

H_2 технологии в энергетике и не только: ВЫЗОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ



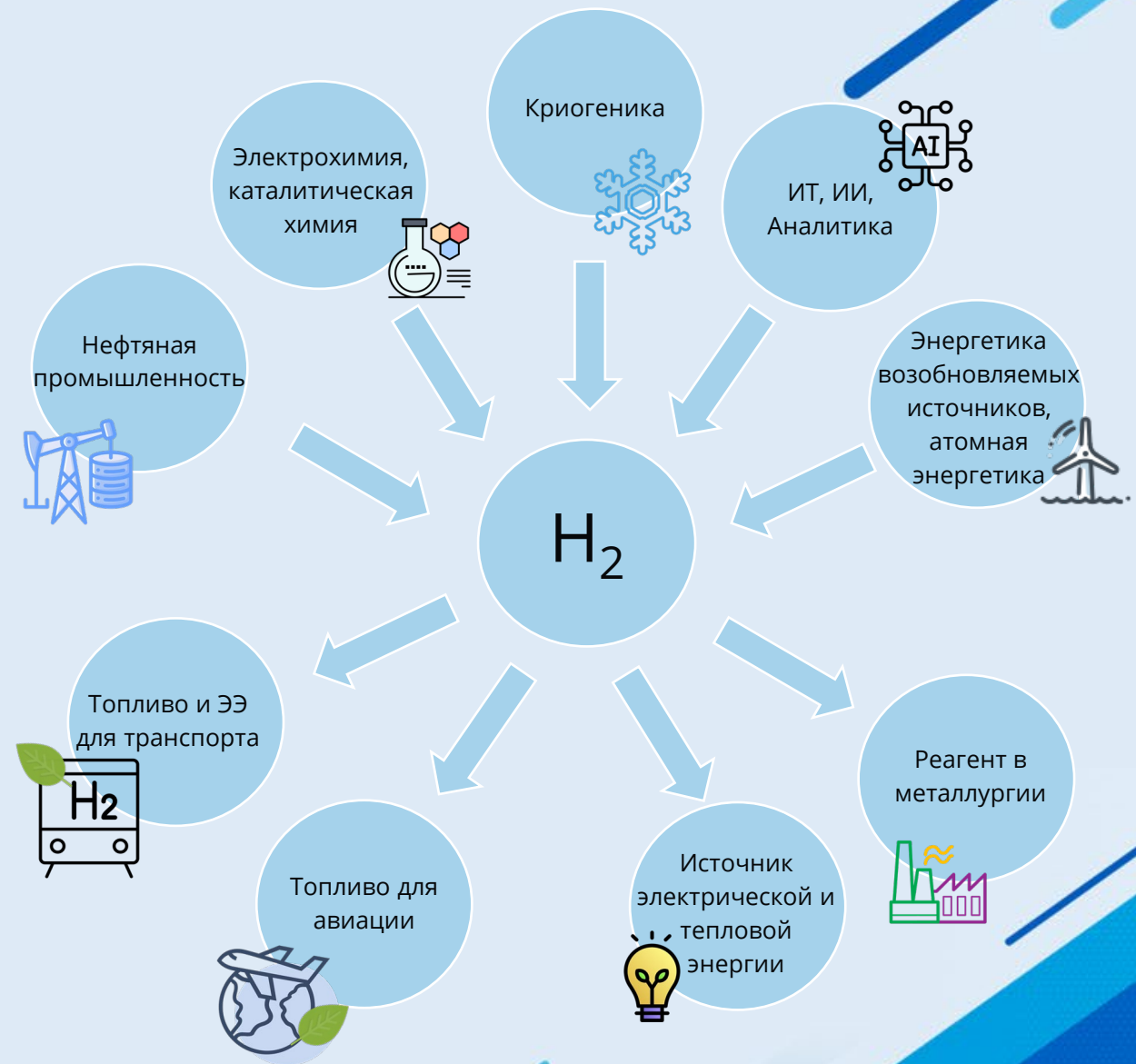
2024
Инженеры
будущего

Александр Кротов, МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.



Водород – энергоноситель будущего

- позволяет накопить и сохранить энергию в компактном виде
- является одновременно и ценным химическим реагентом
- может использоваться в качестве топлива на всех видах транспорта



История водородной энергетики

1920-1930 гг. Промышленное производство водородно-щелочных электролизеров в Канаде на основе энергии ГЭС.

1920-1940 гг. Адаптация ДВС на нетрадиционные топлива, в т.ч. водород (Германия, Великобритания). Доказано увеличение мощности двигателя на 10 %.

Военные годы 1941-1945 гг.:

- Переоборудование грузового транспорта в блокадном Ленинграде на водородное топливо из отработавших ресурсов аэростатов войск ПВО (руководство Б.И. Шелища)
- Разработки в области переоборудования подводных лодок на сжатый водород и кислород, получаемые методом электролиза
- Страны отрезанные от поставок нефти в эти годы также временно переходили на водородное топливо. Дешевизна нефти и возобновление поставок не дала дальнейшего развития.

Энергетический кризис 1970 гг. – новый виток водородной энергетики.

1974 гг. создание Международной ассоциации по водородной энергетике (IAHE)

1970-1990 гг. – углубленные исследования, переход к коммерциализации:

- Развитие в областях тепловых двигателей и энергоустановок.
- Активное применение водорода как авиационного и космического топлива (Space Shuttle, Буран-Энергия)
- Всесоюзная Комиссия по водородной энергетике, созданная по инициативе академика В. А. Легасова

1988 г. – испытание ТУ-155 на водороде.



Заправка отработанным водородом из аэростатов



Государственная стратегия

Концепция развития водородной энергетики в РФ

Утв. Распоряжением Правительства РФ от 05.08.21 №2162-р
Куратор: Председатель Правительства РФ М. Мишустин

Стратегические инициативы:

Создание и развитие водородных промышленных и технологических кластеров;
Поддержка применения водородных технологий на внутреннем рынке;
Производство и внедрение в различные сектора экономики РФ промышленной продукции для водородной энергетики, в т.ч. установок производства водорода и энергетических смесей на его основе, систем хранения, сжижения и транспортировки, топливных элементов, газовых турбин, заправочных станций, транспорта и робототехники.

Водородные кластеры для экспортно-ориентированного производства и поставок на внутренний рынок РФ:

- Северо-западный
- Восточный
- Арктический
- Южный *

Развитие водородной энергетики в 3 этапа:

I этап (2021-2014 гг.) Пилотные проекты и реализация кластеров (Экспорт водорода в 2024 году 0,2 млн. тонн)

II этап (2025-2035 гг.) Запуск коммерческих проектов производства водорода с достижением объема экспорта от 2 млн. тонн до 12 млн. тонн к 2025 г.

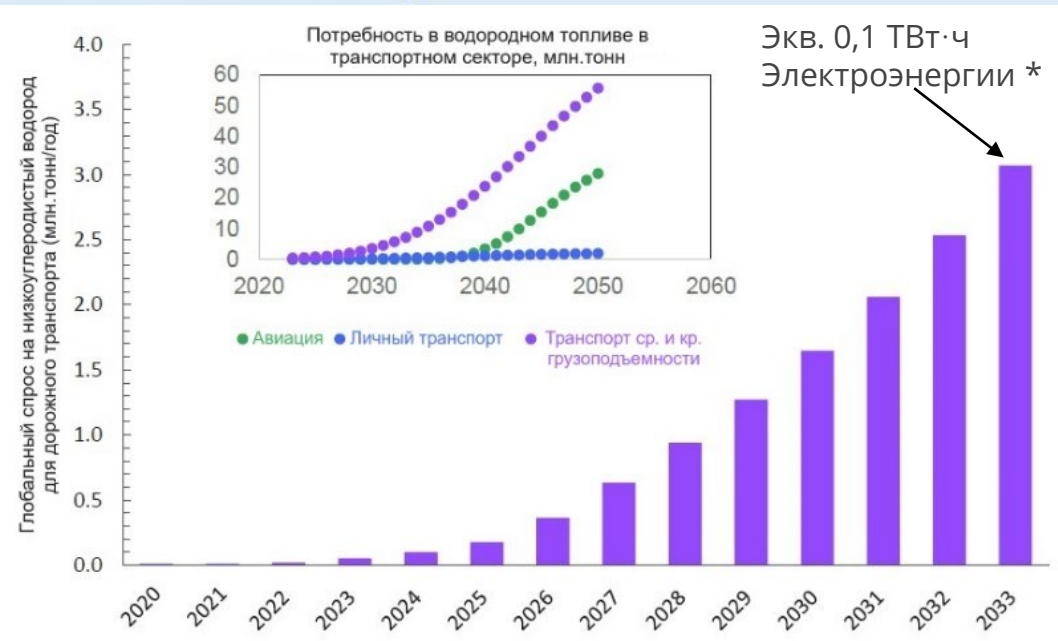
III этап (2036-2050 гг.) Широкомасштабное развитие мирового рынка водородной энергетики. Экспорт от 15 до 50 млн. тонн к 2050 г. Приближение стоимости водорода из ВИЭ к стоимости из ископаемого сырья

* Может быть создан дополнительно



Государственная стратегия

* 1 ТВт·ч = 10^{12} Вт·ч



Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в РФ на период до 2030 г.

Утв. Распоряжением Правительства РФ от 23.08.21 №2290-р
Куратор: Председатель Правительства РФ М. Мишустин

Целевые показатели:

2-й этап (2025-2030 гг.): запуск производства ячеек и тяговых аккумуляторов батарей, катодных и анодных материалов; запуск в эксплуатацию не менее 1000 водородных заправок;

Климатическая доктрина РФ

Утв. Указом президента РФ от 26.10.23 №812
Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.
«Предполагается достижение не позднее 2060 года баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением»

Определены доп. меры по декарбонизации отраслей экономики

План мероприятий по реализации Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года

Утв. Распоряжением Правительства РФ от 01.06.21 №1447-р,
Куратор: Председатель Правительства РФ М. Мишустин

Мероприятия по обеспечению создания опытных полигонов низкоуглеродного производства водорода на объектах переработки углеводородного сырья или объектах добычи природного газа;

Сертификация ЭЭ, выработанной на низкоуглеродных источниках;

Экспорт водорода в 2024 году 0,2 млн. тонн.

Прогноз потребления H₂:

- Потребление водорода в 2022 году составило 95 млн. тонн, что эквивалентно 3,163 ТВт·ч энергии (общее мировое потребление энергии в 2022 г. составило 25,5 ТВт · ч)
- Большая часть произведенного водорода была использована непосредственно на месте производства и не связана с декарбонизацией.
- К 2030 г. прирост производства и потребления водорода будет обеспечен новыми отраслями, в которых водород используется для декарбонизации.

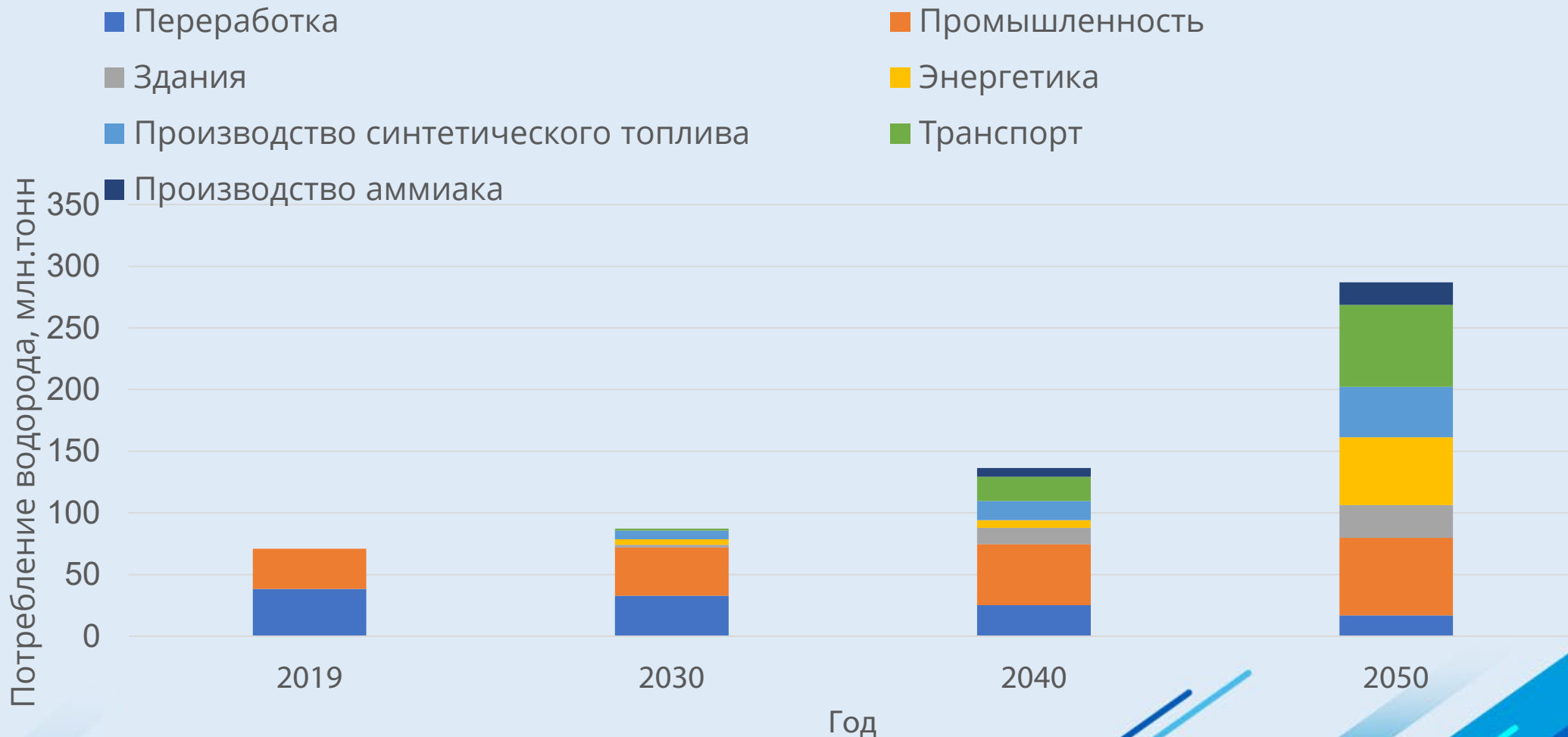


Ист. Global Hydrogen Review 2023



Водород может использоваться для декарбонизации в следующих отраслях:

- Промышленность (металлургическая / химическая);
- Энергетика (как накопитель энергии);
- Транспорт (как топливо для PEM топливных элементов)





Терминология



Газообразный водород (от англ. gaseous - газообразный)



Жидкий водород (от англ. liquid - жидкий)

Электролиз

Процесс выделения на электродах составных частей растворенных веществ в результате реакций при прохождении электрического тока

Энергетическая емкость

Количество теплоты, выделившейся при полном сгорании единицы массы или объема топлива и замеренной при постоянных давлении и температуре

Энергоноситель

ресурс, который может быть источником энергии, которую в последствии можно преобразовать в различные формы механической, тепловой и пр. энергий

Газгольдер

Резервуар для хранения газообразных веществ

Гидрид

Соединение водорода с металлами

Декарбонизация

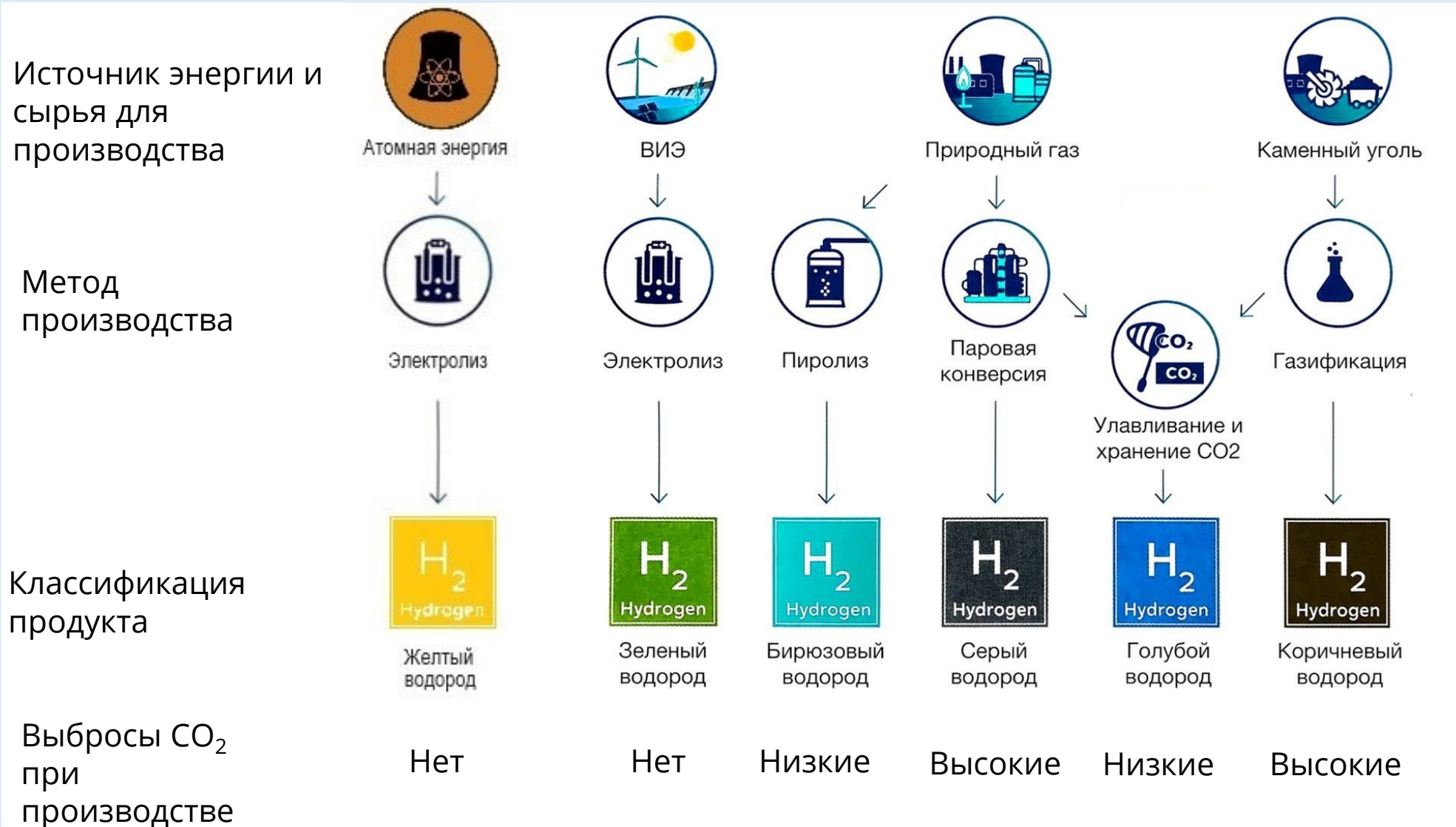
Комплекс мероприятий по снижению углеродного следа от большинства промышленных операций

Топливный элемент/ячейка

Устройство эффективной выработки постоянного тока и тепла из топлива путем электрохимической реакции



Введена классификация способов производства H_2 в связи с оценкой количества выбросов CO_2 в атмосферу при производстве



В РФ благодаря наличию ресурсов возможно производить все виды водорода. Однако целевой мировой показатель – выбросы CO_2 . Поэтому спросом пользуются зеленый, желтый, бирюзовый, голубой водород

Углеродный след H₂ и основы сертификации



ПГ + CCUS

Low-C, безуглеродный или голубой H₂

H₂ из углеводородов с CCS и электролизный H₂ с использованием электричества со значительно сниженным углеродным следом.



ВИЭ и биометан

Зеленый H₂

H₂, произведенный электролизом с использованием электроэнергии, получаемой из возобновляемых источников (включая биометан).



Зеленый H₂ = Из ВИЭ

- Количество H₂ пропорционально мощности ВИЭ.
- CO₂ FP зависит от эффективности ВИЭ и технологий генерации



Low Carbon = CO₂ FP < 60% От ПКМ бенчмарк(*)= 4.37 кгCO₂ / кгH₂ (-60%)

Критерий соответствия завода производству экологически чистого или низкоуглеродистого H₂: среднее мировое производство ниже эталонного уровня

Маршруты генерации H₂

Углеродный след кгCO_{2экв}/кгH₂

ПГ без CCUS	+11
ПГ с CCUS	+3
Биометан без CCUS	+2
Биометан с CCUS	-5
Mix Франция 2020	3.6
ВИЭ (ветер) Франция	0.9
АЭС Франция	0.4
ВИЭ (солнечные панели) Франция	3.3
Mix Германия	27.7
Mix ЕС 2027	25.2

***Бенчмарк: 10.92 кгCO₂/кгH₂**

Прямые выбросы: 8.85 кгCO₂/кгH₂

Косвенные выбросы (апстрим ПГ): 2.07 кгCO₂/кгH₂

Стоимость водорода

Требуется снизить стоимость производства водорода, чтобы обеспечить конкурентоспособность с традиционными источниками энергии.

Электроэнергия для производства H_2 составляет наибольшую долю в стоимости продукта.

Технология	CAPEX 2022, USD/кВт _{H2}	CAPEX 2030, USD/кВт _{H2} (стратегия)	ОРЕХ годовой	Стоимость \$/кгH ₂
Электролиз воды	1640	610	3%	6-8
Риформинг метана	730	720	5%	2-6
Риформинг метана с улавливанием CO ₂	1440	1420	4%	4-8
Газификация угля	2680	2640	5%	2-3
Газификация угля с улавливанием CO ₂	2790	2750	5%	4-5

Ист. Linde

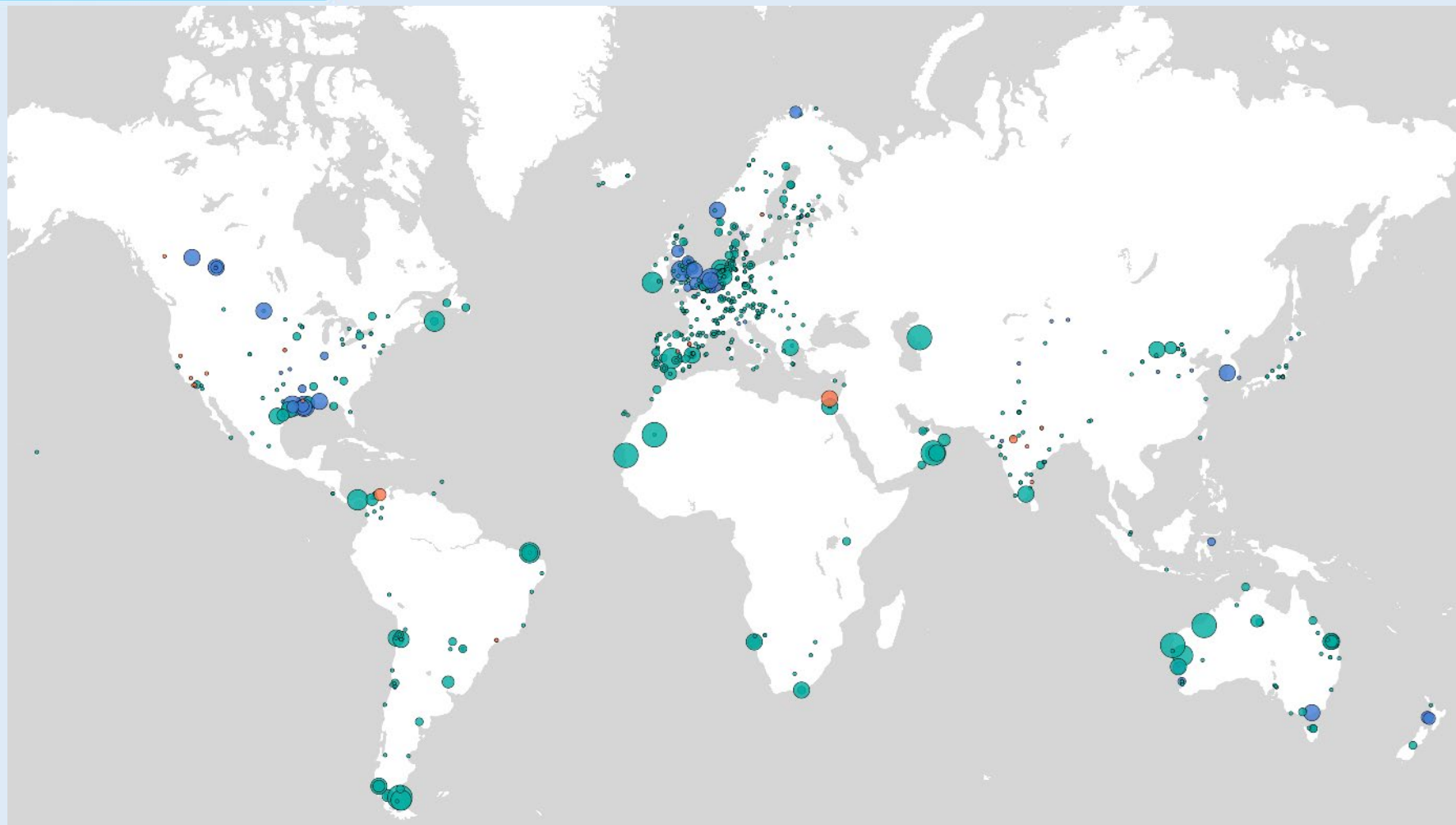
Из чего складывается
стоимость конечного продукта?

Этап	Суммарная стоимость
Производство + конверсия	40%
Транспортировка	20%
Потребление	40%

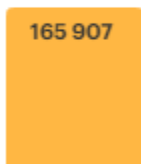
Развитие водородной
инфраструктуры
предполагает цепочку
взаимных
преобразований
энергия-водород



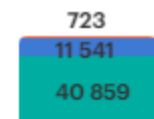
Мировой опыт: Производство «зеленого водорода» в электролизерах локализовано вблизи источников ВИЭ.
Организовано потребление водорода вблизи производств.



Данные по **1894**
проектам

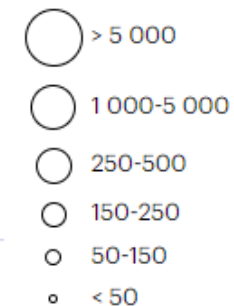


Суммарная мощность
электролизеров (МВт)
до 2030 года



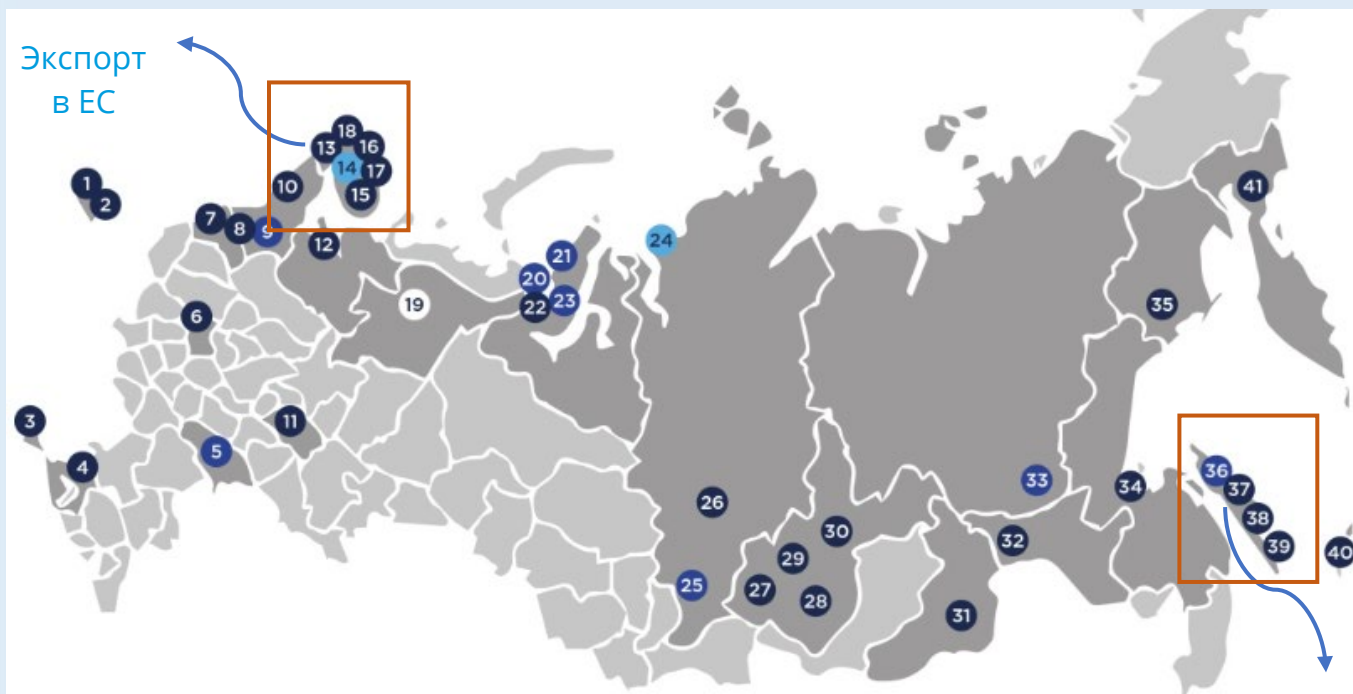
Производительность
низкоуглеродного
водорода к 2030 году
(кН₂/год)

Проектная мощность (кТ
Н₂/год)



Производство в РФ

Атлас российских проектов по производству низкоуглеродного и безуглеродного водорода и аммиака, ист. Минпромторг



Локализация производств по принципу кластеров:

Восточный водородный кластер на Сахалине.

Северо-Западный кластер на базе Кольской АЭС.

Разработка собственных технологий производства, ожижения, использования в качестве источника энергии.

Инфраструктура в настоящий момент отсутствует.

Использование атомной энергии в качестве источника энергии для электролизера.

Способы хранения водорода

Физические (GH_2 , LH_2)

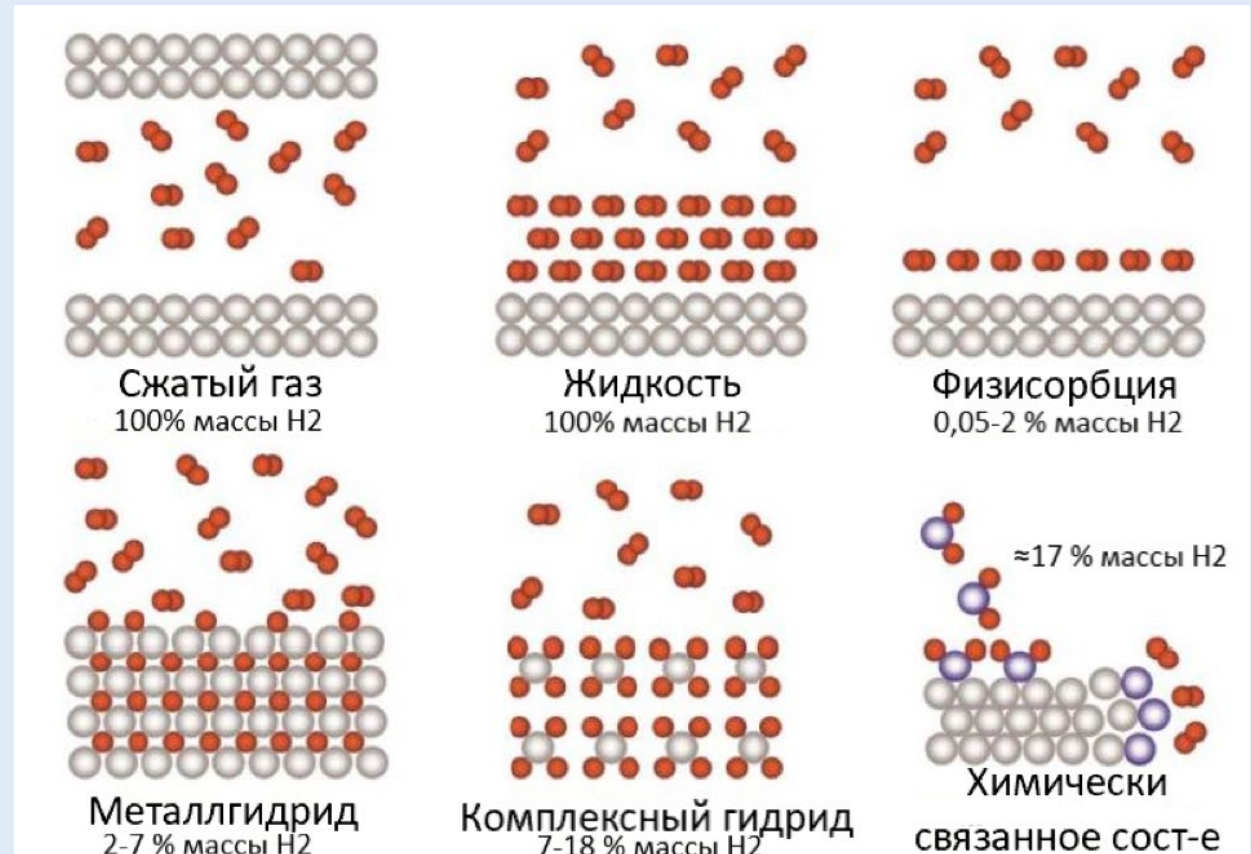
Молекулярный H_2 : отсутствие взаимодействия с материалом хранения

Физико-химические (Физисорбция)

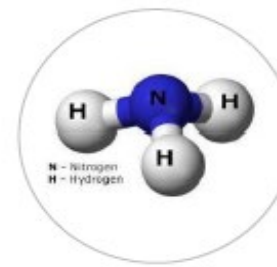
Связанная молекула H_2 : слабое взаимодействие с материалом хранения

Химические (Металлический или комплексный гидрид, химически связанное состояние)

Атомарный H_2 : сильное взаимодействие с материалом хранения



Способы транспортировки H₂



	Трейлер газообразного водорода	Трейлер сжиженного водорода	Газовый трубопровод	Аммиак (хранение в связанном виде)	Танкер сжиженного водорода
Кап. затраты	Низкий	Средний	Высокий	Высокий	Средний
Экспл. затраты	Высокий	Средний	Низкий	Высокий	Средний
Стоимость транспортировки на 1 кг	Высокий	Низкий	Низкий	Низкий	Средний
Расстояния	160 км	800 км	1600 км	>1600 км	>1600 км
Возможный масштаб	1..10 т/сутки	10..500 т/сутки	100+ т/сутки	100+ т/сутки	100+ т/сутки



Инженеры
будущего

Водородный транспорт





Аспекты применения водорода в транспорте секторе

Преимущества

- ✓ Возобновляемое топливо
- ✓ Сокращение выбросов в окружающую среду
- ✓ Снижение затрат на обслуживание по сравнению с ДВС
- ✓ Уменьшение уровня шума
- ✓ Уменьшение массы транспортного средства

Проблемы при внедрении технологии

- × Заправочная инфраструктура
- × Эффективный метод получения и транспортировки жидкого водорода
- × Система хранения и подачи криогенного топлива
- × Новые требования летной безопасности
- × Загрязнение мембран топливных элементов
- × Потенциальная взрывоопасность

Применение водорода в автотранспорте

- Легковые авто на топливных элементах (ТЭ) и газообразном водороде
- Крупнотоннажные грузовики с возможностью использования водородных генераторов
- Общественный транспорт и среднетоннажные грузовики с ТЭ и баками жидкого водорода

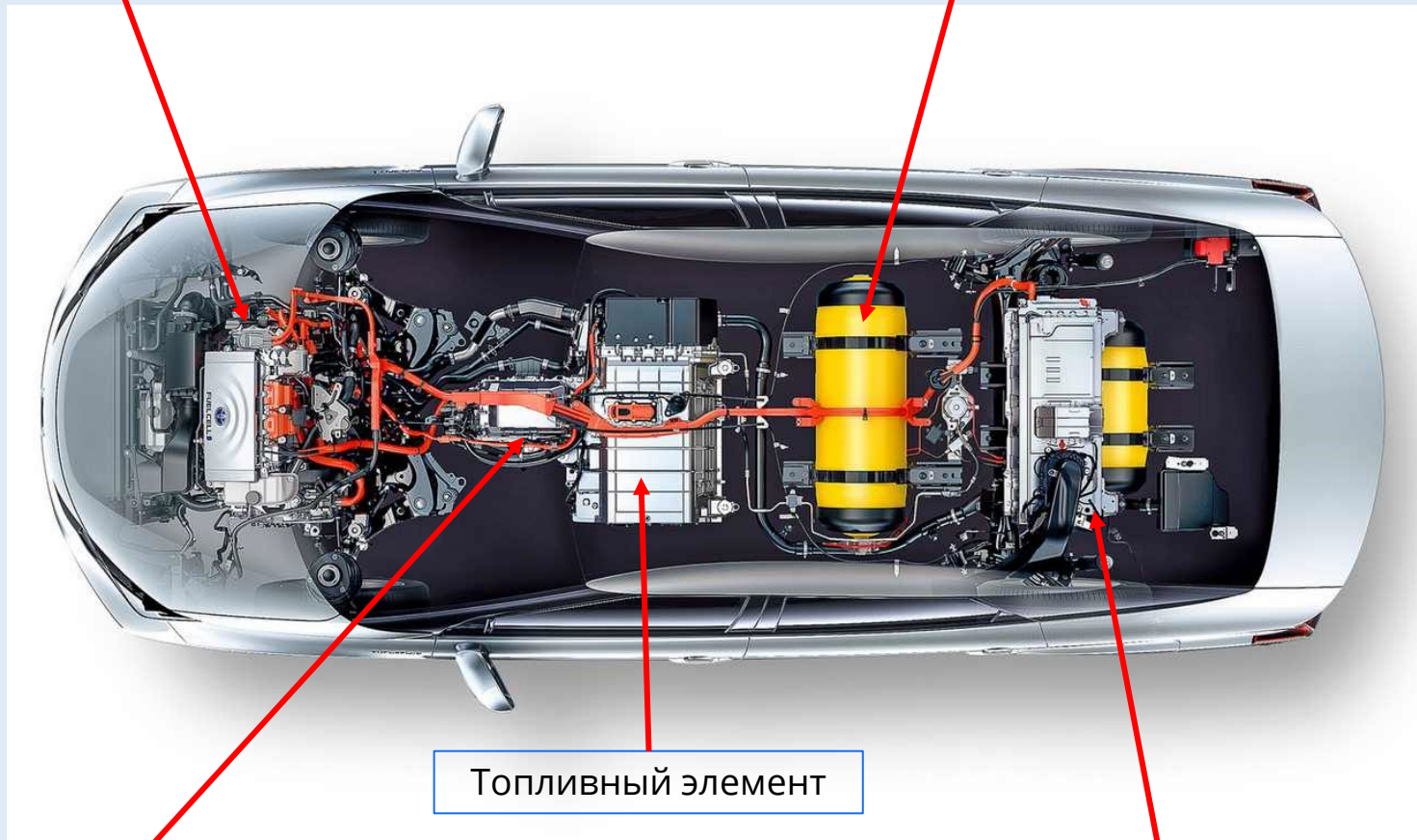


Силовая установка автомобиля с ТЭ

- Выработка электроэнергии топливным элементом (ТЭ)
- Накопление излишек кинетической энергии при торможении и преобразование в электричество (как в болидах F1)
- Электродвигатель на каждое ведущее колесо

Электродвигатель

Топливный бак



Топливный элемент

Преобразователь постоянного тока от ТЭ в переменный

Аккумулятор вторичной энергии



Потенциальная взрывоопасность

Водород воспламеняется в широком диапазоне концентраций в воздухе от 4 до 75 %.

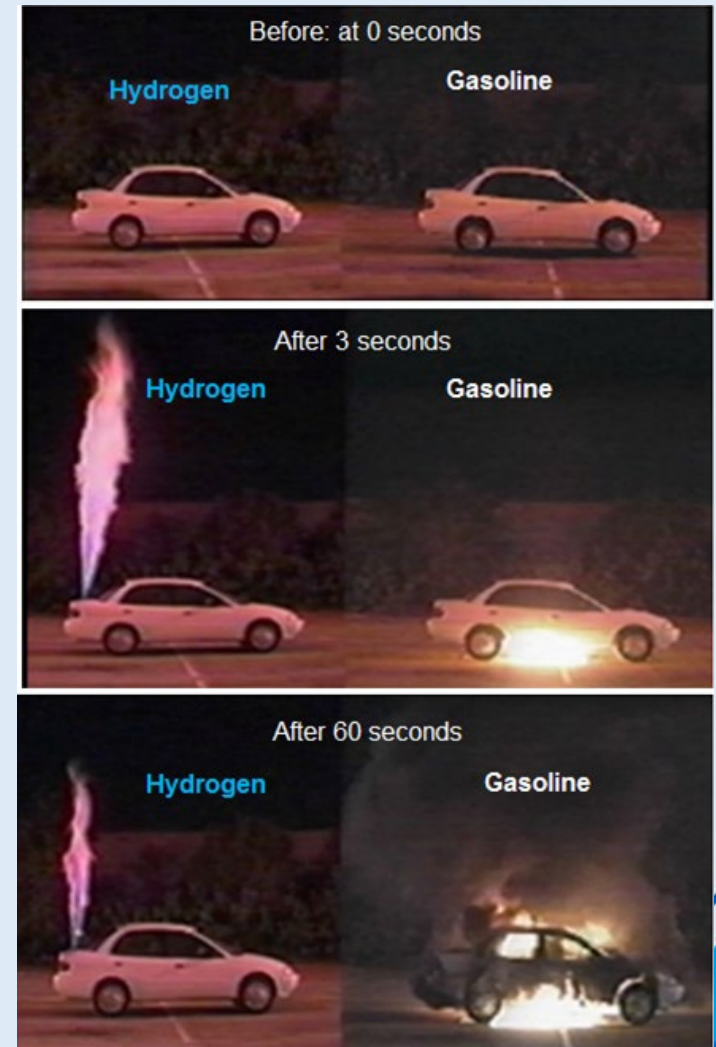
Температура самовоспламенения высока и составляет 585 °С.

Водородное пламя почти незаметно при дневном свете, имеет бледно-голубой цвет.

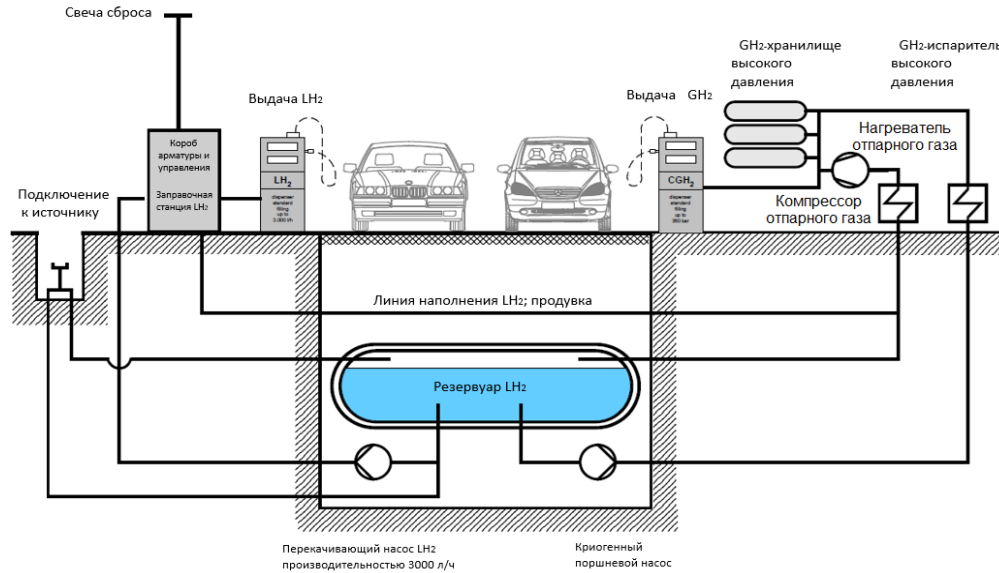
- Водородный пожар безопаснее бензинового, так как водород легче воздуха и быстро поднимается вверх.
- Пожар вертикален и локализован.
- Горение с большей энергией, чем бензин, но в течении короткого времени.
- Нет токсичного дыма

Что предпринимается для мер безопасности:

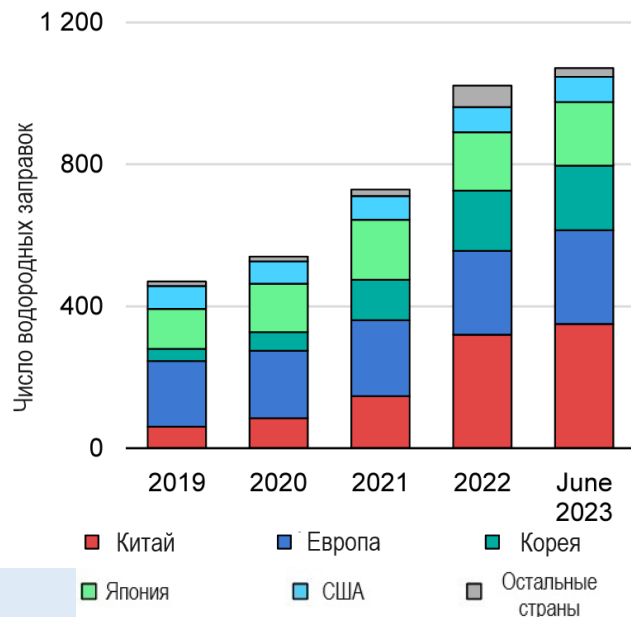
- Прочные баки, которые не разрушаются при аварии (испытания Toyota).
- Установка баков на крыше в случае общественного транспорта: так пламя при возгорании не достигнет салона.
- Аналитические системы утечек и герметичности в заправочных пистолетах.



1,2-2 млн.\$ стоимость водородной заправки с собственным электролизером в США



Водородные заправочные станции



На сегодняшний день в Европе функционирует 170 водородных заправочных станций высокого давления (700 бар).

Принцип работы аналогичен бензиновым и дизельным заправкам.



Инженеры
будущего

Применение водорода в других видах транспорта

- Пассажирские поезда на водородных топливных элементах
- Гибридный морской транспорт на аккумуляторах и жидком водороде

Негативный опыт эксплуатации водородных поездов Coradia iLint в Германии (2022-2023 гг.): высокая стоимость сырья и обслуживания.

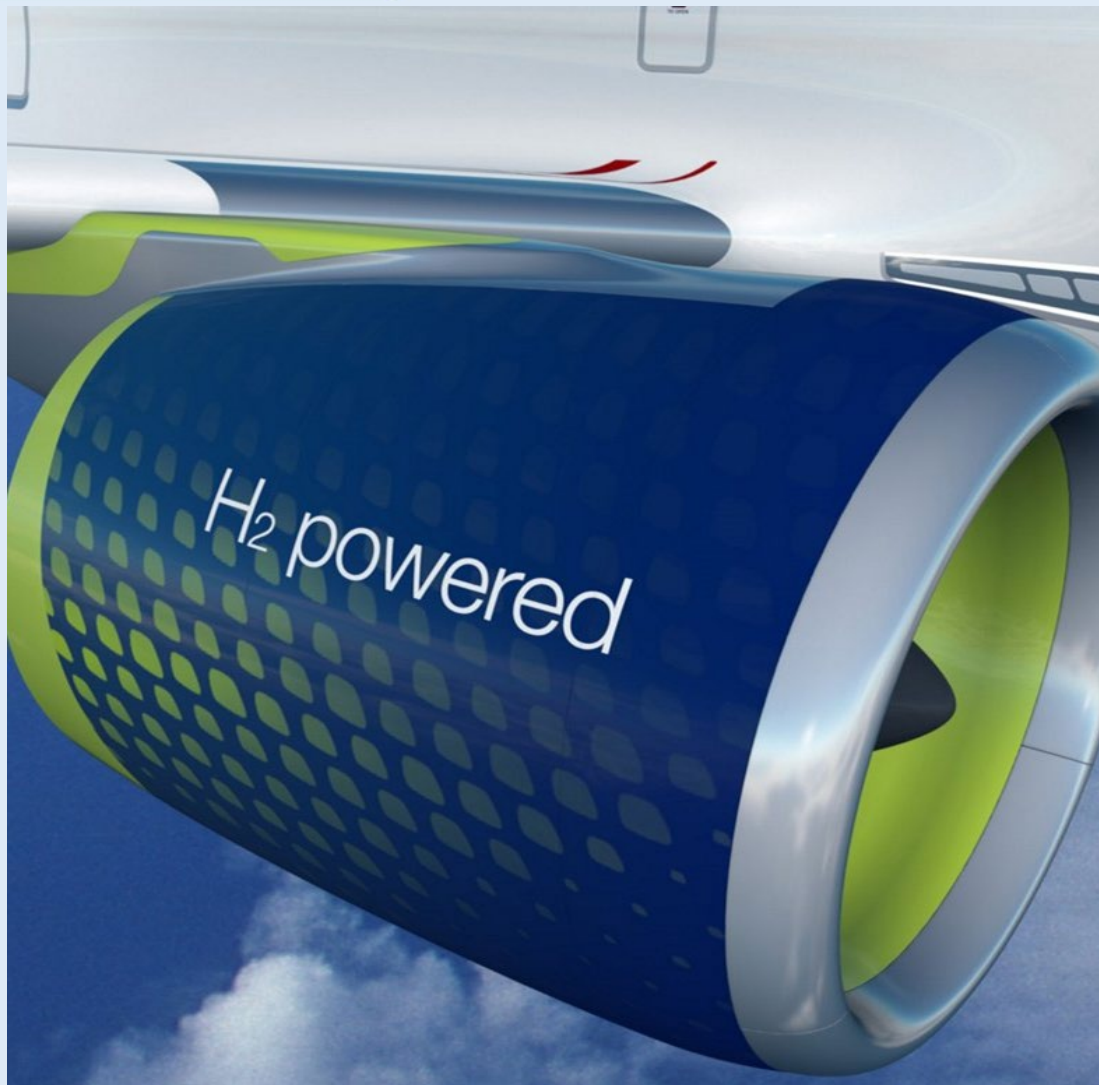
Аккумуляторные поезда дешевле в обслуживании до 80% (там, где они применимы)



Coradia iLint –
Alstom,
Германия 2018



Hydra– Norled,
Норвегия 2021



Водород в авиации

Декарбонизация авиационной отрасли

Лучшая массовая плотность энергии

Возможность создания электрического самолета на топливных элементах

Увеличение эффективности двигателя

Возможность использования хладоресурса

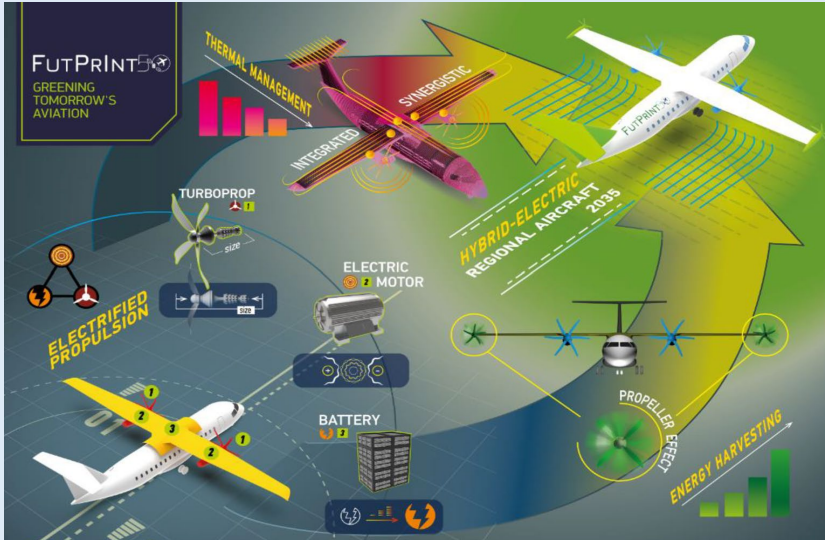
Аспекты применения водорода в авиации

Преимущества

- ✓ Возобновляемое топливо
- ✓ Сокращение выбросов в окружающую среду
- ✓ Повышение стабильности работы двигателя на различных высотах
- ✓ Уменьшение взлетной массы самолета
- ✓ Уменьшение уровня шума

Проблемы при внедрении технологии

- × Инфраструктура для работы с криогенным топливом в аэропорту
- × Эффективный метод получения и транспортировки жидкого водорода
- × Система хранения и подачи криогенного топлива
- × Новые требования летной безопасности
- × Контрольно-измерительная арматура, системы детекции утечек



© AIRBUS 2020 - All rights reserved - IVIS

AIRBUS

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Linde
Making our world more productive

Air Liquide

equinor

PLUG POWER

arianeGROUP

easyJet

POWERCELL

BALLARD

GKN AEROSPACE

SAFRAN

Bauhaus Luftfahrt
Neue Wege.

GROUPE ADP

Schiphol
Group

BOEING

HYDROGENICS
SHIFT POWER | ENERGIZE YOUR WORLD
Now a part of Cummins Inc.



Intelligent Energy

TU Delft

Cranfield University
ENABLE-H2

LIEGE AIRPORT

ZERO AVIA

Мировой ОПЫТ

Совместная работа
авиаконструкторов,
производителей водородной
инфраструктуры, поставщиков
водорода

Концепция самолета

Для региональных самолетов оптимальным вариантом считается водородная топливная ячейка.

Для средне- и дальнемагистральных – система с газотурбинным агрегатом (ГТД) и системой топливопитания на жидком водороде

Самолет с топливной ячейкой

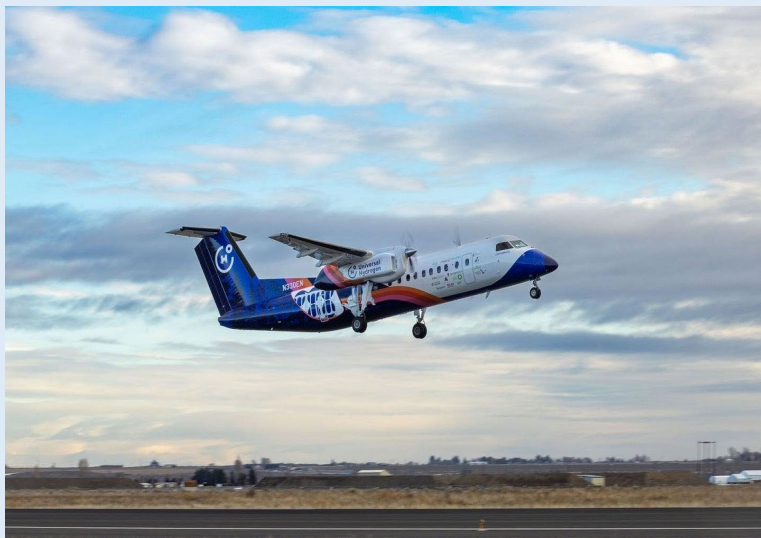


- Высокоэффективная конструкция крыла
- Баки LH2 позади пассажирской кабины
- Электрические моторы для создания тяги

Самолет с ГТД на водороде



- Система топливопитания
- Баки LH2 позади пассажирской кабины
- ГТД на LH2



Реализованные образцы

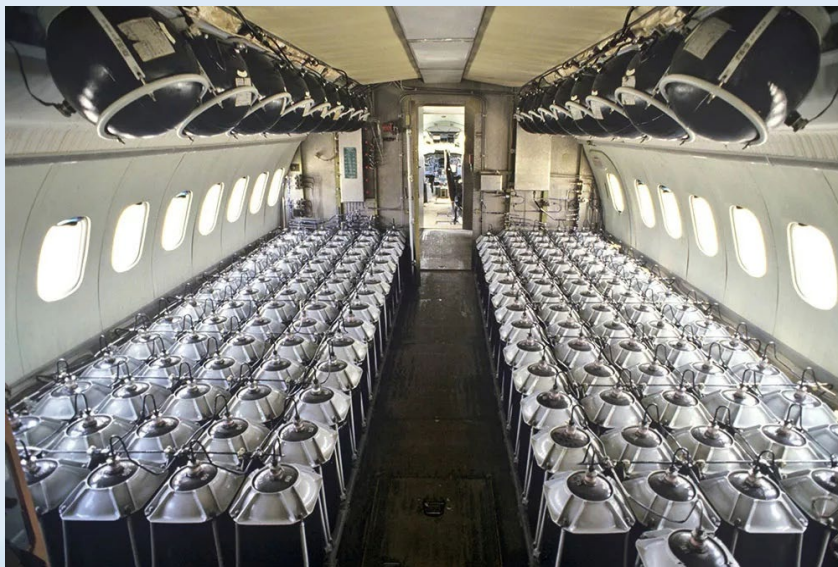
Планер Dimona, ЕС, 2008

H2FLY, Германия, 2023

ZEROAVIA, США, 2023

Universal hydrogen, США,
2023

На топливных элементах



Реализованные образцы

ТУ-155, СССР, 1988

ZERO E, EC, в разработке,
полеты ещё не
совершены

На турбореактивных
двигателях,
двухтопливные системы



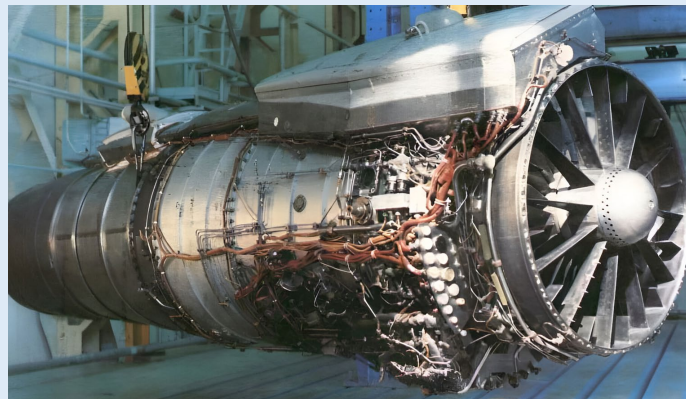
ТУ-155

Первый самолет на
водородной тяге

Полет на водороде в 1988 г.

Двухтопливная силовая
установка

Двигатель НК-88

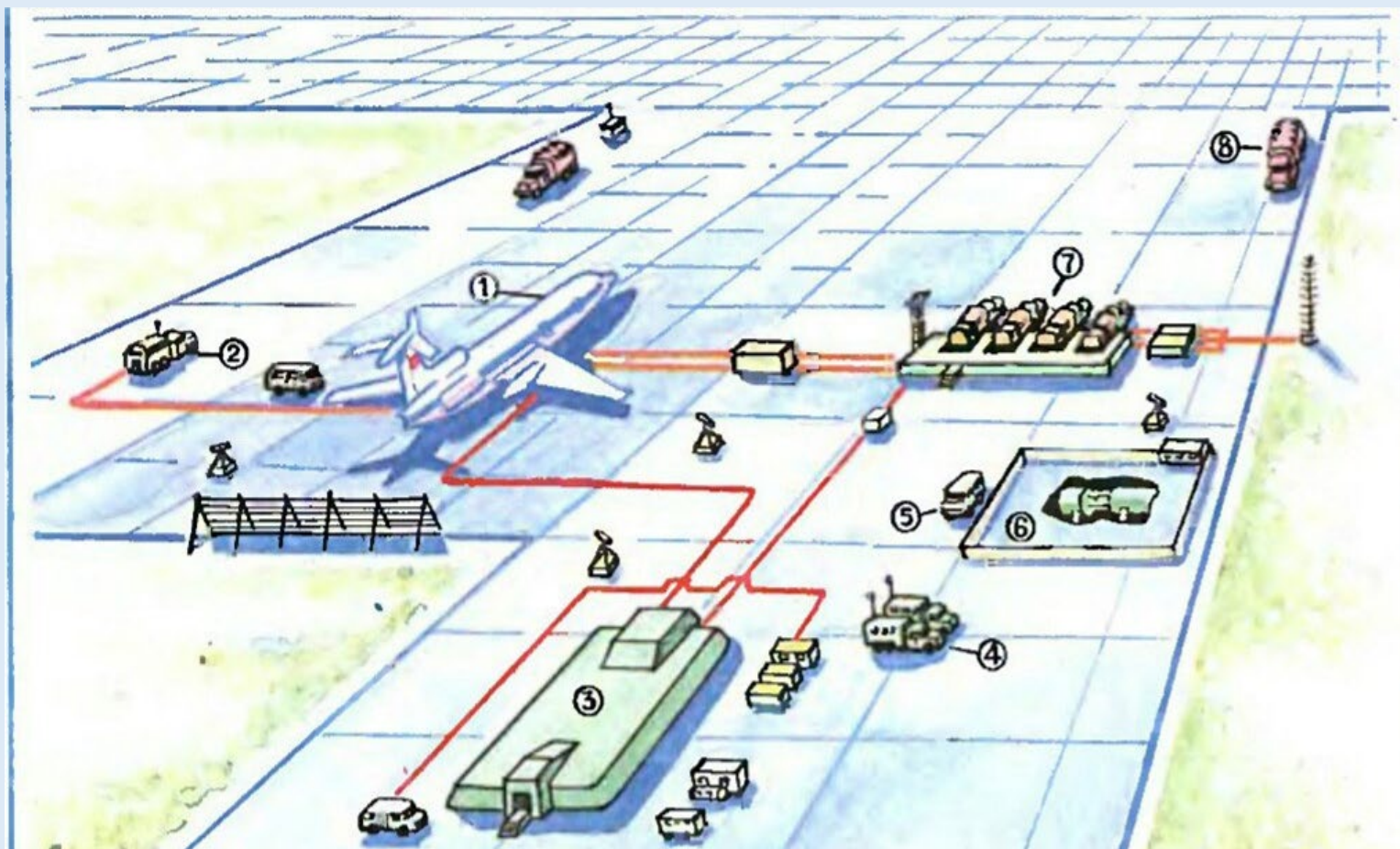


ТУ-155

Первый отечественный прототип пассажирского самолета на криогенном топливе.

- Гелиевая система наддува обеспечивает подачу водорода в двигатель
- Азотная система продувки фюзеляжа предотвращает утечки
- Система контроля вакуума поддерживает параметры в теплоизоляционных полостях

ТУ-155 Авиационный криогенный комплекс



1. Самолет ТУ-155
2. Система продува мотогондолы
3. Командный пункт управления
4. Система оперативной радиосвязи
5. Передвижной вакуумный пост
6. Система орошения водой
7. Система наполнения водородом
8. Средства пожаротушения



Узлы системы топливопитания на LN_2

Основные узлы

Узел хранения жидкого водорода

Криогенный топливный бак должен обеспечивать бездренажное хранение водорода на стоянке и в полете, соответствовать нормам взрыво- и пожаробезопасности

Насосный агрегат жидкого водорода

Обеспечивает бесперебойную подачу топлива с необходимыми параметрами в камеру сгорания

Узел поддержания давления в баке

Создает необходимые условия хранения водорода в баке и поддерживает расчетные расход и кавитационный запас на входе в насосный агрегат

Вспомогательные узлы

Узел обеспечения безопасности

Предотвращение аварийных ситуаций во время работы системы, безопасный сброс жидкого водорода

Контрольно-измерительный узел

Измерение параметров потока жидкого водорода в процессе эксплуатации системы

Узел управления

Регулирование характеристик машин и пневмогидравлической схемы на основе полученных данных



Инженеры
будущего

Перспективное оборудование, создание которого необходимо для реализации проекта самолета на LH_2

Хранение топлива

Цилиндрический криогенный резервуар

Материал бака: алюминий/композитный материал
Обеспечение высокой степени герметичности на уровне температур жидкого водорода
Использование минимального количества подключений

Изоляция

Обеспечить низкие теплопритоки для бездренажного хранения во время стоянки

Подкачивающий насос - центробежный

Компактный размер
Минимальное тепловыделение
Электрический привод на ВТСП
Время до кап. ремонта не менее 8000 летных часов

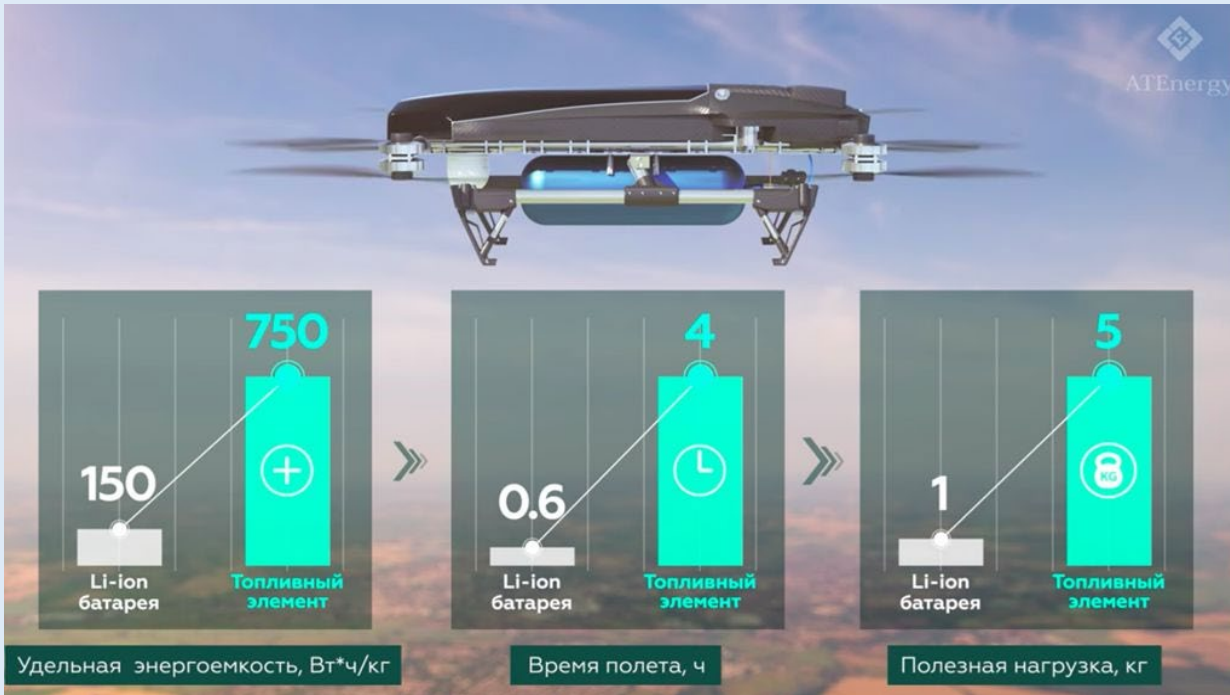
Подача топлива

Турбонасосный агрегат

Шнеко-центробежный насос
Турбинный привод
Резервный привод: электрический
Закрытая система подачи топлива

Арматура

Сравнительно небольшой вес
Невосприимчивость к водородному охрупчиванию
Сохранение мех. свойств при температурах жидкого водорода
Устойчивость к циклическим нагрузкам



БПЛА на водородном топливе

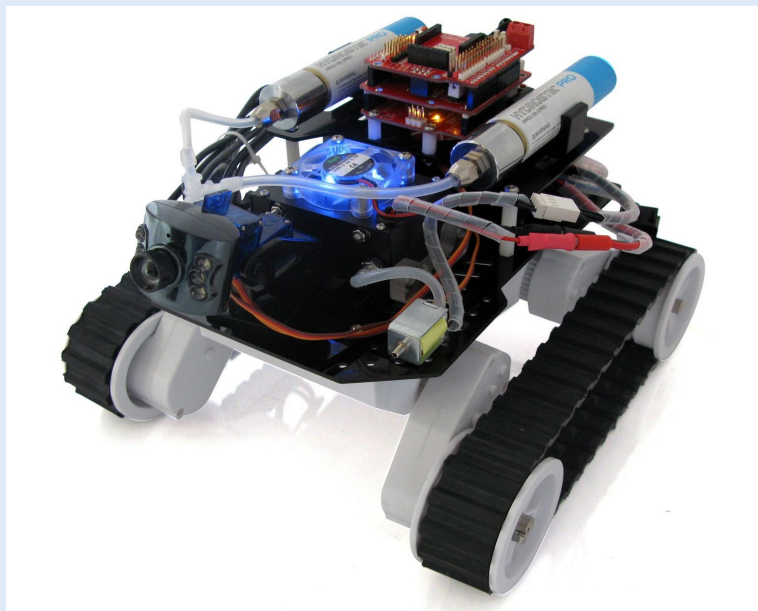
- Летные испытания водородного дрона для будущей арктической станции «Снежинка» прошли в Черноголовке
- Увеличение температурного диапазона работы с -10°C до -40°C
- Снижение веса батареи в 3-6 раз
- VMPower (Россия): система питания летательных аппаратов до 1 кВт

Замена Li-Ion аккумулятора на топливный элемент увеличивает время пилотирования **более чем в 5 раз**

Универсальный электрогенератор на основе водорода

- Заправка HYDROSTIK от баллона водорода 30 бар в течение 30 минут
- Ø22x88мм, 105 гр
- Гидрид металла AB5
- 1 «батарейка» может питать ТЭ мощностью до 30 Вт
- Срок эксплуатации 10 лет

Перезаряжаемый источник энергии для робота, БПЛА.
Длительная эксплуатация – запас водорода внутри робота



Horizon Fuel Cell Technologies,
Водородная батарейка и
пример эксплуатации на ТЭ
для роботов



JKDesign,
Самоуправляемый робот с
батареями на ТЭ и запасом
водорода

Искусственный интеллект

- Поиск залежей водорода по снимкам со спутников
- Ускорение исследований в области водородной энергетики
- Математическое моделирование реакций и взаимодействия водорода с кристаллическими решетками
- Безопасность: анализаторы утечек водорода
- Соединение: $NiO+H_2$ перспектива создания самообучаемых компьютеров будущего

Фото со спутника: «Бассейн Лотарингии», Франция



Что общего у морского слизня и оксида никеля?



Сенсибилизация: крайняя реакция организма на вредный или неожиданный раздражитель

Водородопоглощающие сплавы в медицинском и реабилитационном оборудовании

Металлгидридный привод, использующий обратимую реакцию между тепловой энергией и механической энергией сплава, поглощающего водород.

Небольшие размеры, малый вес, бесшумная работа.

Применение:

- в медицинских и реабилитационных целях - подъемные механизмы для ухода за больными.
- экзоскелеты.

Механическая мощность вырабатывается только за счет теплопередачи при преобразовании электроэнергии в тепло.

Нагрев – выпуск водорода, охлаждение – поглощение.



Возможность создания мягких роботов с имитацией мышечного движения за счет плавного привода на металлическом гидриде



Экзоскелетные мышцы на водороде



Инженеры
будущего

Миф о водородной воде

Патент «Устройство для наводороживания воды»:

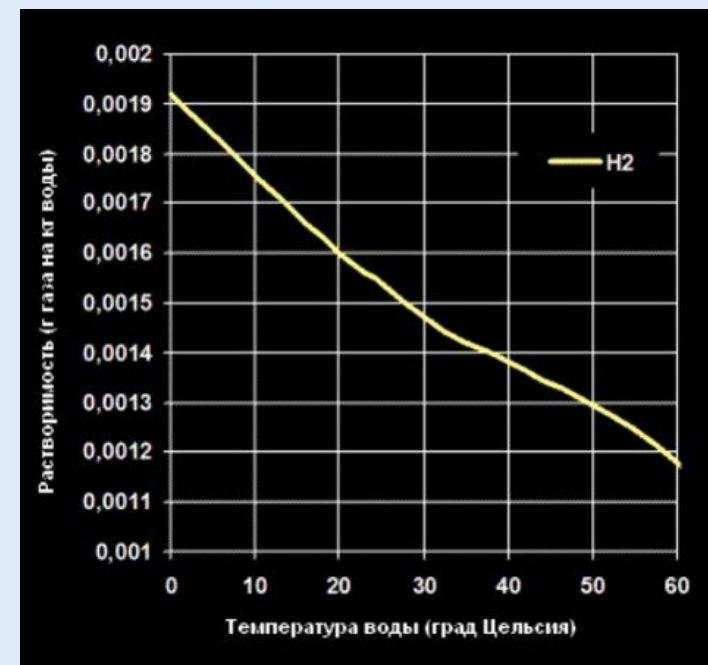
«Водород, образующийся за счет электролиза воды, частично растворяется в воде, а частично выделяется в виде газа и направляется в сборную емкость. Наводороженная вода отводится из накопительной емкости и далее перед поступлением потребителю смешивается с водородом из сборной емкости, таким образом осуществляется так называемое двойное наводороживание...»

На практике:

Испарение газообразного водорода после «двойного наводороживания» моментально при наливе/открытии крышки.
Испаряемость части водорода в ЖКТ.



Растворимость при 20° С и атмосферном давлении 18 мл на 1 л воды





Прорыв

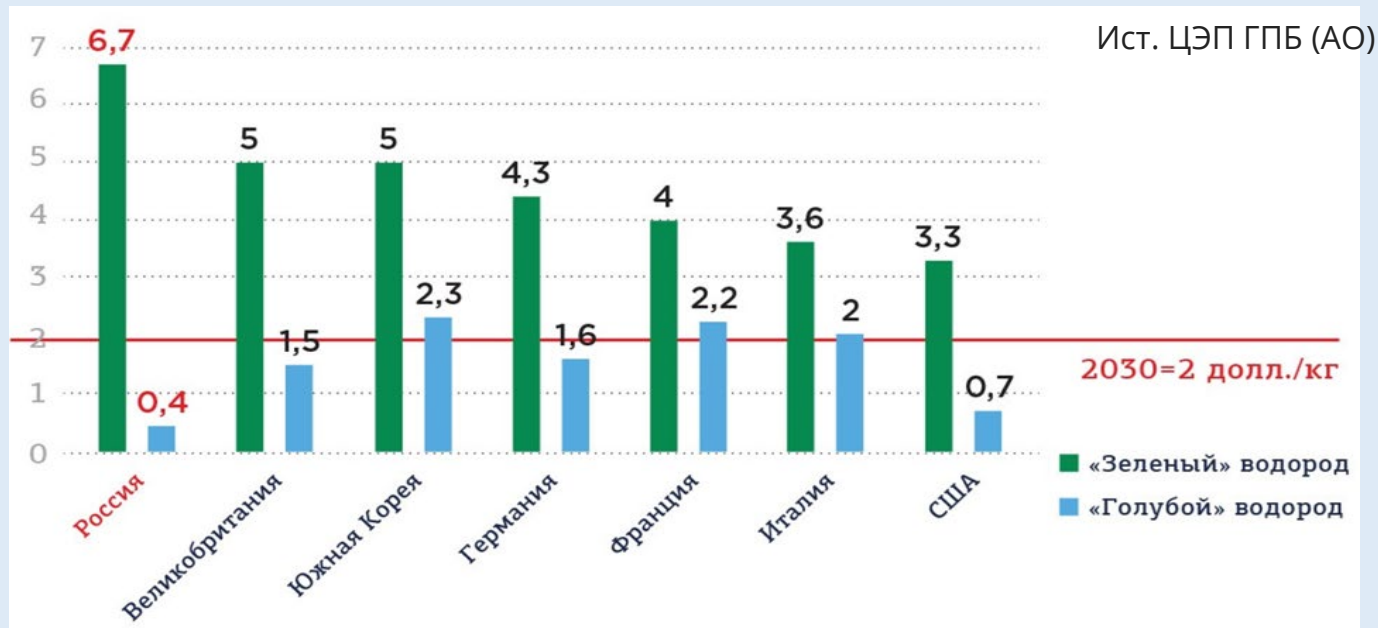
Прорыв для активного применения H₂ в РФ может быть обеспечен достижением комплекса технических решений в части производства, хранения транспортировки и потребления H₂ с максимальной эффективностью.

Серийное внедрение позволит снижать стоимость на рынке и выйти на уровень цен углеводородного топлива.

Для РФ рассматриваются сценарии как производства «желтого H₂» при использовании электроэнергии, вырабатываемой АЭС, так и «голубого H₂» с улавливанием CO₂ и захоронением в подземных резервуарах.

Для декарбонизации производства требуется разработка эффективных технологий **улавливания и утилизации** CO₂.

Подземные полости от нефтедобычи являются природными резервуарами для захоронения CO₂.



Издержки на производство водорода разными технологиями в 2019 г., \$/кг.



Преимущества РФ, которыми следует воспользоваться

- Наличие энергетического потенциала и ресурсной базы.
- Наличие недозагруженных генерирующих мощностей.
- Географическая близость к потенциальным потребителям водорода.
- Научный задел в областях производства, транспортировки и хранения водорода.

Потенциальная возможность для РФ экспорта в Китай, Японию, Корею, что хорошо согласуется с проектом водородного кластера на Сахалине. Кластерный метод организации производства позволяет использовать водород близки мест производства электроэнергии для накопления излишков мощностей, а также их полезного использования.

Водородная экономика требует занятости в сферах от инжиниринга (разработки оборудования) до госрегулирования и стандартизации, маркетинга, консалтинга, инвестирования.

Развитие всех вышеперечисленных сфер занятости в местах локализации кластеров или производств водорода способствует развитию региональной экономики.

В водородной энергетике сам водород – не главный товар, а его производство и потребление – не самый большой рынок.

60-70% всей водородной экономики будут находиться в рынке оборудования.

Заключение

Реализация мер по смягчению антропогенного воздействия на климат в части предотвращения выбросов парниковых газов.

Водородная энергетика – потенциальная возможность производства и накопления локальных энергоресурсов: Арктические регионы, островные регионы.

РФ необходимо поддерживать мировую тенденцию декарбонизации для развития экономики (в т.ч. привлечение иностранных инвестиций), для сохранения природы за счет стабильности климата.

Задачи:

- Развитие технологий производства и оборудования потребителей
- Нарращивание темпов производства водорода
- Организация инфраструктуры для потребителей
- Регулирование стоимости продукта
- Снижение стоимости производства и логистики за счет энергоэффективных технологий, автоматизации процессов, долгосрочного хранения

