



**Казахский Национальный Исследовательский Технический
университет имени К. И. Сатпаева**

РНУ2782 - Современные проблемы наук о материалах и процессах

14-Лекция
**Перспективные направления производства и хранения
водорода: материалы и процессы**

7M07103 - Материаловедение и технология новых материалов

5 (1/0/2/2) кредитов

Семестр: 1, осень, 2025-2026 учебный год

Лектор – Керимкулова Алмагуль Рыскуловна

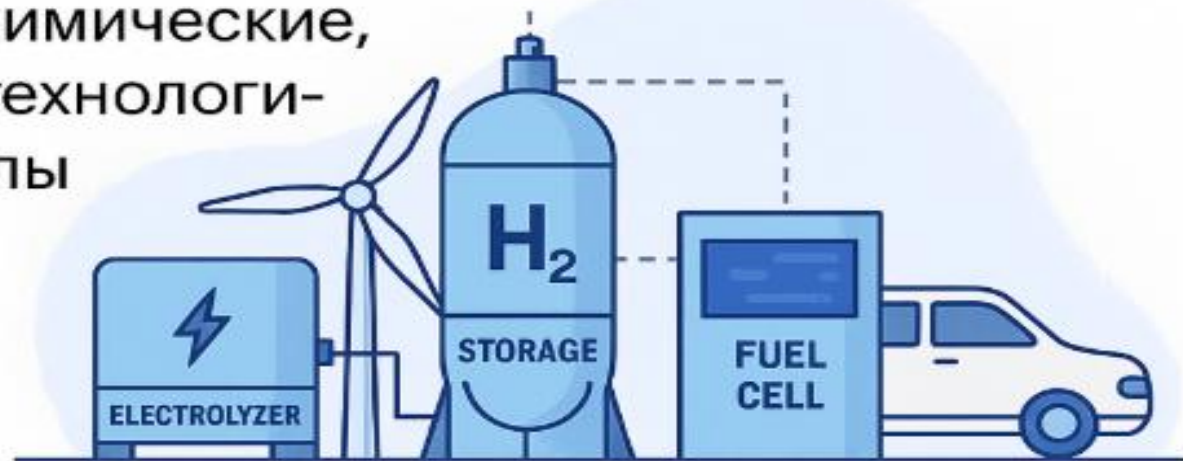
Содержание

- 1) Водород
- 2) История и перспективы
- 3) Применение водорода
- 4) Физико-химические свойства водорода
- 5) Классификация водорода по методам получения
- 6) Хранение водорода
- 7) Литературы

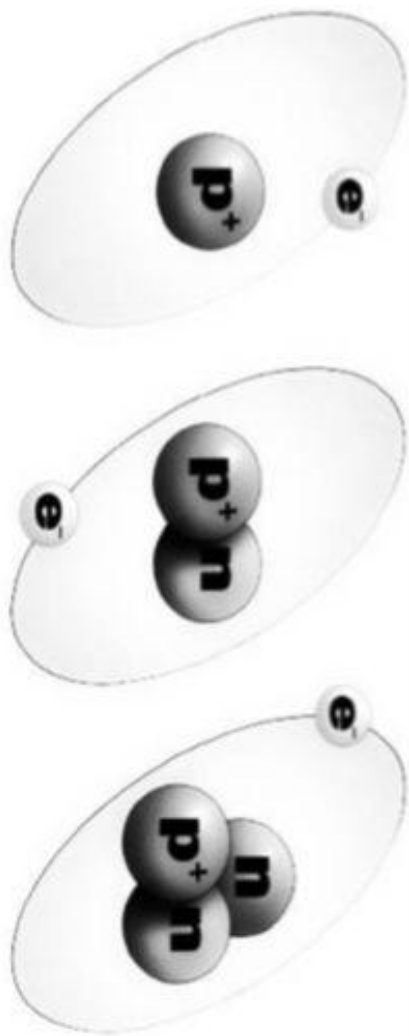


Цель

- Рассмотреть современные направления развития технологий, хранения и использования водорода как экологически чистого энергоносителя.
- Изучить физико-химические свойства водорода, определяющие его поведение в различных процессах и средах
- Проанализировать методы получения водорода: электролитические, термохимические, фотокаталитические и биотехнологические
- Охарактеризовать материалы для хранения водорода, включая металлидrides, наноструктурированные сорбенты и композитные системы



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.

Водород: история и перспективы

- **Генри КАВЕНДИШ (1731 г. –1810)** Показал, что существуют разные типы воздуха «негорючий воздух» - CO_2 и «горючий воздух» - водород. Кавендиш получал водород в реакции цинка с хлорной кислотой. Показал, что водород намного легче воздуха, первый получил воду из водорода и кислорода в электрической искре (1775).
- **Жак Александр Чарльз** 1783 Первый воздушный шарик, наполненный водородом, «Чарльер» поднялся на высоту 3 км
- **1800 – 1950** «городской газ» 50% H_2 + 30% CH_4 + 6% CO широко использовался для освещения улиц и энергоснабжения
- **В 1960-х** годах вытеснен природным газом.
- **1890-е Константин Циолковский** предложил использовать водород как топливо для космических кораблей



- **1911 – Карл Бош (Bosch)** разработал процесс получения NH_3 и аммиачных удобрений, организовал производство синтетических удобрений.

- 1950 Акира Митсуи – производство водорода с помощью микроорганизмов
- 1959 Френсис Бэкон – первый практический водородно – воздушный топливный элемент мощностью 5 кВт для питания сварочного аппарата.
- 1960-е Предложено использовать солнечную энергию для разложения воды с последующим использованием водорода и кислорода в ТЭ
- В течении 20-го века использование водорода расширялось: производство аммиака, метанола, удобрений, стекла, очистки металлов, витаминов, косметики, полупроводников, мыла, арахисового масла и ракетного топлива.
- Начало 1970-х – появился термин «водородная экономика»
- Конец 20-го – начало 21 века: быстрое увеличение производства водорода, разработка водородных автомобилей, ТЭ. Исландия заявила, что к 2030 г. Перейдет к водородной экономике.
- 1990 – первая в мире установка по производству водорода с помощью солнечной энергии
- 1994 Даймлер Бенц – первый NECA I (New Electric CAR) – первый автомобиль с ТЭ
- 1999 – первые в Европе станции заправки водородом (Гамбург)
- 2000 Ballard Power systems - первый готовый к производству ТЭ для автомобилей
- 2004 – первая подводная лодка на ТЭ.

Применение водорода



Водород использовался для воздушных полетов до 1937г, когда в воздухе сгорел крупнейший в мире нем. дирижабль «Гинденбург»



Водород-топливо будущего



50% водорода используется для получения аммиака, идущего на производство азотной кислоты, удобрений, красителей, взрывчатых веществ



Водород используют для получения маргарина из жидких растительных масел



Водород служит для удаления соединений серы из нефти и нефтепродуктов



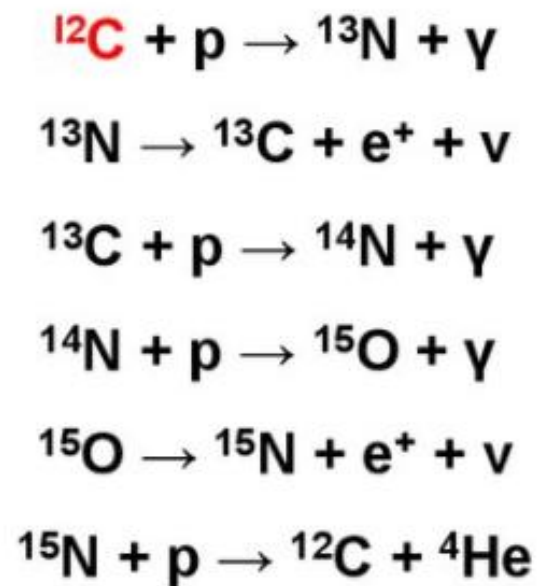
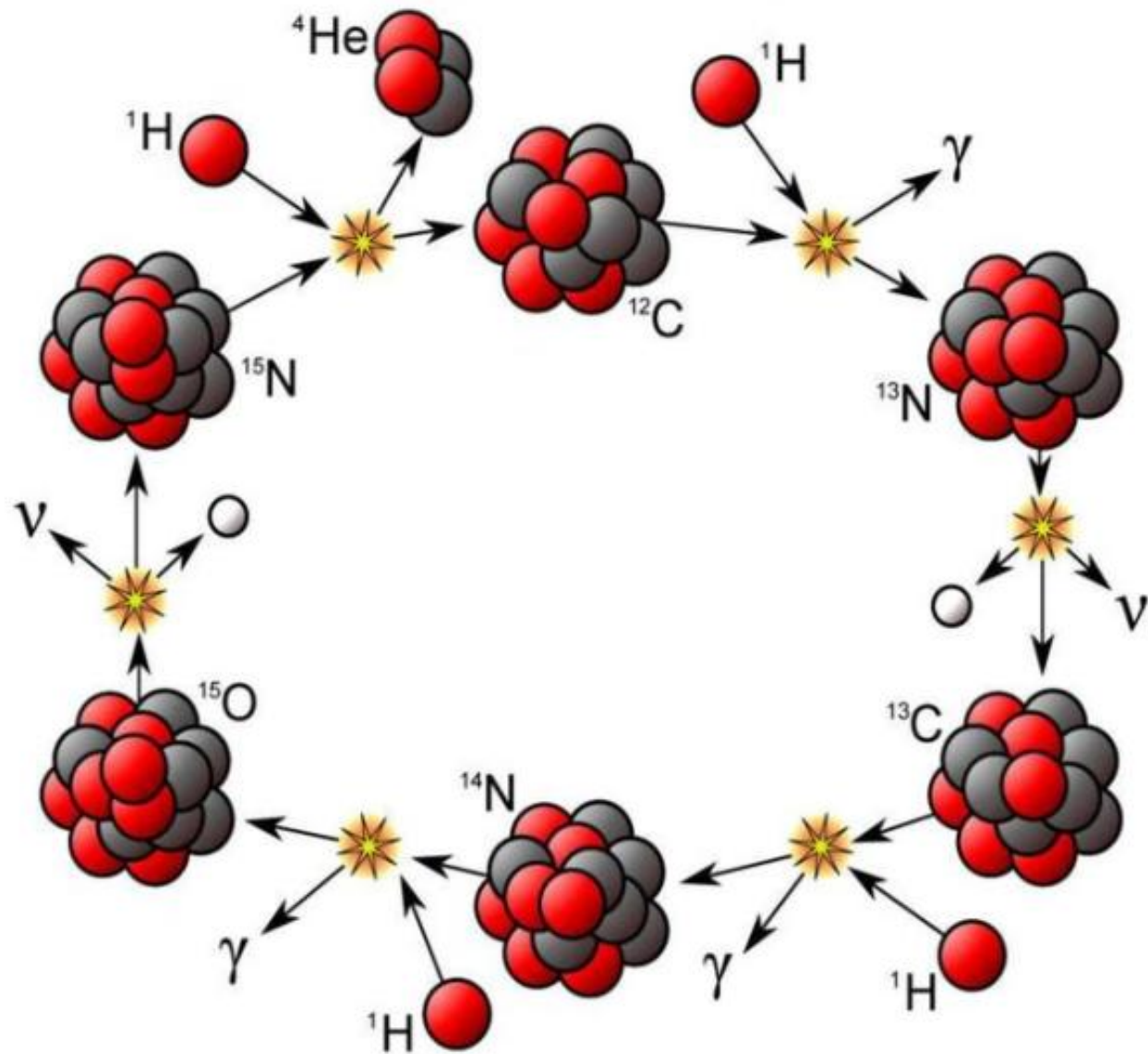
Водородную горелку используют для резки и сварки металлов



Водород служит горючим в жидком ракетном топливе (окислитель - кислород)

Одна из важнейших задач водорода -

Углеродный цикл водорода на Солнце

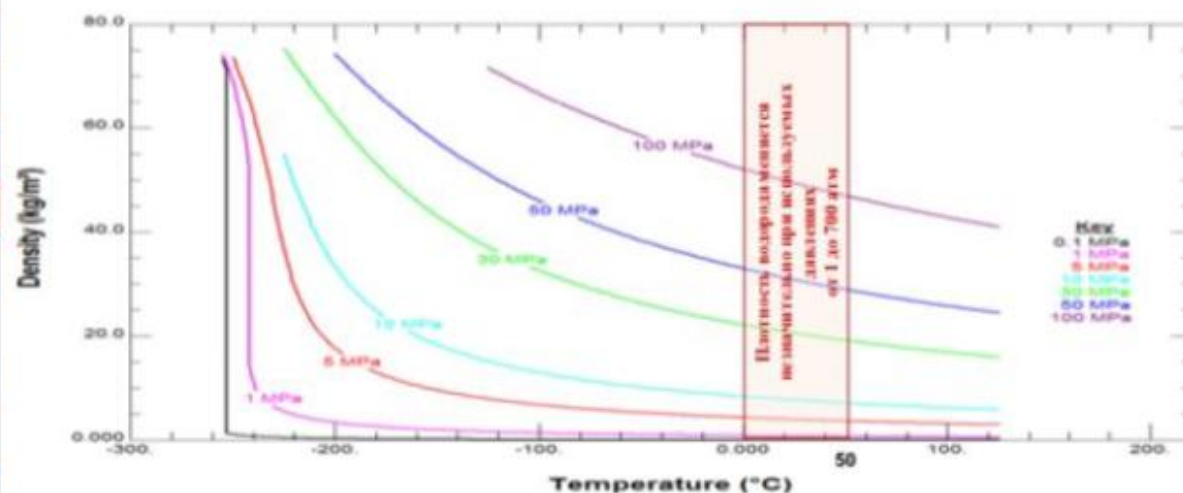
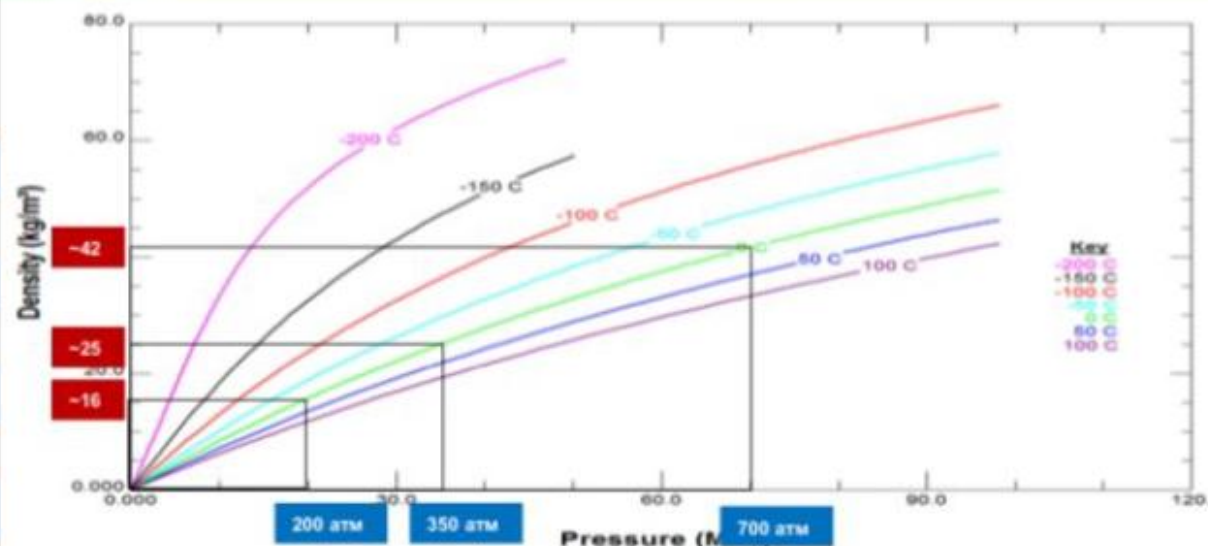


Физико-химические свойства водорода

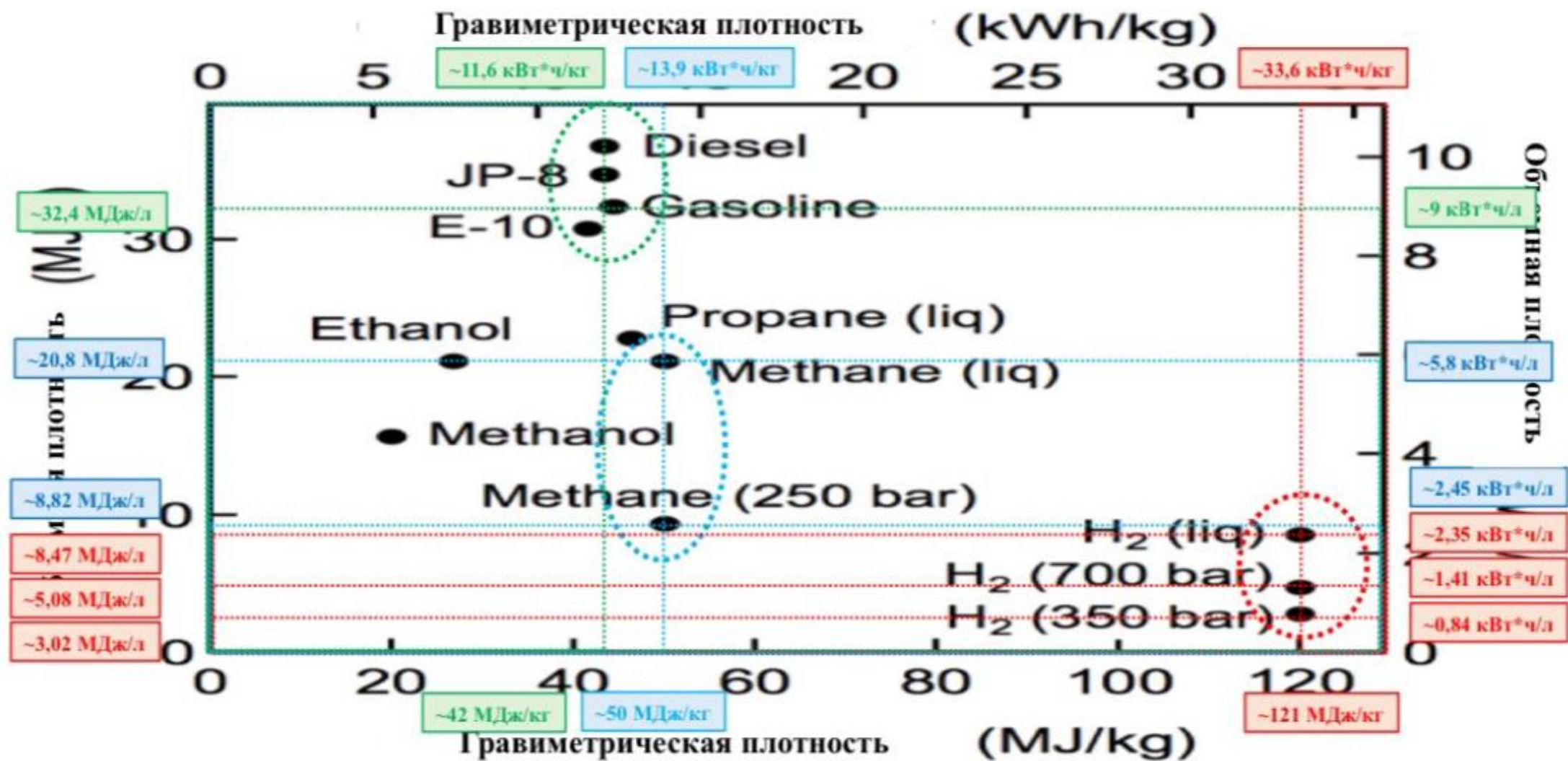
- **Водород** – газ, состоящий из двухатомных молекул с **молярной массой – 2,016 г/моль**, без цвета, без запаха, мало растворим в воде, самый легкий из газов - в 14,5 раз легче воздуха, в 7,8 раз легче метана.
- Температура **сжижения** водорода **-253°C (20°K)**, **кристаллизации** водорода **-259°C (14°K)**.
- Благодаря ничтожному размеру, молекулы водорода могут **диффундировать через резину, стекло и даже через металлы**.
- Температура пламени смеси **«водород-воздух» – 2300°K**, в то время как смеси «бензин-воздух» - 1600-1700°K, «метан-воздух» - 1970°K, «пропан-бутан-воздух» - 2200°K.
- 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**.

Зависимость плотности водорода (кг/м³) от давления (МПа) и температуры (°C)

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



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 CO_2 отсутствуют.

«Желтый (оранжевый) водород» – как и зеленый получают путем электролиза, однако источником энергии являются атомные электростанции, выбросы CO_2 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.

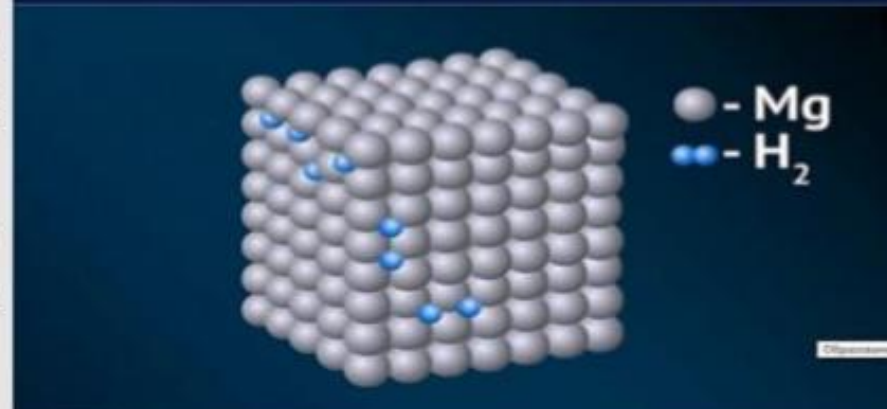
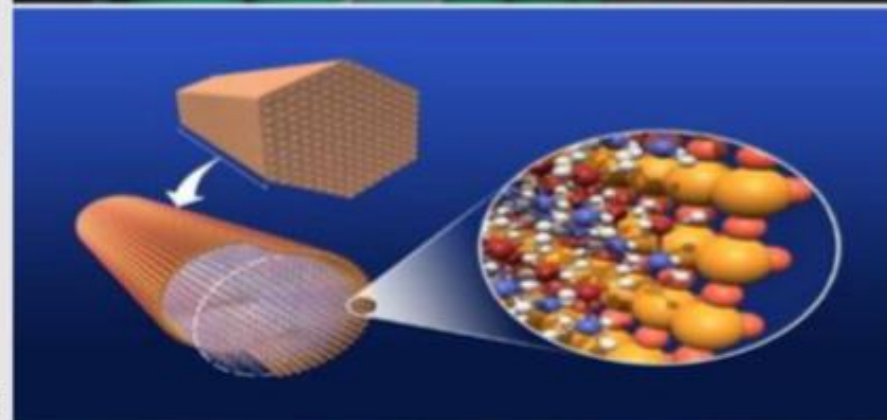
«Коричневый (бурый) водород» - получают с помощью газификации бурого угля, в результате чего образуется синтез-газ - смесь углекислого газа (CO_2), монооксида углерода (CO), водорода, метана и этилена. Очень неэкологичный процесс по сравнению с другими методами.

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.

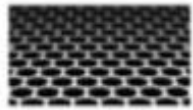
Способы хранения водорода можно разделить на:

- **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).



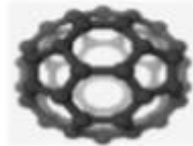
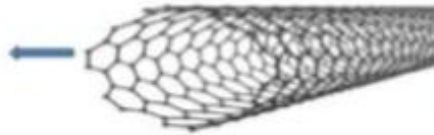
Хранение водорода с помощью наноматериалов

Наноструктуры



→ Графен

Углеродные
нанотрубки



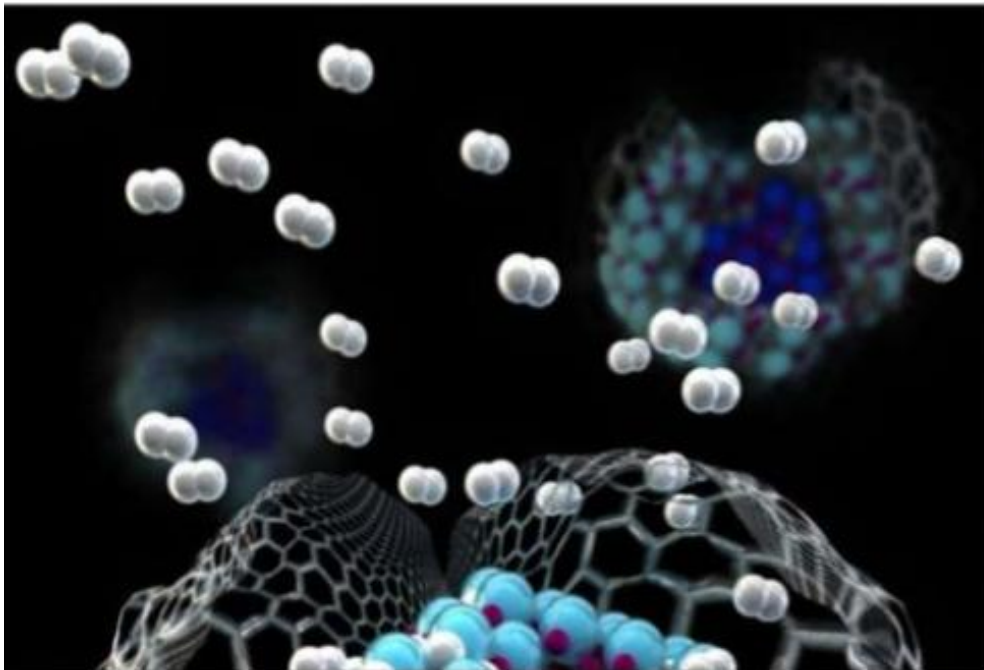
→ Фуллерены

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.



Список литературы

1. S. A. Haque, M. S. Haque, “The current status of hydrogen energy: an overview”, PMC Open Access, 2023.
2. M. El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, «Hydrogen Production Technologies Overview», Journal of Power and Energy Engineering, Vol. 7, 2019.
3. R. Kourougianni, A. Arsalis және басқалар, «A comprehensive review of green hydrogen energy systems (GHES)», 2024.
4. H. Li, X. Yang және басқалар, «Recent Developments in Materials for Physical Hydrogen Storage», Frontiers / PMC, 2024.
5. A. Author (және басқалар), «A review on metal hydride materials for hydrogen storage», Elsevier, 2023.
6. H. Wang (және басқалар), «Green Hydrogen for Energy Transition: A Critical Perspective», MDPI Energies, 2023.
7. I. Kim (және басқалар), «Hydrogen Energy in Electrical Power Systems: A Review and Future Perspectives», MDPI, 2023.