метиловый спирт). В роли окислителя обычно выступает содержащийся в воздухе кислород, а некоторые типы топливных элементов могут работать только с чистым кислородом



Проект «Ту - 155»

Проект «Ту-155» — экспериментальный вариант Ту-154 для отработки двигателей с использованием криогенного топлива, где использовался один двигатель **НК-88, работающий на водороде (правый)** и два ТРДД НК-8-2. Топливный бак с экранированной теплоизоляцией, вмещающий 17,5 м³ сжиженного газа вместе с системой подачи топлива и системой поддержания давления, был размещён в хвостовой части фюзеляжа, в постоянно продуваемом воздухом (либо азотом) отсеке.

Первоначально в качестве топлива *использовался сжиженный водород (температура до -253 °C)*. Первый полёт был выполнен 15 апреля 1988 года. Всего было выполнено более ста полётов, из них *пять - на жидком водороде*. В 1989 году двигатель самолёта переоборудовали на сжиженный природный газ (температура -162 °C). Для обслуживания самолёта был разработан авиационный криогенный комплекс.



Проект «Энергия – Буран»



Проект «Энергия» — советская ракета-носитель сверхтяжёлого класса, разработанная НПО «Энергия». Самая мощная из советских ракет-носителей и одна из самых мощных в мире.

Ракета-носитель являлась составной частью советской многоразовой транспортной космической системы «Энергия — Буран» и могла использоваться автономно для доставки грузов больших масс и габаритов в околоземное пространство, на Луну, планеты Солнечной системы, а также для пилотируемых полётов.

Выполнена по двухступенчатой пакетной схеме с боковым расположением четырёх блоков первой ступени вокруг центрального блока второй ступени - первую ступень составляют четыре боковых блока с одним кислородно-керосиновым двигателем РД-170; **во второй ступени установлены 4 кислородно-водородных двигателя РД-0120.**

Полезная нагрузка устанавливается на боковой поверхности второй ступени. Конструктивными особенностями являются блочно - модульный принцип компоновки, позволяющий на основе блоков первой и второй ступеней создавать носители среднего и тяжёлого класса грузоподъёмностью от 10 до 200 т.

Содержание



- Водород, физико-химические и энергетические свойства
- Развитие водородной энергетики
- Получение водорода
- Хранение водорода
- Транспортировка водорода
- Применение водорода
- Экологическая и промышленная безопасность
- **Проекты НГК в области водородной энергетики**

ПАО «ГАЗПРОМ»



ПАО "Газпром" создает компанию **"Газпром водород"** (**Gazprom Hydrogen**) с целью реализации инновационных водородных проектов. ПАО "Газпром" озвучило инициативу по запуску крупного завода по производству водорода из метана в Германии, который мог бы быть заложен около выхода на берег обеих ниток газопроводов "Северный поток". Согласно оценкам компании, величина углеродного следа для производимого таким образом водорода будет в три раза ниже действующего в ЕС критерия.

Если Европа будет готова платить за утилизацию дополнительных объемов углекислого газа, ПАО "Газпром" готов прокачивать в реверсном режиме из Европы в Россию углекислый газ с целью его промышленного использования или захоронения, что может стать новой весомой статьей дохода. Проект пока что выглядит фантастично, но с технической точки зрения он вполне реалистичен.

ПАО «НОВАТЭК»

Выступая на «Конференции производителей и потребителей СПГ-2020» глава ПАО «НОВАТЭК» Л. Михельсон сообщил:

- водород - следующий шаг развития мировой энергетики, в ближайшие 30-40 лет он станет важным энергоносителем и займет свою долю в мировом энергобалансе;
- наиболее дешевый способ получения водорода - паровая конверсия природного газа, но появляются новые технологии его получения;
- производители сжиженного природного газа (СПГ) обладают необходимыми финансовыми, техническими и коммерческими компетенциями для того, чтобы развивать этот рынок;
- в настоящее время ПАО «НОВАТЭК» производит водород для собственных нужд, прорабатывает варианты организации производства на своих площадках водорода для перспективных рынков и приглашает партнеров к реализации совместных водородных проектов;
- одним из проектов в рамках климатической программы ПАО «НОВАТЭК» может стать захоронение CO₂ на Ямале. Аналогичный проект реализует «Equinor» совместно с партнерами «Shell» и «Total» на норвежском континентальном шельфе - в Северном море, поблизости от месторождения Troll.



Развитие водородной энергетики в России

Минэнерго РФ разработало «дорожную карту» «Развитие водородной энергетики в России» на 2020–2024 годы, которая легла в основу **Плана мероприятий, утвержденного постановлением Правительства РФ от 12.10.2020 (№ 2634-р).**

Россия планирует производить и экспортировать водород в соответствии с мировым трендом на постепенный отказ от углеводородной энергетики. Уже с 2021 года Правительство намерено формировать репутацию России как поставщика водорода, который является одной из альтернатив традиционным энергоносителям. План предусматривает реализацию следующих блоков проблем:

- I. Стратегическое развитие и мониторинг развития ВЭ.
- II. Мероприятия по стимулированию и государственное поддержке развития ВЭ.
- III. Формирование производственного потенциала.
- IV. Реализация приоритетных проектов в области ВЭ.
- V. Научно-техническое развитие и разработка высокотехнологичных решений.
- VI. Совершенствование нормативно-правовой базы и системы национальной стандартизации.
- VII. Развитие кадрового потенциала.
- VIII. Развитие международного сотрудничества.



Научно-исследовательские организации, участвующие в работах по водородной энергетике и топливным элементам РФ

1	Институт катализа им. Г.К.Борескова СО РАН	Твердо-оксидные ТЭ, катализаторы, топливные процессы - устройства риформинга углеводородных топлив	г. Новосибирск
2	Институт высокотемпературной электрохимии УО РАН	Высокотемпературные твердо-оксидные топливные элементы и устройства на их основе	г. Екатеринбург
3	Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН	Производство и очистка водорода	г. Москва
4	Институт металлофизики и функциональных материалов им. Г.В.Курдюмова РАН	Технология хранения водорода на базе металлогидридных систем и наноструктур (фуллеренов)	г. Москва
5	Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН	Технология получения многослойных пористых кремниевых мембран для ТЭ и кремниевых каталитических подложек для риформинга углеводородного топлива и получения водорода	г.Черноголовка, Московской обл.
6	Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН	Исследование и разработка опытно-промышленных образцов высокотемпературных ТЭ на основе конденсатных полимеров	г. Москва
7	Институт машиноведения УО РАН	Интегрированные системы получения, аккумулирования, хранения и снабжения водородом	г. Екатеринбург
8	ФГУП Уральский электрохимический комбинат	Электрохимические генераторы на базе щелочных и протон- обменных ТЭ	г. Новоуральск, Свердловской обл.
9	Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ экспериментальной физики (ФГУП РФЯЦ —ВНИИЭФ)	Энергетические установки на основе ТЭ с протон-обменными мембранами	г.Саров, Нижегородской обл.
10	Российский научный центр «Курчатовский институт»	Производство, аккумулирование, хранение и снабжение водородом, твёрдо-полимерные ТЭ	г. Москва
11	Государственный научный центр РФ "Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского"	Твердо-оксидные ТЭ и энергетические устройства на их основе	г. Обнинск
12	ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева»	Энергетические устройства на базе ТЭ для автотранспорта и бытовых нужд	г. Королев, Московской обл.
13	ОАО «Специальное конструкторское бюро котлостроения»	Энергетические устройства на базе ТЭ	г. Санкт- Петербург

□ Всероссийская конференция
«Водород. Технологии. Будущее»
Технологическая водородная долина.
23-24 декабря 2020 года

<https://portal.tpu.ru/htf/proceedings>

□ Rohstoff-Forum
Российско-Германский сырьевой форум

<https://www.rohstoff-forum.org/ru/wasserstoff-tagung/#1578768714914-06181220-3ba9687b-ff9f>

Перспективы развития водородной энергетики в России

Водород производится в России в промышленных масштабах, но используется он в основном в нефтепереработке, металлургии и химии.

Минэнерго РФ оценивает **мировой рынок водородного топлива к 2040 г. в \$32–164 млрд.**

В России водородная энергетика сформируется **к 2025–2035 гг., для этого потребуются инвестиции в \$2,2–3,9 млрд., но это может принести доход по \$1,7–3,1 млрд. в год.**

Производить водород можно на недозагруженных ГЭС на юго-востоке страны, а также Ленинградской и Кольской АЭС. Инвестиции в установку генераторов водорода оцениваются в 55 млрд руб. С площадок на юго-востоке России можно будет отгружать партии водорода в страны АТР, а с Ленинградской и Кольской АЭС – в Европу.

Конкурентные преимущества России – наличие резервов энергетических мощностей, близость к потенциальным потребителям (страны ЕС, КНР, Япония), а также наличие действующей инфраструктуры транспортировки.



Заключение

- Основными целями **«водородной энергетики»** являются *снижение экологически вредных выбросов и переход к возобновляемой энергетике*, однако доминирующие в настоящий момент технологии производства водорода из органического топлива не позволяют «водородную энергетику» относить к разряду экологически чистой и возобновляемой энергетики.
- **«Водородная энергетика»** призвана решить проблему повышения энергетической эффективности, так как тепловая энергетика, основанная на сжигании органического топлива, имеет низкую эффективность. Основным преобразователем энергии водорода в электроэнергию малой мощности являются топливные элементы, КПД которых достигает 40-50% для низкотемпературных топливных элементов и 50-60% для высокотемпературных оксидных топливных элементов (в сочетании с турбинами на выхлопном газе - до 90%).
- В высокотехнологических отраслях как авиация, космос, судостроение, атомная энергетика элементы **«водородной энергетики»** используются повсеместно, что позволяет надеяться на то, что технологические решения будут использоваться и в дальнейшем, если не произойдет технологического прорыва в разработке других видов энергии.
- На современном этапе **«водородная энергетика»** находится на стадии интенсивных научно-технологических исследований, которые ведутся во всех развитых странах, однако промышленно востребованных результатов пока мало.

Спасибо за внимание!
Вопросы?

vbessel@nt-serv.com