приоритет

МГИМО
УНИВЕРСИТЕТ

2025

АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНЫХ ПРОЕКТОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ВОДОРОДА ИЗ УГЛЯ. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО АКСЕЛЕРАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА «КОРИЧНЕВОГО» ВОДОРОДА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Салыгин В.И.
Маркин А.С.

Авторский коллектив:

1. Салыгин Валерий Иванович, профессор, доктор технических наук, директор Международного института энергетической политики и дипломатии МГИМО, Член-корреспондент РАН

2. Маркин Антон Сергеевич, аналитик Центра стратегических исследований в области энергетики и цифровой экономики Международного института энергетической политики и дипломатии МГИМО

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ..... 4

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ..... 6

ВВЕДЕНИЕ..... 9

1. Исследование перспектив развития водородной энергетики в мире. Анализ потенциального спроса на водород по регионам..... 10

2. Анализ действующих проектов в области производства водорода из угля..... 25

3. Определение преимуществ и недостатков технологий производства водорода из угля, по сравнению с другими способами производства водорода..... 30

4. Рекомендации по акселерации производства «коричневого» водорода в Российской Федерации..... 33

ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 39

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ..... 41

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Пиролиз	Пиролиз метана является альтернативным подходом к получению водорода из природного газа без образования CO2. При пиролизе метана образуется водород.
Электролиз	Под действием постоянного электрического тока вода разлагается на кислород и водород.
Энергобаланс	Баланс добычи, переработки, транспортировки, преобразования, распределения ипотребления всех видов энергетических ресурсов и энергии в народном хозяйстве.
Паровая конверсия метана	Получение чистого водорода из лёгких углеводородов (например метана, пропан-бутановой фракции) путём парового риформинга (каталитической конверсии углеводородов в присутствии водяного пара).
Общее первичное предложение энергии	Общее предложение первичной энергии (ОППЭ), отнесенное к численности населения, на основании данных отчета Мировые демографические прогнозы: редакция 2012 года (англ.: World Population Prospects: The 2012 revision). ОППЭ состоит из добычи и импорта, за вычетом экспорта, международной бункеровки морских судов, бункеровки воздушного транспорта, включая изменения запасов углеводородов. ОППЭ включает такие виды топлива, как уголь, газ, электричество. Для подсчета общего значения на мировом уровне, морская бункеровка и заправка воздушных судов на международном уровне не рассчитывается из ОППЭ.
Улавливание и хранение углерода	Процесс, включающий отделение CO2 от промышленных и энергетических источников, транспортировку к месту хранения и долгосрочную изоляцию от атмосферы. Обычно улавливание CO2 осуществляется у крупного источника выбросов газа, например цементного завода или электростанции на биомассе, и заключение его в соответствующих геологических формациях.
Водородное охрупчивание	Процесс охрупчивания и разрушения некоторых металлов вследствие воздействия атомарного водорода.

Бенчмаркинг	Сопоставительный анализ на основе эталонных показателей как процесс определения, понимания и адаптации имеющихся примеров эффективного функционирования предприятия с целью улучшения собственной работы.
Нулевые выбросы (англ. Net Zero Emissions)	Принцип/политика в зарубежных странах/компаниях по окращению объема выбросов парниковых газов до уровня, максимально приближенного к нулю, при этом весь остающийся объем выбросов поглощается окружающей средой.
Бункеровка	Заправка судна топливом и моторными маслами.
Общее конечное потребление	Совокупное конечное потребление энергии различными секторами, за исключением энергозатрат, возникающих при трансформации энергии из первичной формы. Обратные потоки продукции нефтехимической промышленности не включаются в конечное потребление.
Конечная энергоемкость	Показатель, отражающий соотношение общего конечного потребления к ВВП и выраженный в килограммах нефтяного эквивалента на 1000 долл. США (по паритету покупательской способности 2017 года) ВВП.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

AEM (electrolysis)	электролиз на анионообменной мембране (англ. anion exchange membrane)
ALK (electrolysis)	щелочной электролиз (англ. alkaline)
ATR	автотермический риформинг (англ. autothermal reforming)
BF-BOF	производство железа кислотно-конвертерным способом в доменных печах (англ. Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace)
C	углерод
CCUS/CCS	технологии улавливания, использования и хранения углекислого газа (англ. Carbon Capture Utilization and Storage)
CH_4	метан
DOE	Министерство энергетики США (англ. Department of Energy)
DRI-EAF	прямое восстановление железа в электродуговых печах (англ. Direct Reduced Iron - Electric Arc Furnace)
EERE	Департамент энергоэффективности и возобновляемых источников энергии (англ. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy)
FCEV	электромобили на топливных элементах (англ. Fuel Cell Electric Vehicles)
FCHEV	гибридные электромобили на топливных элементах (англ. Fuel Cell Hybride Electric Vehicles)
G20	Группа двадцати (англ. Group of Twenty)
H_2	водород
H2@Scale	Инициатива DOE по внедрению водородной энергетики в США (англ. Hydrogen at Scale)
H2NEW	Консорциум по исследованиям и разработкам электролизных установок (англ. Hydrogen from Next-generation Electrolyzers of Water)
H2O	вода
HFTO	Департамент водородной энергетики и топливных элементов (англ. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office)
HRS	водородные заправочные станции (англ. hydrogen refuelling stations)
IEA	Международное энергетическое агентство (англ. International Energy Agency)
IES	интегрированные энергетические системы (англ. Integrated Energy Systems)

IPCEI	проекты, представляющие общеевропейский интерес (англ. Important Projects of Common European Interest)
IRENA	Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (англ. International Renewable Energy Agency)
LOHC	жидкие органические носители водорода (англ. liquid organic hydrogen carriers)
M2FCT	Консорциум по исследованиям и разработкам грузовиков на топливных элементах (англ. Million Mile Fuel Cell Truck)
MCH	метилциклогексан (англ. methylcyclohexane)
MYRD&D	Многолетний план исследований, разработок и демонстраций HFTO (англ. Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan)
N_2	азот
NH_3	аммиак
NOx	оксиды азота
O_2	кислород
OGCI	Инициатива по мониторингу нефти и газа для сохранения климата (англ. Oil and Gas Climate Initiative)
PEM (electrolysis)	электролиз на протонообменной мембране (англ. proton exchange membrane)
PPA	Соглашение о покупке электроэнергии (англ. Power Purchase Agreement)
SOEC (electrolysis)	электролиз твердых оксидов (англ. solid oxide electrolysis cells)
ZEFER	Проект “Создание парков транспортных средств с нулевыми выбросами для перехода ЕС к климатической нейтральности” (англ. Zero Emission Fleet vehicles For European Roll-out)
ВВП	валовой внутренний продукт
ВИЭ	возобновляемые источники энергии
ДВС	двигатель внутреннего сгорания
КПД	коэффициент полезного действия
МЭА	Международное энергетическое агентство (англ. International Energy Agency)
НГК	нефтегазовые компании
НИОКР	научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НИР	научно-исследовательская работа
НПЗ	нефтеперерабатывающий завод
СО	монооксид углерода

CO2	углекислый газ
СПГ	сжиженный природный газ
ТЭС	тепловая электростанция
УХУ	технологии улавливания, использования и хранения углекислого газа (англ. Carbon Capture Utilization and Storage)
ММТ/Мт	миллионов (метрических) тонн
б/д (нефти)	баррелей в день
ГВт	гигаватт
кгLOHC	килограмм жидких органических носителей водорода
кгH_2	килограмм водорода
кгCO_2	килограмм углекислого газа
МВт	мегаватт
ПДж	петаджоуль
тH_2	тонна водорода
ЭДж	эксаджоуль

ВВЕДЕНИЕ

По оценкам МЭА производство водорода из угля – наиболее дешевый способ производства водорода. Данный фактор позволяет данному источнику энергии более эффективно внедриться в современную экономику. Российская Федерация занимает 2е место по запасам угля в мире, что в перспективе позволит обеспечить крупные объемы поставок дешевого водорода.

В рамках отчета представлено структурное исследование целью которого является разработка рекомендаций по акселерации производства водорода из угля. Для достижения цели отчета проведен структурный анализ материалов российских и зарубежных ведущих аналитических агентств, включая РЭА Минэнерго, Минпромторга, Водородного Совета, МЭА, ЭСКАТО и др.

Особое внимание в рамках исследования было уделено анализу действующих проектов по производству водорода из угля для определения технологической зрелости технологий.

В рамках отчета проведен сравнительный анализ технологий производства водорода для формирования заключения по конкурентоспособности «коричневого» водорода по сравнению с другими типами.

Исследование содержит анализ стоимости производства водорода из угля в сравнении с другими способами для подтверждения тезиса, что ключевая особенность «коричневого» водорода заключается в низкой стоимости производства.

1. Исследование перспектив развития водородной энергетики в мире. Анализ потенциального спроса на водород по регионам

В целях проведения структурного анализа перспектив развития водородной энергетики и технологий были использованы данные российских и зарубежных ведущих аналитических агентств. Были исследованы материалы РЭА Минэнерго[1], Минпромторга[2], Водородного Совета[3], МЭА[4], ЭСКАТО[5] и др.

Популяризация водорода в текущей конъюнктуре мирового ТЭК обусловлена уже устоявшимся трендом реализации Целей устойчивого развития. Генеральная ассамблея ООН разработала Цели устойчивого развития в качестве «плана достижения лучшего и более устойчивого будущего для всех», среди которых есть цели, напрямую затрагивающие вопросы экологии (ЦУР-6, ЦУР-12, ЦУР-14, ЦУР-15) и климата (ЦУР-7, ЦУР-9, ЦУР-13).

В контексте реализации ЦУР в 2015 г. было принято Парижское соглашение, целью которого является снижение прироста глобальной средней температуры. К реализации соглашения присоединились более 190 стран. В рамках реализации соглашения каждая страна разрабатывает и добровольно отчитывается о реализации так называемого вклада, определяемого на национальном уровне. В рамках реализации целей соглашения, ООН и региональные организации ООН проводят семинары и круглые столы для создания национальных руководств и принципов.

Помимо международных соглашений, с каждым годом растет число региональных инициатив. Так, в 2019 г. Евросоюз разработал законодательную инициативу «EU Green Deal», целью которой является достижение 100% углеродной нейтральности всеми государствами ЕС к 2050

[1] Официальный сайт РЭА Минэнерго РФ. URL: https://rosenergo.gov.ru/press-center/news/eksperty-rea-minenergo-rossii-podgotovili-novyy-daydzhest-otechestvennykh-nauchno-tekhnicheskikh-raz/
[2] Официальный сайт Минпромторга. Атлас водородных проектов России. URL: https://minpromtorg.gov.ru/storage/797ced43-043d-4b4e-b72b-3d36984adbc7/documents/663f0df0-8439-4152-a8ea-2c4d0d36ffe4/008cee19-8ce0-4107-9013-74288ef21298.pdf
[3] Hydrogen Council. Hydrogen Insights. URL: https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2024/
[4] IEA. Future of Hydrogen. URL: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024
[5] UN ESCAP. URL: https://asiapacificenergy.org

г. В 2020 г. Европейская комиссия представила новую стратегию сокращения выбросов метана, а также «Целевой план по климату», задача которого – сократить объемы выбросов ПГ на 55% по сравнению с уровнями 1990 г. к 2030 г.

Изменения происходят и на национальном уровне. В 2020 г. Китай выступил с заявлением о намерении достичь углеродной нейтральности к 2060 г. Одновременно о стремлении к углеродной нейтральности к 2050 г. заявили Япония и Южная Корея. В 2021 г. обязательство снизить уровень нетто-выбросов CO_2 до нулевого уровня к 2050 г. взяла на себя Канада.

Одним из перспективных источников энергии, которые позволяют существенно снизить выбросы CO_2, достичь углеродной нейтральности, а также содействовать достиженью ЦУР является водород. Среди прорывных технологий в области ВИЭ водород обладает наибольшей практической применимостью в различных секторах экономики, включая автомобильный транспорт, электрогенерацию, химическую промышленность, тяжелую металлургию, авиаперевозки, морские перевозки, и т.д. По оценке Международного энергетического агентства[6] водород является крайне перспективным и экологически чистым источником энергии, который обладает колоссальной энергоемкостью, которая почти в три раза превышает бензин (водород – 33500 кВтч/т, бензин 13800 кВтч/т).

На данный момент спрос на водород не позволяет данному источнику энергии эффективно конкурировать с традиционными. Тем не менее, с 2000 г., по данным МЭА, спрос на новое «голубое топливо» постоянно растет (см. Рисунок 1). Основной спрос на водород генерирует химическая и металлургическая промышленности, тем не менее по прогнозам МЭА к 2030 г. спрос на водород составит 150 млн т, что существенно превысит текущий спрос[7].

[6] Официальный сайт МЭА. Водород. URL: https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen
[7] Global Hydrogen Review 2021, Международное энергетическое агентство IEA // Официальный сайт IEA.org URL: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024

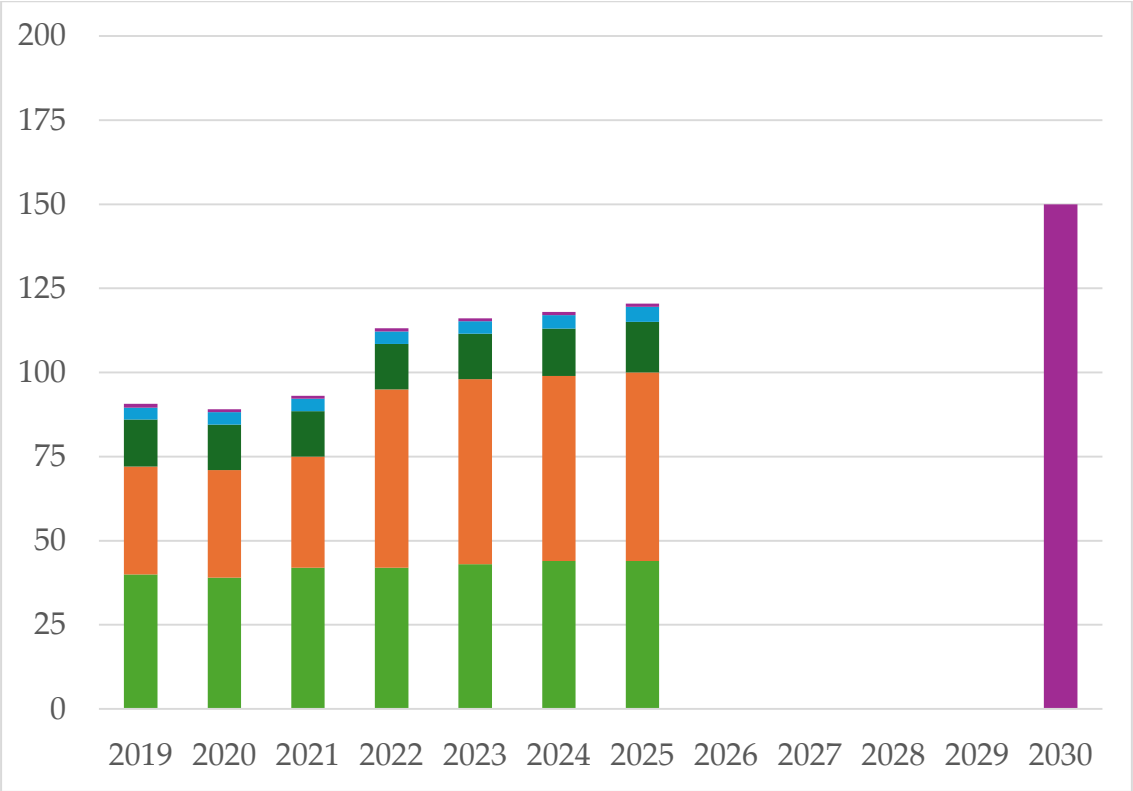


Рисунок 1 – Мировой спрос на водород (2019-2023 гг.) (в млн т)[8]

В зарубежных странах активное развитие водородной энергетики началось с 2018 г., когда Япония приняла собственную водородную стратегию. На данный момент практически все развитые страны имеют собственную стратегию по развитию водородной энергетики, создан ряд международных ассоциаций (крупнейшей из которых является водородный совет). Особое внимание необходимо обратить на региональную организацию по развитию водородной энергетики в АТР (Asia Pacific Hydrogen Association), поскольку, по прогнозам МЭА и ООН, рынок АТР будет крупнейшим потребителем водорода в долгосрочной перспективе.

На текущий момент в мире существуют порядка 2,5 тыс. производственных проектов, 100 проектов по транспортировке, а также около 80 проектов по хранению и 97 портов для морской транспортировки водорода (см. Рисунок 2)[9].

[8] Global demand for pure hydrogen, IEA URL: https://www.iea.org/reports/hydrogen-2156
[9] МЭА. База данных проектов в области производства водорода и водородной инфраструктуры. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database

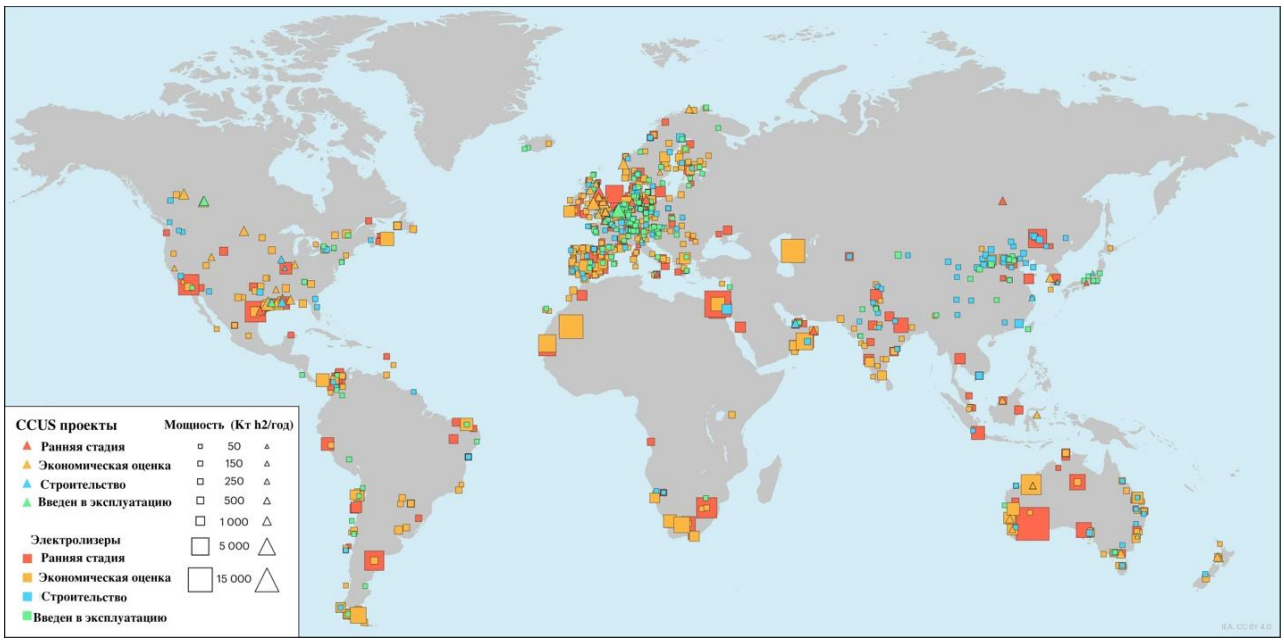


Рисунок 2 – Водородные проекты в мире на 2023 г. (проекты по производству водорода. CCUS – производства водорода из углеводородов, включая уголь, с применением технологии улавливания углерода)

В Российской Федерации водородной энергетике уделяется особое внимание. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р утвержден план мероприятий («дорожная карта») по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 г., направленный на увеличение производства и расширение сферы применения водорода в качестве экологически чистого энергоносителя, а также вхождение страны в число мировых лидеров по его производству и экспорту. Задача по развитию водородной энергетики также закреплена в ключевом отраслевом документе стратегического планирования – актуализированной Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г.

На текущем этапе водород становится частью энергетической системы крупнейших стран мира, однако на данный момент его доля относительно невелика. По данным Международного энергетического агентства (далее – МЭА), спрос на водород в 2024 г. составил около 100 млн т[10]. Спрос на водород стабильно увеличивался с 2000 г. (см. Рисунок 3).

[10] Global Hydrogen Review 2023, Международное энергетическое агентство IEA. URL: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023

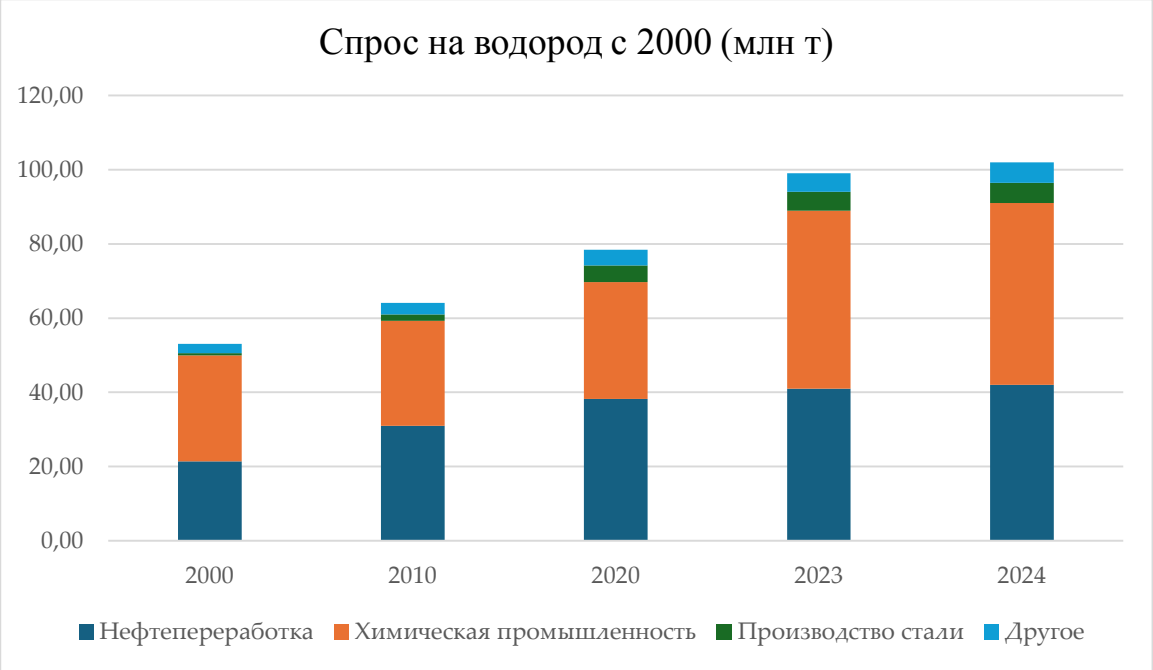


Рисунок 3 – Спрос на водород 2000-2023

Более двух третей этого спроса приходится на нефтепереработку и химическую промышленность. В категорию другое входят незначительные объемы спроса в промышленности, на транспорте, в сетях и при производстве электроэнергии.

Применение водорода в нефтепереработке

Нефтепереработка является крупнейшим текущим потребителем водорода (на нее пришлось около 41 млн т спроса на водород в 2023 г.) и, по оценкам экспертов, сохранит свою роль в краткосрочной и среднесрочной перспективе. Водород, используемый в этом секторе, как правило, производится локально путем парового риформинга метана, выделяется из побочных газов нефтехимических процессов или поставляется извне в качестве товарного водорода. Нефтеперерабатывающие заводы используют водород для удаления примесей (главным образом, серы) и переработки тяжелых фракций нефти в более легкие продукты. Использование водорода с низким уровнем выбросов в нефтепереработке может стать доступным способом создания большого спроса на водород с низким уровнем выбросов и способствовать расширению масштабов производства. Однако на сегодняшний день использование водорода с низким уровнем выбросов на

нефтеперерабатывающих заводах ограничено и развивается медленно вследствие более высокой стоимости его производства по сравнению с водородом, произведенным из ископаемого топлива и отсутствия политических мер по стимулированию его внедрения.

В 2022 г. компания Sinopec ввела в эксплуатацию крупнейшую в мире электролизную установку в Кука (Китай) мощностью 260 МВт, которая будет производить 20 тыс. т водорода для снабжения нефтеперерабатывающего завода Tahe. Однако существует лишь ограниченное число объявленных проектов, направленных на производство водорода с низким уровнем выбросов на нефтеперерабатывающих заводах для замены водорода, получаемого из ископаемого топлива, не подвергающегося снижению уровня выбросов. Если все заявленные проекты будут реализованы в срок, то к 2030 г. на НПЗ будет производиться и использоваться 1,3 млн т водорода с низким уровнем выбросов, из которых около 1,1 Мт будет производиться из ископаемого топлива с помощью CCUS и 0,2 млн т с помощью электролиза. Это примерно на 6% больше, чем потенциальное производство в рамках проектов, объявленных на момент выхода Глобального водородного обзора МЭА 2022 г. Большая часть этого увеличения приходится на проекты, направленные на производство водорода из ископаемого топлива с помощью CCUS. Увеличение за счет очень небольшого количества новых анонсов проектов, направленных на производство водорода путем электролиза, было почти полностью сведено на нет паузами в реализации ранее анонсированных проектов.

Химическое производство и производство стали

В промышленном производстве спрос на водород составил в 2024 г. 53 млн т. В данном секторе водород используется в основном для производства аммиака (60%), 30% применяется для производства метанола и 10% для производства стали. Синтезированный из водорода аммиак также используется для производства удобрений.

Производство аммиака

В сельском хозяйстве развиты процессы производства азотных удобрений. В свою очередь удобрения производятся с использованием аммиака. Ряд промышленных производств синтезируют аммиак из водорода, который в дальнейшем применяется в сельском хозяйстве и других отраслях промышленности.

Некоторые промышленные предприятия, которые синтезируют аммиак, также производят водород для химического процесса. Учитывая перспективы роста производства водорода, такие предприятия готовы производить водород и аммиак параллельно. Поэтому такие энергетические агентства, как МЭА и Водородный Совет учитывают проект по производству аммиака.

Например, Coffeyville fertilizer plant в США[11]. Данное предприятие производит аммиак и удобрения для сельскохозяйственных нужд. Компания владеет собственным НПЗ. В результате нефтепереработки образуется нефтяной кокс, который подвергается процессу газификации с образованием синтез-газа, насыщенного водородом. Далее из синтезгаза производятся аммиак и азотные удобрения для сельского хозяйства.

Водород в транспортном секторе

Применение водорода в транспортном секторе и для генерации электроэнергии на текущий момент ограничено. В транспортном секторе годовая потребность в водороде составляет менее 30 тыс. т, что составляет около 0,035% от совокупного спроса на водород. Электромобили на топливных элементах (далее – FCEV) в 2023 г. составили менее 0,01% от общего количества автомобилей в мире и лишь 0,3% от количества электромобилей.

Тем не менее по сравнению с 2021 г. произошел рост в продажах и производстве автомобилей на водородных топливных элементах. Китай уделяет особое внимание большегрузным автомобилям и играет огромную

[11] МЭА. База данных проектов в области производства водорода и водородной инфраструктуры. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database

роль в развертывании грузовиков на топливных элементах, поэтому, хотя в Китае насчитывается всего 20% всех FCEV, они потребляют более половины водорода, используемого в автомобильном транспорте[12] (см.

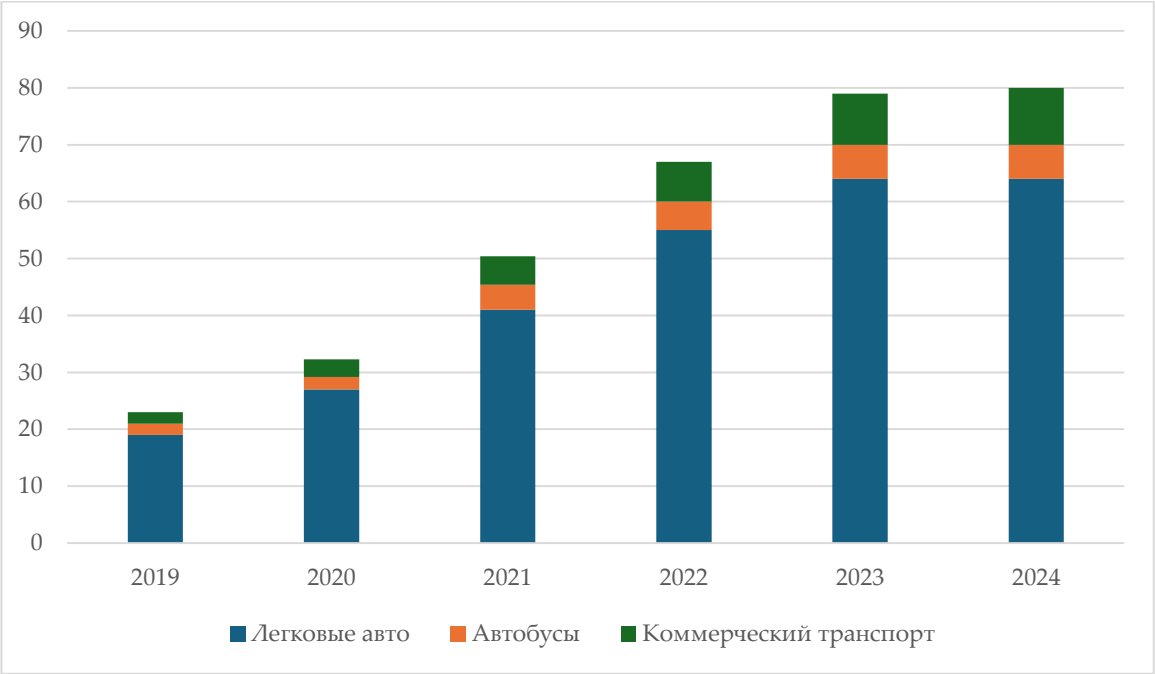


Рисунок 4).

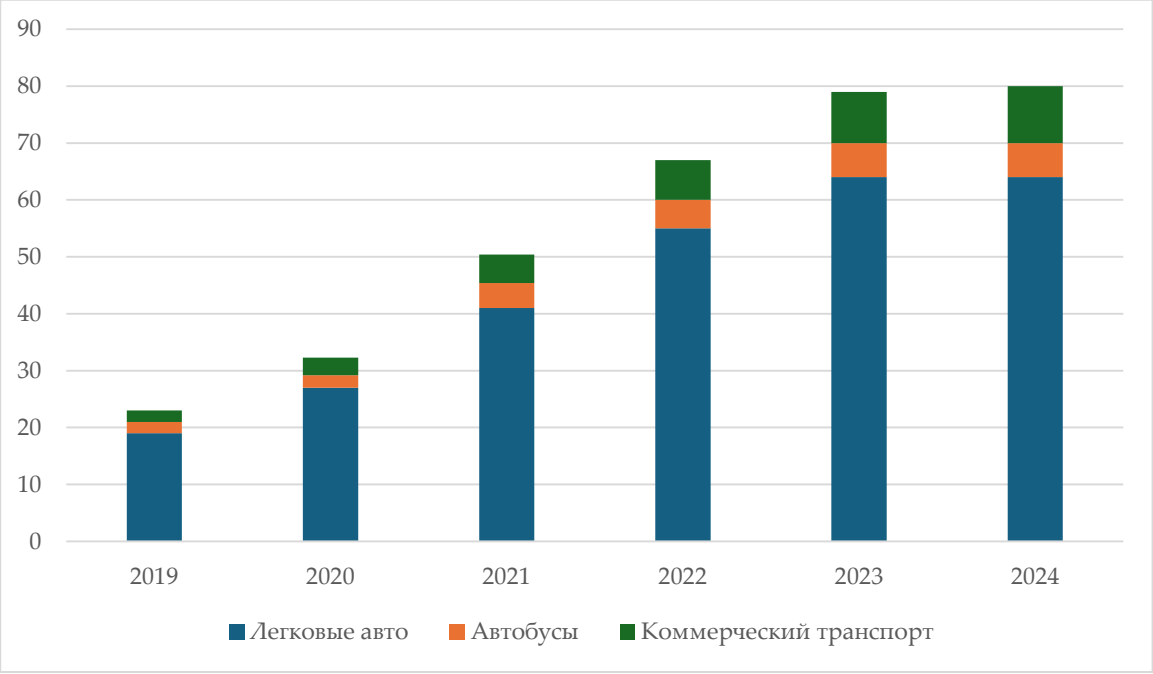


Рисунок 4 – Количество автомобилей на водороде по типам и регионам

[12]Global Drive to Zero. ZERO-EMISSION TRUCK AND BUS MARKET UPDATE. URL: https://globaldrivetozero.org/site/wp-content/uploads/2023/06/Final_ZETI-Report-June-2023_Final.pdf

Водородный транспорт является одним из ключевых драйверов развития водородной энергетики. При наличии высокого спроса на водород в качестве топлива (вернее источника электроэнергии для электродвигателя FCEV) произойдет существенное ускорение внедрения водорода в текущий мировой энергобаланс. В 2023 г. в мире было продано порядка 80 тыс. водородных автомобилей различного типа. С 2020 наблюдается существенный рост продаж и производства FCEV. Лидерами в части производства и рынка сбыта водородного транспорта являются Южная Корея, КНР и Япония.

В рамках развития водородного транспортного сектора в ряде стран формируется сеть из водородных АЗС. На текущий момент в мире порядка 1100 водородных АЗС (300 в КНР, 250 в ЕС, 180 в Южной Корее и 180 в Японии).

Применение водорода в производстве микрочипов

Водород применяется в фотолитографии в глубоком ультрафиолете для производства микропроцессоров. Для такого типа производства необходимо применение сверхчистого водорода. В рамках технического процесса применяется экстремального ультрафиолетового диапазона с длиной волны около 13,5 нм, то есть рентгеновское излучение. Для создания рисунка используется лазерная импульсная плазма капель олова, отражающая фотомаска и экспонирование подложки, покрытой фоторезистом. Фотолитографическая машина имеет управляемый лазером оловянный плазменный источник света, отражающую оптику с многослойными зеркалами, содержащиеся в газообразной среде водорода Водород используется для удержания зеркала-коллектора в качестве первого зеркала, собирающего излучение, испускаемого в большом диапазоне углов из плазмы, в источнике свободным от отложений олова.

Железнодорожный транспорт

В железнодорожном транспорте также реализуется целый ряд инициатив по переходу на водородное топливо. В Европе компания Alstom

завершила 18-месячные испытания двух поездов в Германии в 2020 г., а также испытания в Нидерландах, Австрии и Италии[13]. В 2021-2022 гг. введены в эксплуатацию, по меньшей мере, 41 единицы в Германии[14] и 6 единиц в Италии. Другие европейские компании во Франции[15], Германии[16], Испании[17] и Великобритании[18] начали сотрудничество с Alstom или разрабатывают и испытывают собственные модели поездов на топливных элементах с целью замены дизельных поездов на неэлектрифицированных маршрутах. За пределами Европы такие страны, как Китай, Корея, Япония, Канада и США, также проявляют интерес к поездам на водородных топливных элементах. Помимо пассажирских поездов, на разных стадиях разработки и внедрения находятся водородные трамваи и магистральные локомотивы. Ожидается, что водородные поезда в основном заменят дизельные линии, которые дорого электрифицировать из-за относительно низкой загрузки.

Морской транспорт

В морском секторе Международная морская организация имеет цели по декарбонизации морского топлива, в том числе посредством расширенного применения водорода и аммиака[19]. Хотя водородные топливные элементы были продемонстрированы на нескольких судах прибрежного плавания и судах малой дальности с начала 2000-х гг., ни одно из них пока не является коммерчески доступным. Топливо на основе водорода, особенно аммиака, также может применяться на больших океанских судах. Основные участники

[13] Successful year and a half of trial operation of the world's first two hydrogen trains, next project phase begins, 2020 Alstom // Официальный сайт Alstom.com URL: https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/5/successful-year-and-half-trial-operation-worlds-first-two-hydrogen)

[14] Trains go green: focus on battery and hydrogen, Alstom // Официальный сайт Alstom.com URL: https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/2/trains-go-green-focus-battery-and-hydrogen)

[15] A pioneering order for hydrogen trains, SNCF // Официальный сайт SNCF.com URL: https://www.sncf.com/en/commitments/cse-priorities/sncf-accelerates-hydrogen-train

[16] Mireo Plus decarbonises Europe's railways, Siemens // Официальный сайт Mobility.siemens.com URL: https://www.mobility.siemens.com/global/en/company/newsroom/specialist-articles/mireo-plus-decarbonises-europes-railways.html (

[17] Europe selects the consortium led by caf for the development of a hydrogen train prototype, 2020, CAF Siemens // Официальный сайт CAF.net URL: https://www.caf.net/en/sala-prensa/nota-prensa-detalle.php?e=316)

[18] HydroFLEX Hydrogen Train, 2019, Railway Technology // Официальный сайт Railway-technology.com URL: https://www.railway-technology.com/projects/hydroflex-hydrogen-train/

[19] Initial IMO GHG Strategy, Международная морская организация // Официальный сайт IMO.org URL: https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx

отрасли объявили о планах по разработке морских двигателей, работающих на 100% аммиачном топливе уже в 2024 г.[20]

Водород в авиации

Необходимо отметить также ряд инициатив в области использования водорода в авиации. В 2020 г. компания Airbus обнародовала план разработки новых концепций водородных самолетов, рассчитанных на 200 пассажиров и дальность полета 3,700 км, с целью создания коммерческого самолета к 2035 г.[21] Компания Boeing недавно в партнерстве с Австралийской организацией научных и промышленных исследований Содружества опубликовала дорожную карту по использованию водорода в авиационной промышленности, в которой рассматриваются возможности применения водорода в самолетах и аэропортах[22]. Небольшие компании, такие как ZeroAvia и Universal Hydrogen, также работают над созданием водородных самолетов для полетов на короткие расстояния. Хотя прямое использование водорода в коммерческой авиации, по оценкам экспертов, не станет коммерчески целесообразным до середины 2030-х гг. или позже, использование синтетического керосина на основе водорода в качестве топлива для существующих самолетов может получить распространение к 2030 г. Фактически, компания KLM осуществила первый полет на синтетическом керосине в Нидерландах в феврале 2021 г[23].

Водород в электрогенерации

Как отмечалось ранее, на текущий момент водород имеет лишь незначительное присутствие в электроэнергетическом секторе. Очень

[20] Wärtsilä launches major test programme towards carbon-free solutions with hydrogen and ammonia, 2021, Wärtsilä Corporation // Официальный сайт Wartsila.com URL: https://www.wartsila.com/media/news/14-07-2021-wartsila-launches-major-test-programme-towards-carbon-free-solutions-with-hydrogen-and-ammonia-2953362

[21] Towards the world's first zero-emission commercial aircraft, Airbus // Официальный сайт Airbus.com URL: https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe

[22] A roadmap for hydrogen in the aviation industry, CSIRO // Официальный сайт CSIRO.au URL: https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Energy/hydrogen-commercial-aviation

[23] World first in the Netherlands by KLM, Shell and Dutch ministry for Infrastructure and Water Management: first passenger flight performed with sustainable synthetic kerosene, KLM // Официальный сайт KLM.com URL: https://news.klm.com/world-first-in-the-netherlands-by-klm-shell-and-dutch-ministry-for-infrastructure-and-water-management-first-passenger-flight-performed-with-sustainable-synthetic-kerosene/

немногие страны поставили четкие цели по использованию водорода или топлива на основе водорода для электрогенерации. Япония является одним из немногих исключений: ее цель – достичь 1 ГВт энергетических мощностей на водороде к 2030 г., что соответствует годовому потреблению водорода в размере 0,3 млн т, а в более долгосрочной перспективе этот показатель возрастет до 15-30 ГВт (5-10 млн т)[24], Корея в своей «дорожной карте» по водородной энергетике обозначила цель достичь 1,5 ГВт установленных мощностей топливных элементов в энергетическом секторе к 2022 г. и 15 ГВт к 2040 г[25]. Ряд других стран также признали в своих национальных стратегиях в области водорода потенциал водорода как низкоуглеродного варианта для производства электроэнергии и тепла, позволяющего обеспечить гибкость в энергосистемах с высокой долей переменной возобновляемой энергии. Сегодня поршневые газовые двигатели могут работать с газами с содержанием водорода до 70%, а испытания двигателей, работающих на чистом водороде, были успешно завершены. Поставщики газовых турбин уже имеют значительный опыт сжигания водородсодержащих топлив, причем некоторые небольшие установки работают на топливе с долей водорода более 90% на нефтеперерабатывающих заводах и в химической и нефтехимической промышленности. Ведутся НИОКР по разработке газовых турбин с сухим подавлением NOx, способных работать на 0-100% водорода, смешанного с природным газом. В 2020 г. в Японии была проведена успешная проверка технологии сжигания 100% водорода в газовых турбинах DLN мощностью 1 МВт[26].

Водородопроводы и водородные проекты в нефтетранспортных компаниях

[24] Стратегический документ Японии в области водорода URL: https://ewbc.infocreate.co.jp/ewbc/_pt_pdf.html?&id=0.6910614200935603&siteId=003_meti#!lang=ja&file=https%3A%2F%2Fwww.meti.go.jp%2Fpress%2F2018%2F03%2F20190312001%2F20190312001-1.pdf

[25] HYDROGEN ECONOMY Roadmap of Korea, Ministry of Trade, Industry and Economy KLM // Официальный сайт Wixstatic.com URL: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_fc2f37727595437590891a3c7ca0d025.pdf

[26] World's First Successful Technology Verification of 100% Hydrogen-fueled Gas Turbine Operation with Dry Low NOx Combustion Technology, 2020, New Energy and Industial Technology Development Organization // Официальный сайт NEDO.go.jp URL: https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100427.html

В США уже порядка 2,5 тыс. км водородопроводов сделанных из высокопрочной стали (при определенном давлении и прочности стали не вызывает охрупчивания). В перспективе производство труб из усиленных полимеров.

В ФРГ планируют строительство ветки водородопроводов (порядка 6000 км). В Европе уже появилась система сертификации водородопроводов (Сертифицируют DNV и TUV). Планируется строительство первого в истории трансграничного водородопровода между ФРГ и Норвегией (была встреча Олафа Шольца и Йонаса Стере). В краткосрочной перспективе планируется создать водородопровод между Испанией и Францией (H2Med).

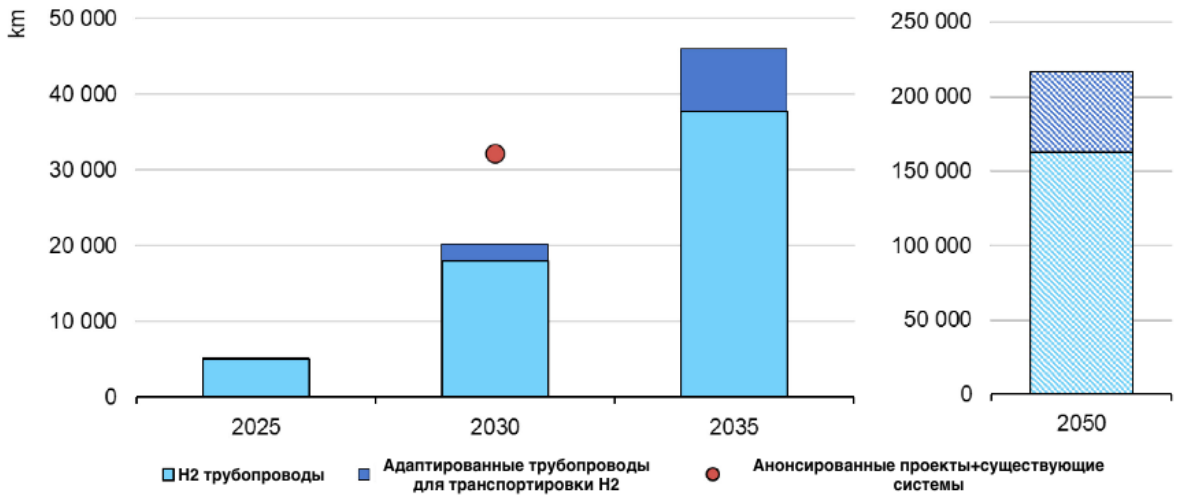


Рисунок 5 – Развитие водородопроводной системы

По данным МЭА, когда транспортировка водорода по трубопроводам достигнет эффекта масштаба (~100 килот в год [кт/год] для 20-дюймового трубопровода и ~2 000 кт/год для 48-дюймового трубопровода, работающего при 75% проектной мощности и давлении 50-80 бар), она станет самым дешевым вариантом транспортировки водорода на расстояние до 2 000-2 500 км, особенно в случае использования переоборудованных трубопроводов. Трубопроводы большого диаметра могут быть дешевле на больших расстояниях, но их строительство более сложное, особенно если они пересекают разные юрисдикции.

Некоторые регионы и страны уже работают над нормативно-правовыми изменениями, необходимыми для развертывания специализированной водородной инфраструктуры. В декабре 2021 г. Европейская комиссия приняла законодательное предложение о пересмотре Газовой директивы ЕС 2009 г., предложив пакет мер по развитию рынков водорода и декарбонизированного газа, который направлен на поддержку создания специализированной водородной инфраструктуры. В марте 2023 г. министры энергетики ЕС согласовали позицию Совета, и после достижения соглашения с Европейским парламентом должны быть официально приняты законодательные акты. Предложение водородного пакета направлено на развитие конкурентных рынков водорода, разделение передачи водорода и создание ряда стимулов для перепрофилирования газовой инфраструктуры, а также на привлечение инвестиций в трансграничную инфраструктуру.

Бельгия уже имеет разветвленную водородную сеть, соединяющую Францию и Нидерланды, протяженностью около 600 км (крупнейшая сеть в Европе и вторая в мире после США), принадлежащую компании Air Liquide. В Бельгии был принят первый в мире закон о транспортировке водорода по трубопроводам, который вступает в силу в августе 2023 г. Этот закон направлен на регулирование сетей передачи водорода, устанавливает критерии для назначения единого оператора системы передачи водорода и возлагает на него различные обязанности, включая стратегическое планирование, обеспечение свободного и недискриминационного доступа к сети и гарантию качества транспортируемого водорода.

В мае 2023 г. правительство Дании выбрало государственные компании Energinet и Evida в качестве владельцев и операторов предстоящих водородных трубопроводов Дании. Это решение последовало за тендером Power-to-X, который Дания объявила в апреле 2023 г. Правительство также объявило о своем намерении представить предложение по финансированию сети передачи водорода к концу 2024 г.

В августе 2023 г. правительство Великобритании по итогам консультаций опубликовало предложения по бизнес-моделям водородного транспорта. В предложениях предлагается модель регулируемой базы активов наряду с механизмом внешнего субсидирования на ранних этапах, что позволит избежать очень высоких транспортных расходов, когда сеть еще не полностью используется, и в то же время предотвратить чрезмерную прибыль для разработчиков.

В Европе в инициативе «Европейская водородная магистраль» участвуют 33 оператора газовой инфраструктуры из 25 стран-членов ЕС, а также Норвегии, Швейцарии и Великобритании. Эта инициатива предусматривает создание к 2030 г. панъевропейской сети водородных трубопроводов протяженностью 33 000 км, основанной, по возможности, на перепрофилированных газопроводах.

За пределами Европы первый трансрегиональный водородный трубопровод Китая включен в План реализации строительства национальной нефтегазовой сети. Он будет транспортировать водород из Уланкаба (северокитайский автономный район Внутренняя Монголия) в Пекин, протяженностью более 400 км и мощностью 100-500 тыс. т в год. В 2023 г. государственная корпорация China Petroleum Pipeline Engineering Corporation предположила, что к 2050 г. стране может понадобиться 6000 км водородных трубопроводов. В Омане Министерство энергетики заявило, что первоначально инфраструктура водородных трубопроводов будет располагаться вокруг портов на юге страны, возможно, с подключением к близлежащим соляным кавернам, а позже к сети трубопроводов могут быть подключены другие северные города, в том числе Маскат. В июне 2023 г. компания OQ Gas Networks, оператор газотранспортной системы Омана, подписала меморандум о взаимопонимании с компанией Hydrogen Oman (Hydrom), чтобы изучить возможность развития водородной сети.

2. Анализ действующих проектов в области производства водорода из угля

По результатам исследований было выявлено, что происходит процесс снижения спроса на уголь на мировом рынке ТЭК. Отдельно необходимо отметить существенное снижение спроса на уголь в странах ЕС, что связано с исключением данного источника из энергобаланса. Это связано с реализацией Парижского соглашения и целей устойчивого развития ООН. Большинство стран переходят к низкоуглеродной экономике и исторические крупные потребители угля трансформируют сектор угольной электрогенерации за счет использования природного газа. Таким образом возникает потребность в развитии глубокой переработки угля для рационального и экологически чистого использования достаточно крупных запасов.

Страны, исторические крупные потребители и производители угля, такие как Австралия, Китай, Япония активно развивают технологии по производству водорода из угля в рамках перехода к низкоуглеродной экономике.

Производство водорода из угля также известно как производство водорода (H2) газификацией угля, включая угольный газ из угля и пара, процесс сероочистки, конверсию газа, очистку водорода с помощью адсорбции при переменном давлении (КЦА), рециклирование воды при газификации. Уголь или кокс реагирует с водяным паром при высокой температуре с образованием газа, в основном содержащего водород (H2), оксид углерода (CO) и диоксид углерода (CO2). Затем газ смешивается с водяным паром после охлаждения, удаления пыли и сероочистки и проводят реакцию сдвига. При этом большая часть окиси углерода преобразуется в водород (H2) и углекислый газ (CO2), а затем превращается в газ. Газ сдвига очищается до газообразного водорода (H2 с высокой чистотой посредством адсорбции при переменном давлении). Схематично процесс производства водорода из угля выглядит следующим образом (см. Рисунок 6).

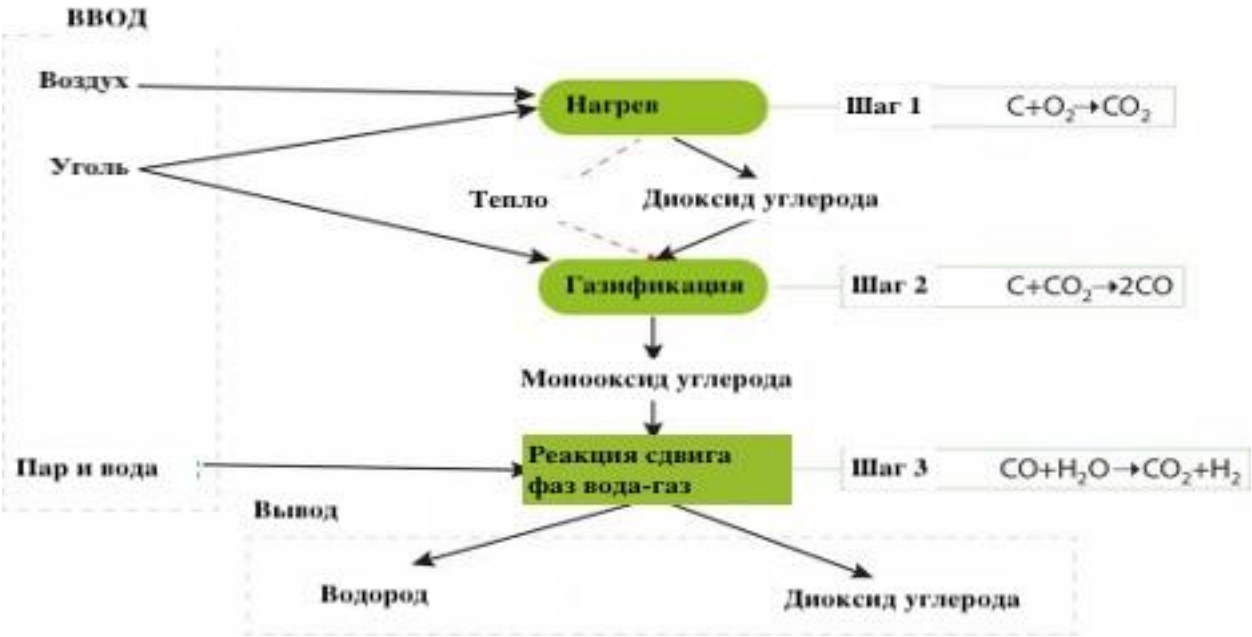


Рисунок 6 – Производство водорода из угля

В рамках данного подпункта будут представлены действующие проекты по производству водорода из углеводородов, а также проекты, где водород производится для промышленного использования, или в качестве элемента конечного продукта.

Среди текущих проектов стоит выделить следующие:

1. Air Liquid (Франция)[27] – производство водорода из метана в Порт Жером.
2. Sapio – Mantova (Италия) – Производство водорода из природного газа для медицины, химической промышленности, транспорта.
3. Blue but better (Canada Net-zero Hydrogen Energy Complex), phase 1 (Канада) (15) - Производство водорода из метана и ПНГ.
4. BayoTech - St Louis Hub (США) – Завод по производству водорода из метана для снабжения грузовиков компании.
5. Shanghai Chemical Industry Park Industrial Gases (KHP).

Среди проектов по производству водорода выделяются заводы по производству водорода из угля. Страны, исторические крупные потребители

[27] МЭА. База данных проектов в области производства водорода и водородной инфраструктуры. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database

и производители угля, такие как Австралия, Китай, Япония активно развивают технологии по производству водорода из угля в рамках перехода к низкоуглеродной экономике.

Интересным является коммерческий проект по производству водорода из угля в Австралии. Это международный инвестиционный с участием таких компаний, как AGL и Jpower. Проект реализован в Хастингс порт в штате Виктория. Ключевое преимущество проекта – 1 мощность завода в объеме 225 тыс. т водорода в год с возможностью улавливания CO2 в объеме 1.8 млн т год.

Среди представленных проектов можно выделить HySTRA HESC. Проект нацелен на создание водородной экономики между Австралией и Японией. Проект включает объекты по производству водорода из угля мощностью 281 тыс. т в год.

В части проектов по производству водорода из углеводородов выделяются проекты, где водород выступает в качестве элемента конечного продукта, или сырья для производства удобрения или нефтехимии. Среди таких проектов можно выделить:

1. Shell (Нидерланды) – Комплексный НПЗ компании по производству авиационного топлива и дизеля из отходов. Параллельно производству биотоплива на заводе установлен электролизер (200 МВт), а также установка по производству водорода из легких углеводородных газов (паровой риформинг). Общая планируемая мощность 2757 тыс. т в год.

2. Great Plains Synfuel Plant and Weyburn-Midale (США) (2) – Комплексный завод по производству метана из угля с побочным производством водорода. Уголь проходит процесс газификации с формированием синтез-газа. Синтез-газ проходит реакцию с участием катализатора на основе никеля. По результатам процесса формируются CO2, H2, CH4. Затем происходит сепарация газов.

3. Coffeyville fertilizer plant (США) – Завод производит аммиак и удобрения для сельскохозяйственных нужд. Компания владеет собственным

НПЗ. В результате нефтепереработки образуется нефтяной кокс, который подвергается процессу газификации с образованием синтез-газа, насыщенного водородом. Далее из синтезгаза производятся аммиак и азотные удобрения для сельского хозяйства.

4. Air Products (Техас, США) – промышленный объект компании Air Products был построен для обеспечения НПЗ Valero электроэнергией и паром. В 2007 г. в рамках модернизации добавился процесс парового риформинга метана, который используется для производства электроэнергии. Электричество, водород (117 тыс. т/год) и пар необходимы НПЗ для производства качественного низкосернистого топлива.

5. Scotford Upgrader (Канада) – завод по очистке битума из нефтяного песка с применением водорода. Из нефтедобывающей провинции Альберта поставляется битум и иные разновидности тяжелой нефти из нефтяных песков, которые подвергаются очистке для дальнейшего производства рыночных нефтепродуктов. Ключевой катализатор – водород. Водород производится путем парового риформинга метана.

6. North West Sturgeon refinery (Канада) – НПЗ, производящий низкосернистые сорта топлив, отходы производства в т.ч. нефтяной кокс применяется для производства водорода путем газификации, создания синтез газа и выделения водорода на основе никелевого катализатора.

7. Sinopec Qilu Petrochemical CCS (КНР)– крупный объект компании изначально построен рядом с действующим НПЗ. Sinopec фокусируется на увеличении количества заправок для водородного и электрического транспорта. Для этой цели НПЗ модернизирован в промышленный кластер по производству топлива, синтетического топлива, утилизации углерода и углекислого газа (для дальнейшего использования на месторождениях в рамках повышения нефтеотдачи пластов). Водород производится путем газификации угля (КНР отказывается от применения угля, запасы дешевые).

8. Karamay Dunhua Oil Technology CCUS EOR Project (КНР) – нефтехимический завод по коммерческому использованию углекислого газа и производству водорода для повышения нефтеотдачи пласта.

3. Определение преимуществ и недостатков технологий производства водорода из угля, по сравнению с другими способами производства водорода

Таблица 1 - Анализ технологий на основе водородной энергетики

№ п/п	Сегмент	Технология	Компании	Техническая информация	Уровень зрелости
1	2	3	4	5	6
1	Производство водорода	Электролиз (ALK)	BP, Shell, Iberdrola, Air Liquid, HARP System, Woikoski, Pamesa, Etogas, Total Energies, Chevron, Vårgårda Bostäder	Вода (H20) разлагается на водород и кислород под действием электроэнергии. Щелочной электролиз воды — это тип электролизера, который характеризуется наличием двух электродов, работающих в жидком щелочном электролите. Обычно используется раствор гидроксида калия (KOH) или гидроксида натрия (NaOH) в концентрации 25-40 масс. Эти электроды разделены мембраной, которая отделяет газы-продукты и переносит гидроксид-ионы (OH-) от одного электрода к другому.	Высокая, технологии реализованы и применяются
		Электролиз (PEM)	Iberdrola, Air Liquid, HYBRIT, Plug Power, Air Products, ATCO,	Вода (H20) разлагается на водород и кислород под действием электроэнергии. В электролизере с полимерной электролитной мембраной (ПЭМ) электролит представляет собой твердый специализированный полимерный материал. Вода вступает в реакцию на аноде с образованием кислорода и положительно заряженных ионов водорода (протонов). Электроны проходят через внешнюю цепь, а ионы водорода избирательно перемещаются через ПЭМ к катоду. На катоде ионы водорода соединяются с электронами из внешней цепи и образуют газообразный водород. Реакция на аноде: $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$ Реакция на катоде: $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$	Высокая, технологии реализованы и применяются

		Паровая конверсия метана	Shell, BP, INEOS, ExxonMobil, Mitsui, Pembina, CNPC, Indian Oil, Enbridge, Linde,	При температурах 700-1000°C метан (CH4) вступает в реакцию с водяным паром в присутствии катализатора, давая на выходе CO, H2 и небольшие объемы CO2. Далее CO реагирует с водяным паром с последующим образованием H2 и CO2.	Высокая, технологии реализованы и применяются
		Производство водорода из угля	AGL, JPower, Suncor, Sinopec, CNPC, HESC	Исходное сырье реагирует с газифицирующим агентом (O2, воздух или водяной пар) при высоких температурах давая на выходе CO, H2 и другие примеси. CO вступает в реакцию с водяным паром с последующим образованием CO2 и H2.	Высокая, технологии реализованы и применяются. Реализован 1 крупный коммерческий проект

Структурный анализ данных МЭА[28] и Водородного Совета[29] показывают, что технологии производства водорода вне зависимости от источника развиты в высокой степени. Технологии уже внедрены и масштабированы. Учитывая, что сегодня существует около 2,5 тыс. проектов по водороду[30], можно сделать вывод о технологической готовности водородной энергетики и высоком уровне зрелости систем производства водорода.

Тем не менее, наиболее значимый фактор для развития водорода сегодня является его цена. Данные с отчетов МЭА[31] показывают, что для масштабной популяризации водорода необходимо снижение стоимости его производства. Данные на текущий момент отражены на рисунке ниже.

[28]МЭА. Водород. URL: https://www.iea.org/energy-system/low-emissions-fuels/hydrogen
[29] Водородный совет. URL: https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2024/
[30] МЭА. База данных проектов в области производства водорода и водородной инфраструктуры. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database

[31] МЭА. Водородная энергетика, отчет. URL: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024



Рисунок 7. Стоимость водорода по источнику (USD/кг)

На текущий момент стоимость производства водорода из угля наиболее низкая, а стоимость производства «зеленого» водорода (т.е. из ВИЭ) наиболее высокая. Большинство стран выстраивают свою водородную стратегию на постулате эксклюзивного продвижения зеленого водорода в качестве единственной опции, при этом ряд стран, которые исторически являются добытчиками угля активно развивают такие проекты и выше в отчете представлены коммерческие проекты по производству водорода из угля.

Техническим преимуществом производства водорода из угля является технический процесс. Побочным результатом производства водорода из угля может быть сорбент, который впоследствии может применяться для очистки нефти и нефтепродуктов, воды и др.

С учетом стоимости изначального сырья, производство водорода из угля является наиболее экономически эффективным способом, а учитывая общемировую тенденцию по отказу от угля, в качестве энергоресурса, данный способ является эффективной утилизацией запасов.

4. Рекомендации по акселерации производства «коричневого» водорода в Российской Федерации

В феврале 2023 г. Межведомственной рабочей группой по развитию водородной энергетики в Российской Федерации (правительство РФ совместно с ПАО «Газпром» и ГК «Росатом») была утверждена «Дорожная карта» развития высокотехнологичного направления «Водородная энергетика» на период до 2030 г. Согласно дорожной карте, к концу 2024 года промышленность РФ должна вырабатывать 200 тыс. тонн водорода в год и до 12 млн тонн к 2035 году.

Мировой рынок водорода уже активно формируется. Определены крупные производители и потребители водорода. На рынке развивающихся стран АТР формируются отрасли экономики, которые наращивают потребление водорода (например, в ряде провинций КНР масштабно используется коммерческий и грузопассажирский транспорт на водороде[32]). В ЕС реализуются масштабные проекты по использованию коммерческого транспорта на водороде, включая минивэны и грузовики[33].

Неизбежный рост спроса на водород приведет к невозможности в ряде стран производить достаточное количество топлива возобновляемым путем. Мировая экономика готовится к созданию экспортной инфраструктуры для водорода, разрабатываются и используются технологии по транспортировке водорода в баках под давлением, в криогенном состоянии, в виде примеси к природному газу и в виде жидких органических носителей. В чистом виде водород возможно транспортировать по трубопроводу (особо примечателен опыт США[34]).

[32] China Daily. Hydrogen buses. URL: https://www.chinadaily.com.cn/a/202301/11/WS63be1360a31057c47eba8e98.html

[33] Stellantis to release 4 hydrogen vans. URL: https://www.hydrogeninsight.com/transport/worlds-third-largest-automaker-to-introduce-eight-new-hydrogen-powered-van-models-in-europe/2-1-1590344?zephr_sso_ott=bXHUxH

[34] Overview of Interstate Hydrogen Pipeline Systems. URL: https://corridoreis.anl.gov/documents/docs/technical/APT_61012_EVS_TM_08_2.pdf

Российская Федерация обладает развитой экспортной инфраструктурой для поставки углеводородов. Запасы угля в Российской Федерации составляют 272 млрд. тонн, что соответствует 18% мировым запасам[35].

Экспортная инфраструктура для поставки водорода в зарубежные страны может быть развита параллельно существующей нефтегазовой. Водородопроводы возможно прокладывать параллельно действующим газо- и нефтепроводам. Опыт США показал, что также возможно перепрофилирование трубопроводов для поставки водорода. Нефтеналивные и СПГ-терминалы возможно дооснастить технологиями заправки судов водородом.

Одним из перспективных способов поставки водорода потребителям также является аммиак. Аммиак (NH3) при высоких температурах, либо при каталитической реакции (никелевый катализатор) преобразуется в водород и азот ($2NH_3 \rightleftharpoons N_2 + 3H_2$). Аммиак проще транспортировать, хранить и каталитический процесс протекает без выбросов вредных веществ в атмосферу. В мировой практике присутствует опыт реализации проектов по производству, транспортировке и хранению аммиака, в т.ч. по магистральным трубопроводам.

Помимо экспортного потенциала, водород может активно использоваться на территории страны для грузового, грузо-пассажирского и строительного транспорта.

В Российской Федерации в рамках водородного проекта Сахалин поставлены 3 130-тонных самосвала БЕЛАЗ на водороде. Силовая установка состоит из топливных ячеек мощностью 200 кВт и аккумуляторных батарей емкостью 250 кВт.ч. Грузоподъемность – 130 тонн. В компании посчитали, что эксплуатационные расходы такого самосвала в течение жизненного цикла будут на 40-50% меньше, чем у аналогичной дизельной машины. В

[35] Заместитель министра энергетики: российские запасы угля обеспечат энергетику на тысячелетие. URL: https://business-magazine.online/fn_1686883.html#:~:text=Россия%20обладает%20достаточными%20запасами%20угля%20для%20поддержания,энергетики%20РФ%20Дмитрий%20Исламов%20в%20интервью%20ТАСС.

2026 КАМАЗ предполагает представить собственную линейку минивэнов на водороде.

Водород является удобным источником электроэнергии для удаленных объектов. В мировой практике водород используется в качестве источника бесперебойного аварийного энергоснабжения для ЦОД[36], а также возможно использование водорода в качестве источника электроэнергии для портативного оборудования[37].

Необходимо раскрыть перспективы производства водорода из угля. Конкурентом водорода из угля может выступать природный газ. Паровой риформинг метана активно применяется в зарубежных проектах. В мировой практике реализованы около 20 коммерческих проектов[38] по производству водорода из природного газа. Тем не менее, количество способов производства водорода не должно формировать внутреннюю конкуренцию. Из данных рисунка 7 видно, что наиболее дешевыми способами является производство водорода из угля, газа и лишней электроэнергии от АЭС. Все три способа являются перспективными, но производство водорода из угля в РФ имеет определенные экономические преимущества:

1. Себестоимость производства;
2. Использование избыточных запасов угля;
3. Возможность производства полезных сопутствующих продуктов (например, сорбент на основе углерода).

Акселерация производства водорода из угля для задач экспорта водорода, так и внутреннего потребления необходима для реализации целей Концепции развития водородной энергетики в РФ, а также для выполнения задачи по обеспечению 20% мировой потребности в водороде.

[36] Microsoft hydrogen fuel cell power system. URL: https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/hydrogen-fuel-cells-could-provide-emission-free-backup-power-at-datacenters-microsoft-says/

[37] Hydrogen Power Generators. URL: https://hyfindr.com/en/shop/products/category/systems/hydrogen-power-generators

[38] МЭА. База данных проектов в области производства водорода и водородной инфраструктуры. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database

Рекомендации по акселерации производства водорода из угля в России

1. Создание стимулирующей нормативно-правовой базы. Для ускоренного развития водородной энергетики на основе угля требуется разработка и принятие специализированных нормативных актов, регулирующих весь жизненный цикл производства водорода — от добычи угля до утилизации углеродных побочных продуктов. Необходимо:

- включение углехимического водорода в перечень приоритетных направлений государственной поддержки;
- внедрение квот и стандартов выбросов CO_2 с учетом технологий улавливания и хранения углерода (CCS/CCUS);
- разработка методик сертификации углеродно-нейтрального водорода («серого» с улавливанием CO_2 , переходящего в «голубой»).

2. Технологическая модернизация и внедрение CCUS. Для снижения углеродного следа водородных производств на основе угля необходимо обеспечить масштабное внедрение технологий улавливания, утилизации и хранения углерода. Рекомендуется:

- поддерживать разработку интегрированных установок газификации угля с последующим улавливанием CO_2 ;
- обеспечить технологическую синергию между углехимическими предприятиями и геологоразведочными структурами для создания хранилищ CO_2 в истощённых месторождениях нефти и газа;
- организовать пилотные проекты «чистого» производства водорода с государственной поддержкой и участием промышленных партнеров.

3. Формирование кластеров водородной углехимии. Развитие водородной отрасли на базе угля требует создания региональных промышленных кластеров, сочетающих добычу угля, переработку, производство водорода и инфраструктуру для транспортировки и хранения

CO_2 . Приоритетными регионами могут быть: Кемеровская область, Хакасия, Иркутская область, Республика Саха. Необходимо:

- стимулировать локализацию оборудования для газификации и CCS;
- обеспечить синхронизацию инвестиционных планов ТЭК, химической и транспортной отраслей;
- разработать территориальные схемы развития водородной инфраструктуры.

4. Финансовая поддержка и экономические стимулы. Для снижения инвестиционных рисков и обеспечения технологического перехода к «чистому» производству водорода необходимы:

- субсидии на модернизацию оборудования углехимических заводов под водородное производство;
- налоговые льготы на капитальные затраты в рамках программ технологической трансформации;
- гарантированные государственные закупки водорода с низким углеродным следом, включая применение на транспорте и в энергетике.

5. Развитие научно-исследовательского и кадрового потенциала. Для создания устойчивой технологической базы углеводородной водородной энергетики необходимо:

- поддержка исследовательских программ в области катализа, термохимической переработки угля, газоразделения и улавливания CO_2 ;
- стимулирование кооперации между университетами, академическими институтами и промышленными предприятиями;
- создание федеральной программы подготовки специалистов по углеродно-нейтральным технологиям.

6. Выход на экспортные рынки с углеродно-нейтральным водородом. Учитывая перспективы глобального спроса на «голубой» водород, необходимо:

- заключение двусторонних соглашений с заинтересованными странами по поставкам водорода;
- стандартизация водорода по углеродному следу в соответствии с международными нормами;
- создание экспортной логистики (жидкий водород, аммиак, LOHC) с привязкой к угольным регионам России.

7. Мониторинг и оценка эффективности. Создание системы оценки эффективности реализуемых мер и инвестиций, включая:

- регулярную верификацию углеродного баланса производств;
- аудит технологических установок на предмет соответствия стандартам «низкоуглеродного» водорода;
- разработку индикаторов эффективности региональных кластеров и инвестиционных программ.

При реализации указанных рекомендаций возможно формирование устойчивой отрасли по производству низкоуглеродного водорода из угля, способной стать частью энергетического перехода России и обеспечить экспортноориентированную стратегию в условиях декарбонизации мировой экономики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы проведено комплексное кросс-дисциплинарное исследование технологий и проектов по производству водорода из угля. По результатам исследования разработаны рекомендации по акселерации производства «коричневого» водорода в Российской Федерации. Для реализации целей работы были выполнены следующие задачи:

1. Исследование перспектив развития водородной энергетики в мире.

2. Анализ потенциального спроса на водород по регионам;

3. Анализ действующих проектов в области производства водорода из угля;

4. Определение преимуществ и недостатков технологий производства водорода из угля, по сравнению с другими способами производства водорода;

5. Разработка рекомендаций по акселерации внедрения технологий производства водорода из угля.

В рамках 1 раздела приведен анализ потенциала водорода в качестве глобального источника энергии, определены перспективы роста спроса, а также ключевые потребители водорода на текущий момент, а также представлено региональное распределение спроса на водород.

В рамках раздела 2 проведет структурный анализ действующих проектов по производству водорода, представлена техническая информация, а также данные по производству конечного продукта. Приведена информация по технической части процесса производства водорода из угля.

В рамках раздела 3 приведено сравнение технологий производства водорода с производством водорода из угля с определением технической зрелости технологий, а также в части стоимости производства.

В рамках раздела 4 разработаны рекомендации по акселерации производства водорода из угля по следующим блокам: совершенствование нормативно-правовой базы, меры экономической поддержки со стороны

государства, создание водородных кластеров, направления экспорта, наращивание научно-технологических компетенций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Водородный совет. URL: https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2024/

2. Заместитель министра энергетики: российские запасы угля обеспечат энергетику на тысячелетие. URL: https://business-magazine.online/fn_1686883.html#:~:text=Россия%20обладает%20достаточными%20запасами%20угля%20для%20поддержания,энергетики%20РФ%20Дмитрий%20Исламов%20в%20интервью%20ТАСС.

3. МЭА. База данных проектов в области производства водорода и водородной инфраструктуры. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database

4. МЭА. База данных проектов в области производства водорода и водородной инфраструктуры. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database

5. МЭА. База данных проектов в области производства водорода и водородной инфраструктуры. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database

6. МЭА. База данных проектов в области производства водорода и водородной инфраструктуры. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database

7. МЭА. База данных проектов в области производства водорода и водородной инфраструктуры. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database

8. МЭА. Водород. URL: https://www.iea.org/energy-system/low-emissions-fuels/hydrogen

9. МЭА. Водородная энергетика, отчет. URL: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024

10. Официальный сайт Минпромторга. Атлас водородных проектов России. URL: https://minpromtorg.gov.ru/storage/797ced43-043d-4b4e-b72b-

3d36984adbc7/documents/663f0df0-8439-4152-a8ea-2c4d0d36ffe4/008cee19-8ce0-4107-9013-74288ef21298.pdf

11. Официальный сайт МЭА. Водород. URL: https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen

12. Официальный сайт РЭА Минэнерго РФ. URL: https://rosenergo.gov.ru/press-center/news/eksperty-rea-minenergo-rossii-podgotovili-novyy-daydzhest-otechestvennykh-nauchno-tekhnicheskikh-raz/

13. Стратегический документ Японии в области водорода URL: https://ewb
c.infocreate.co.jp/ewbc/_pt_pdf.html?&id=0.6910614200935603&siteId=003_meti#!lang=ja&file=https%3A%2F%2Fwww.meti.go.jp%2Fpress%2F2018%2F03%2F20190312001%2F20190312001-1.pdf

14. A pioneering order for hydrogen trains, SNCF // Официальный сайт SNCF.com URL: https://www.sncf.com/en/commitments/cse-priorities/sncf-accelerates-hydrogen-train

15. A roadmap for hydrogen in the aviation industry, CSIRO // Официальный сайт CSIRO.au URL: https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Energy/hydrogen-commercial-aviation

16. China Daily. Hydrogen buses. URL: https://www.chinadaily.com.cn/a/202301/11/WS63be1360a31057c47eba8e98.html

17. Europe selects the consortium led by caf for the development of a hydrogen train prototype, 2020, CAF Siemens // Официальный сайт CAF.net URL: https://www.caf.net/en/sala-prensa/nota-prensa-detalle.php?e=316)

18. Global demand for pure hydrogen, IEA URL: https://www.iea.org/reports/hydrogen-2156

19. Global Drive to Zero. ZERO-EMISSION TRUCK AND BUS MARKET UPDATE. URL: https://globaldrivetozero.org/site/wp-content/uploads/2023/06/Final_ZETI-Report-June-2023_Final.pdf

20. Global Hydrogen Review 2021, Международное энергетическое агентство IEA // Официальный сайт IEA.org URL: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024

21. Global Hydrogen Review 2023, Международное энергетическое агентство IEA. URL: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023

22. HydroFLEX Hydrogen Train, 2019, Railway Technology // Официальный сайт Railway-technology.com URL: https://www.railway-technology.com/projects/hydroflex-hydrogen-train/

23. Hydrogen Council. Hydrogen Insights. URL: https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2024/

24. HYDROGEN ECONOMY Roadmap of Korea, Ministry of Trade, Industry and Economy KLM // Официальный сайт Wixstatic.com URL: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_fc2f37727595437590891a3c7ca0d025.pdf

25. Hydrogen Power Generators. URL: https://hyfindr.com/en/shop/products/category/systems/hydrogen-power-generators

26. IEA. Future of Hydrogen. URL: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024

27. Initial IMO GHG Strategy, Международная морская организация // Официальный сайт IMO.org URL: https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx

28. Microsoft hydrogen fuel cell power system. URL: https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/hydrogen-fuel-cells-could-provide-emission-free-backup-power-at-datacenters-microsoft-says/

29. Mireo Plus decarbonises Europe’s railways, Siemens // Официальный сайт Mobility.siemens.com URL: https://www.mobility.siemens.com/global/en/company/newsroom/specialist-articles/mireo-plus-decarbonises-europes-railways.html (

30. Overview of Interstate Hydrogen Pipeline Systems. URL: https://corridoreis.anl.gov/documents/docs/technical/APT_61012_EVS_TM_08_2.pdf

31. Stellantis to release 4 hydrogen vans. URL: https://www.hydrogeninsight.com/transport/worlds-third-largest-automaker-to-introduce-eight-new-hydrogen-powered-van-models-in-europe/2-1-1590344?zephr_sso_ott=bXHUxH

32. Successful year and a half of trial operation of the world's first two hydrogen trains, next project phase begins, 2020 Alstom // Официальный сайт Alstom.com URL: https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/5/successful-year-and-half-trial-operation-worlds-first-two-hydrogen)

33. Towards the world’s first zero-emission commercial aircraft, Airbus // Официальный сайт Airbus.com URL: https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe

34. Trains go green: focus on battery and hydrogen, Alstom // Официальный сайт Alstom.com URL: https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/2/trains-go-green-focus-battery-and-hydrogen)

35. UN ESCAP. URL: https://asiapacificenergy.org

36. Wärtsilä launches major test programme towards carbon-free solutions with hydrogen and ammonia, 2021, Wärtsilä Corporation // Официальный сайт Wartsila.com URL: https://www.wartsila.com/media/news/14-07-2021-wartsila-launches-major-test-programme-towards-carbon-free-solutions-with-hydrogen-and-ammonia-2953362

37. World first in the Netherlands by KLM, Shell and Dutch ministry for Infrastructure and Water Management: first passenger flight performed with sustainable synthetic kerosene, KLM // Официальный сайт KLM.com URL: https://news.klm.com/world-first-in-the-netherlands-by-klm-shell-and-dutch-ministry-for-infrastructure-and-water-management-first-passenger-flight-performed-with-sustainable-synthetic-kerosene/

38. World's First Successful Technology Verification of 100% Hydrogen-fueled Gas Turbine Operation with Dry Low NOx Combustion Technology, 2020, New Energy and Industial Technology Development Organization // Официальный сайт NEDO.go.jp URL: https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100427.html