

Инфраструктурный центр EnergyNet

# Перспективы России на глобальном рынке водородного топлива

Экспертно-аналитический отчет

ПЕРСПЕКТИВЫ РОССИИ НА ГЛОБАЛЬНОМ РЫНКЕ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА. ЭКСПЕРТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ. МОСКВА, 2018.

ПОД РЕДАКЦИЕЙ:

**Дмитрия ХОЛКИНА**, директора Инфраструктурного центра EnergyNet

АВТОРСКИЙ КОЛЛЕКТИВ:

**Игорь ЧАУСОВ**, ведущий эксперт Инфраструктурного центра EnergyNet, ведущий инженер Лаборатории водородной энергетики Института арктических технологий МФТИ

**Ася ТЕРТЫШНАЯ**, эксперт-аналитик Инфраструктурного центра EnergyNet

**Илья БУРДИН**, ведущий эксперт Инфраструктурного центра EnergyNet

Авторы благодарят Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО и Институт арктических технологий МФТИ за ценные советы и рекомендации.

# СОДЕРЖАНИЕ

1 Рабочая гипотеза.....	4
2 Макроэкономические сценарии глобального перехода к водородной энергетике.....	8
3 Оценка рынка водородного топлива на основе национальных программ перехода к водородной энергетике.....	12
4 Производственные возможности России .....	14
5 Технологические барьеры развития водородной энергетики.....	18
5.1 Производство водорода.....	18
5.2 Хранение и транспортировка водорода .....	21
5.3 Генерация энергии из водорода .....	23
6 Пилотный проект поставки российского водорода в Японию.....	25
7 Стратегия продвижения России на глобальный рынок водородного топлива .....	27
8 Призыв к действию .....	29

# 1 РАБОЧАЯ ГИПОТЕЗА

Аккумуляция электрической энергии в водородном цикле с целью последующих поставок водорода как энергоносителя на экспортные рынки – одно из наиболее многообещающих направлений развития рынка систем накопления энергии (СНЭ) в России<sup>1</sup>. В рамках реализации этого направления Россия может претендовать на значимую долю формирующегося глобального рынка водородного топлива. На этом рынке возможно взаимовыгодное сотрудничество России с зарубежными странами, основанное на решении специфических проблем энергетики каждой из сторон.

Развитие накопления электроэнергии в водородном цикле формирует в России на горизонте 2025 – 2035 годов рынок систем водородной энергетики 2,2 – 3,9 млрд долларов США в год и может принести после возврата инвестиций экономический эффект 1,7 – 3,1 млрд долларов США в год. Мировой рынок к 2025 году достигнет 26 млрд долларов США в год.

Рынок систем водородной энергетики представляет собой рынок продукции энергетического и химического машиностроения, используемой при накоплении электроэнергии в водородном цикле, т.е. при производстве, хранении, транспортировке водорода и выработке энергии из водородного топлива. Системы водородной энергетики можно подразделить на:

- Установки, производящие водород: генераторы водорода на основе электролизеров воды, установки риформинга метана и газификации угля и т.д.;
- Системы хранения и транспортировки водорода: сосуды высокого давления, установки глубокого холода и сжижения газов, криогенные емкости, химические реакторы и т.д.;
- Системы генерации тепловой и электрической энергии из водорода: батареи топливных элементов различных типов, водородные газовые турбины;
- Периферийное оборудование и установки: системы водоподготовки, компрессоры, редукторы, ректификационные колонны, теплообменники, испарители и другие не специфические химические аппараты и т.д.;
- Строительные конструкции, здания и сооружения производственных предприятий, и их элементы;
- Системы и устройства обеспечения водородной безопасности, включая различные датчики и сенсоры.

---

<sup>1</sup> См. доклад «Рынок систем накопления электроэнергии в России: потенциал развития», подготовленный командой Инфраструктурного центра EnergyNet при поддержке Роснано и экспертного сообщества – [https://www.csr.ru/wp-content/uploads/2018/09/Condenses\\_System\\_Markets\\_Web-Fin.pdf](https://www.csr.ru/wp-content/uploads/2018/09/Condenses_System_Markets_Web-Fin.pdf)

Указанный экономический эффект от развития накопления электроэнергии в виде водородного топлива определяется в большей степени ожидаемой экспортной выручкой российских компаний от продаж этого топлива за рубежом. Таким образом, в ходе сделок на рынке систем водородной энергетики создаются экспортно-ориентированные промышленные активы, деятельность которых по производству и продаже водородного топлива создает эффект для экономики.

Формирование цепочек поставки водородного топлива в страны-импортеры этого нового энергоресурса и системы распределения водородного топлива внутри этих стран является одним из драйверов распространения Интернета энергии. Технологии водородной энергетики, использующие водород в качестве топлива, наиболее массовое распространение получают на частном и общественном транспорте, а также в распределенном энергоснабжении частных домохозяйств и коммерческой недвижимости. В связи с этим построение водородной энергетики увеличивает число пользователей распределенной энергетики, создает дополнительные ресурсы гибкости энергосистем на стороне конечных потребителей и способствует тем самым росту спроса на реализацию архитектуры Интернета энергии (IDEA).

Это направление развития рынка СНЭ предполагает создание в России промышленных активов по производству водорода на основе ресурсов электроэнергии и воды с последующим превращением произведенного водородного топлива в формы, доступные и удобные для крупнотоннажного хранения и транспортировки. Основная часть произведенного водородного топлива должна направляться на экспорт, меньшая – реализовываться на внутреннем рынке, в первую очередь, в интересах энергоснабжения удаленных и изолированных поселений и инфраструктурных объектов. Появление глобального рынка водородного топлива предполагает формирование крупнотоннажных транспортных потоков этого топлива, которое будет транспортироваться до мест его приема – «водородных» аналогах газовых хабов – с последующей доставкой до конечного потребителя. В точках приема крупнотоннажных партий водородного топлива возможно и вероятно будет происходить его регазификация с превращением топлива в ту форму, в которой оно будет использоваться потребителем. Таким образом, инфраструктура магистральной составляющей водородной энергетики представляется аналогичной инфраструктуре сжиженного природного газа (СПГ).

Россия как потенциальный производитель водородного топлива обладает рядом существенных преимуществ: огромным энергетическим потенциалом, в том числе в сфере «зеленой» энергетики, а также большими запасами пресной воды. До 25-30 ГВт мощности в энергосистеме России даже в час прохождения годового максимума потребления представляют собой резервы сверх нормативно необходимых для обеспечения надежного функционирования системы. Нереализованные возможности выработки электроэнергии, которая не была произведена в силу существенного превышения рабочей мощности энергосистемы над спросом на

мощность, в 2017 г. составил 455 млрд кВт·ч. Строительство новых генерирующих объектов безуглеродной энергетики – АЭС и ГЭС – способно при необходимости существенно расширить указанный потенциал и удовлетворить растущий спрос на водородное топливо, если начнут сбываться наиболее оптимистичные предположения относительно темпов прироста потребления водорода в мире. Например, на базе использования гидроэнергетического ресурса рек Дальнего Востока можно обеспечить годовую выработку дополнительных 294 млрд кВт·ч.

Реализация сценария развития накопления электроэнергии в водородном цикле с основной экспортно-ориентированной составляющей позволит получить следующие полезные эффекты для экономики и энергосистемы России:

1. Вывести на новый формирующийся сегмент мирового энергетического рынка конкурентоспособный по цене продукт и занять существенную долю этого рынка. Россия способна предложить водородное топливо по цене 3,38 долларов США за кг уже на рубеже 2020 – 2025 годов и претендовать на 10 – 15% мирового рынка в 2030 году.
2. Увеличить объем экспортной выручки российских компаний, прямые и косвенные доходы бюджета, способствовать ускорению экономического роста за счет создания новой отрасли энергетики. Экспортная выручка к 2035 году способна составить 1,7 – 3,1 млрд долларов США в год.
3. Повысить эффективность использования генерирующих мощностей в электроэнергетике страны, в частности, решить проблему запертых мощностей. Средний КИУМ в ЕЭС может вырасти за счет загрузки резервов производством водорода на 5 – 7% в сравнении с показателями 2017 года.
4. Повысить эффективность и снизить затраты на энергоснабжение удаленных и изолированных территорий. Затраты на энергоснабжение таких территорий могут быть потенциально снижены на 27 – 30%.
5. Создать в электроэнергетике дополнительный источник гибкости и тем самым способствовать уплотнению графика потребления электроэнергии, сглаживанию суточной и сезонной неравномерности потребления. Мощность систем накопления электроэнергии в водородном цикле в энергосистеме России может превысить 20 ГВт.
6. Сформировать спрос на электроэнергию, производимую на базе ВИЭ, и тем самым способствовать рациональному развитию ВИЭ в России и целесообразному использованию их потенциала.
7. Создать новые высокотехнологичные рабочие места в различных регионах России.

Значимая роль, которая отводится водородной энергетике в процессе энергетического перехода в Европе, Азиатско-Тихоокеанском регионе и США, подогревает спрос на дешевое, в том числе импортируемое водородное топливо.

Такое сочетание полезных эффектов порождает возможность реализации на рынке водородного топлива на время его роста стратегии «win – win»: Россия получит возможность выгодно реализовать свободные энергетические мощности, в то время как зарубежные покупатели удовлетворяют свою потребность в ресурсе для эффективной декарбонизации.

## **2 МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПЕРЕХОДА К ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

Водородная энергетика переживает в настоящее время ренессанс. Интерес крупнейших мировых экономик, промышленных компаний и инвестиционных структур к возможности создания этой принципиально новой энергетической отрасли растет. Значимым подтверждением этому стало создание в январе 2017 года Водородного совета (Hydrogen Council) – ассоциации крупнейших мировых энергетических и машиностроительных компаний, нацеленной на создание водородной энергетики в мировом масштабе. В совет входят представители европейских, американских, японских, китайских и корейских компаний.

Собственные стратегии и программы построения водородной энергетики и перехода к использованию водородного топлива на транспорте, в электро- и теплоэнергетике на национальном уровне реализуют США, ЕС, Великобритания, Япония, Китай, Южная Корея и Австралия.

Если первая волна интереса и инвестиций в водородные технологии, завершившаяся с кризисом 2008 года, была связана в основном с желанием снизить риски от дорожавших нефти и газа для экономик-импортеров энергоносителей, то возвращение водородной тематики на повестку дня сегодня вызвано происходящим в мире энергетическим переходом.

Климатическая повестка – замедление глобального потепления – и декарбонизация экономики продолжают рассматриваться как приоритетные стратегические цели в развитых экономиках. К этому процессу активно присоединяются развивающиеся экономики, особенно быстрыми темпами Китай. Крупномасштабные инвестиции в технологии и программы субсидирования применения ВИЭ привели к тому, что LCOE такой «зеленой» генерации по стоимости мощности и LCOE ветровая и солнечная энергетика вступают в ценовую конкуренцию с традиционной генерацией, в том числе в условиях отмены субсидирования.

Это означает, что доля ВИЭ с нерегулируемой выработкой в энергетическом балансе развитых и части развивающихся экономик будет расти, создавая сложности и дополнительные издержки на процессы управления и балансирования энергосистем. Декарбонизация становится важнейшим драйвером роста спроса на гибкость – возможность энергосистем подстраивать потребление под оптимальный для генерации с большой долей ВИЭ график работы.



К таким источникам гибкости относятся накопители энергии, в том числе водородные, управление спросом, распределенная и собственная генерация, согласованно управляемая инфраструктура для электромобилей. Генерация на основе водорода рассматривается в настоящее время как один из ключевых «зеленых» источников гибкости для энергосистем. Такая роль водородной энергетики налагает специфическое экологическое требование на технологии производства водорода – они должны быть безуглеродными. В связи с этим ни в одном из сценариев роста мировой потребности в водородном топливе природный газ и уголь не рассматриваются в качестве основного сырья для производства водорода.

Другим важным фактором энергетического перехода становится декарбонизация автомобильного транспорта, в первую очередь, легковых автомобилей. На рынке ожидается конкуренция более распространенных аккумуляторных электромобилей с электромобилями на водородных топливных элементах. При этом заряжаемые от сети (plug-in) электромобили, особенно с учетом распространения стандартов быстрой зарядки, без дополнительных мероприятий и сервисов по управлению графиком их зарядки создают существенные сложности для энергосистем. Это объясняется тем, что распространение заряжаемого электротранспорта не просто повышает спрос на мощность, но и приводит к значительному разуплотнению профиля потребления, а значит – к снижению эффективности использования и росту стоимости мощности. В этом отношении водородные автомобили, или электромобили с водородными топливными элементами (FCEV) за счет водородного топлива, служащего накопителем энергии для энергосистемы, своим распространением не создают проблем для энергетики.

В условиях энергетического перехода водород будет выполнять следующие основные функции:

1. Эффективная интеграция крупномасштабных генерирующих мощностей на основе ВИЭ.
2. Обеспечение энергетических потоков между регионами и секторами экономики, в части, энергетикой и химической промышленностью.
3. Предоставление гибкости и резервов мощности в энергосистемах, долгосрочное и аварийное резервирование энергосистем.
4. Декарбонизация транспорта.
5. Декарбонизация энергоснабжения промышленности и ряда базовых промышленных процессов.
6. Обеспечение сырья для химической промышленности, в первую очередь, для переработки захороненного  $\text{CO}_2$  в ценные химические продукты.
7. Декарбонизация децентрализованного теплоснабжения и горячего водоснабжения домохозяйств.

Возникающая при обеспечении этих функций потребность мировой экономики в водородном топливе может развиваться по четырем основным сценариям. На Рисунке 1 показан мировой объем потребления водорода, прогнозируемый в 2050 году по каждому из сценариев, полученный из предположения, что достигнута целевая для большинства рынков цена водорода в 2 доллара США за килограмм. Для сравнения, объем мировой торговли нефтью в 2018 году составил 1,8 трлн долларов в год<sup>2</sup>.

1. **Линейный рост.** Наиболее консервативный сценарий опирается на оценку Navigant Research потребности в водороде для автомобилей с топливными элементами и энергоснабжения домохозяйств, но в условиях конкуренции с другими решениями, составляющими технологическую основу энергетического перехода. Потребление водорода по этому сценарию достигнет 55 млн тонн в год, рынок 0,1 трлн долларов США в год.

2. **Конкурентная декарбонизация.** Умеренный сценарий, основанный на оценках компании Ecofys, предполагает предельно высокую декарбонизацию мировой экономики, достигаемую в том числе с опорой на применение технологий водородной энергетики. Водород играет важную роль в обеспечении декарбонизации и завершении энергетического перехода, но не является единственным решением ни в части перехода к безуглеродному транспорту, ни в части обеспечения гибкости в энергосистемах. Потребление водорода достигает 200 млн тонн в год, рынок составляет 0,4 трлн долларов США в год.

3. **Водородная декарбонизация.** Оптимистичный сценарий, рассмотренный IRENA, оценивает величину потребности в водороде для максимально высокой декарбонизации транспорта и энергетики, но при этом рассматривает водородную энергетику как основное и практически единственное средство такой декарбонизации. Потребление водорода достигает 930 млн тонн в год, рынок – 1,9 трлн долларов США в год и становится сравним с рынком нефти.

4. **Водородный мир.** Сценарий, предлагаемый Водородным советом, показывает предельную величину глобальной потребности в водородном топливе в условиях, когда водород становится ведущим энергоносителем для всей мировой экономики. В рамках сценария фактически предполагается, что водород становится новыми нефтью и газом, и все основные энергетические потоки в мире, которые не обеспечиваются электропередачами, осуществляются при помощи водорода. Потребление водорода достигает 1,5 млрд тонн в год, рынок – 3,0 трлн долларов США в год.

---

<sup>2</sup> При цене нефти марки Brent \$50 за баррель.

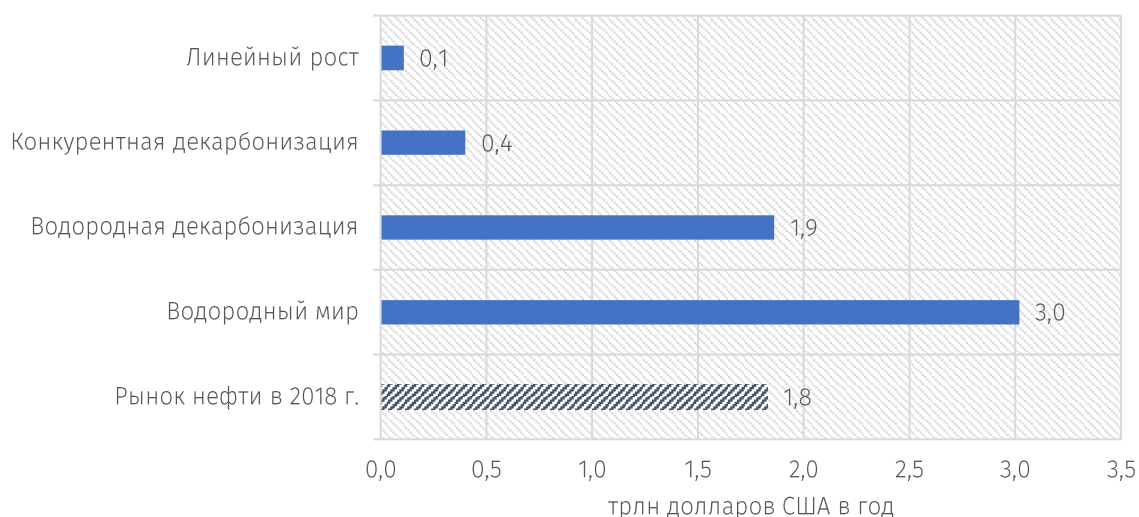


Рисунок 1. Прогнозы мирового объема торговли водородом к 2050 году, трлн долларов США в год.  
Источники: Navigant Research, Ecofys, IRENA, Hydrogen Council, IAE.

Международное энергетическое агентство и международный Водородный совет предполагают формирование не только национальных, но и глобального рынка водородного топлива. В частности, рассматривается возможность формирования газового водородного хаба в Нидерландах, который будет обслуживать потоки водорода, поступающего как с производств на базе ветрогенерации в Северном море, так и импортируемого, доставляемого морским транспортом из третьих стран. Функция хаба предполагает возможность не только потребления и распределения водорода, но и его реэкспорта в другие регионы.

### 3 ОЦЕНКА РЫНКА ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОГРАММ ПЕРЕХОДА К ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Приведенные сценарии перехода к водородной энергетике описывают предельные варианты и объемы потребления водородного топлива, значительная часть которого производится и используется в системах хранения электроэнергии в водородном цикле.

Более консервативные и реалистичные оценки объема глобального рынка энергетического водорода, показанные на Рисунке 2, получаются на основе оценки потребности в водородном топливе в случае реализации национальных программ построения водородной энергетике. В зависимости от глубины декарбонизации, достигаемой в ходе энергетического перехода, а также мировой конъюнктуры на традиционные виды топлив рынок водородного топлива растет по одному из трех сценариев:

- **Консервативный сценарий** предполагает декарбонизацию с ограничением роста среднегодовой температуры на 2 – 4°C и медленную коммерциализацию технологий водородной. Он основан на снижении показателей сценария устойчивого развития мировой энергетике, предлагаемого Международным энергетическим агентством (IEA).
- **Умеренный сценарий** предполагает декарбонизацию с ограничением роста среднегодовой температуры не выше 2°C и достаточно быструю коммерциализацию технологий водородной. Он в целом основан на сценарии устойчивого развития IEA.
- **Оптимистичный сценарий** основан на превышении показателей сценария устойчивого развития IEA и предполагает декарбонизацию с ограничением роста среднегодовой температуры на уровне 1,5 – 2°C и чрезвычайно быструю коммерциализацию технологий водородной.

В дальнейшем в качестве базового рассматривается умеренный сценарий. Цена на водородное топливо на горизонте 2025 – 2040 гг. будет снижаться с 4 до 2 тыс. долларов США за тонну.

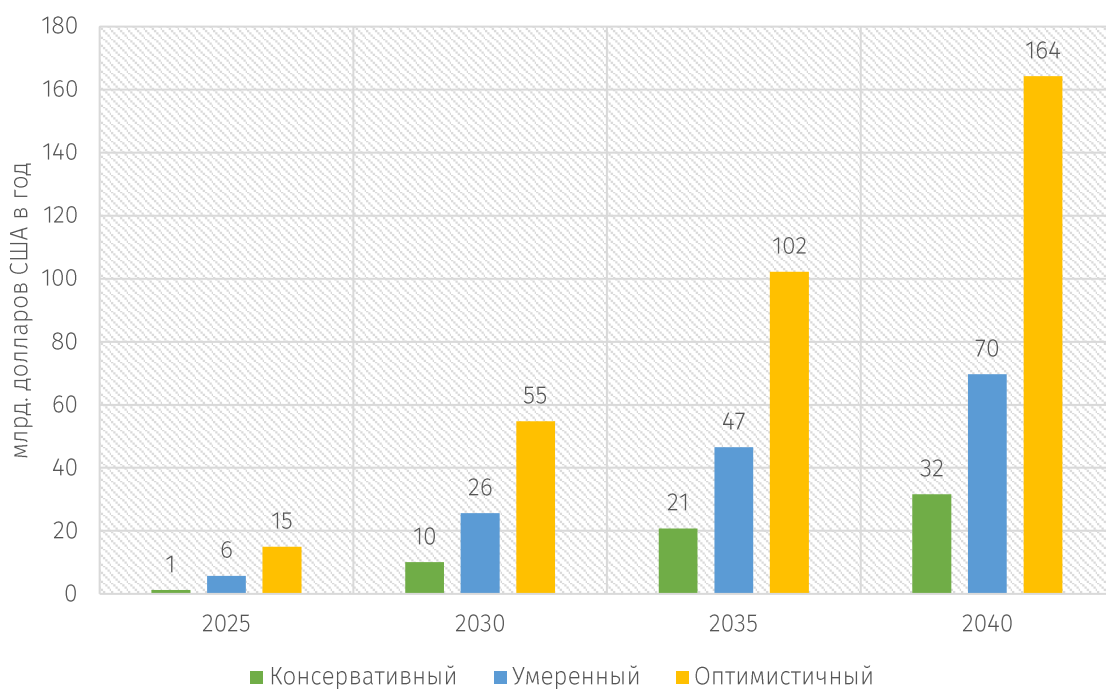


Рисунок 2. Прогноз рынка водородного топлива, млрд долларов США в год. Источник: ACIL ALLEN Consulting, ИЦ EnergyNet.

Прогноз рынка водородного топлива в физических показателях приведен на Рисунке 3. Для сравнения, производственные возможности России по накоплению электроэнергии в водородном топливе составляют 2 – 3,5 млн тонн в год.

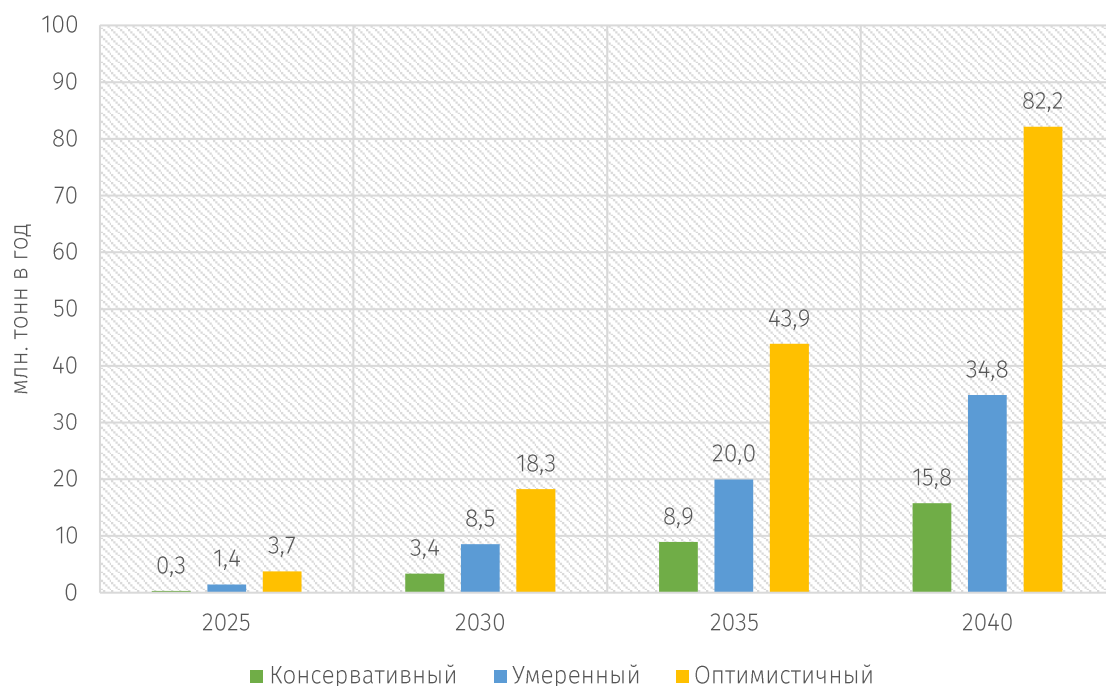


Рисунок 3. Прогноз рынка водородного топлива, млн тонн в год. Источник: ACIL ALLEN Consulting.

## 4 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РОССИИ

Российские возможности по производству водородного топлива как способа накопления электроэнергии оценены на основании величины потенциального производства электроэнергии на генерирующих объектах, по тем или иным причинам, загруженным существенно ниже их установленной мощности.

В качестве примеров таких объектов можно рассмотреть Усть-Среднеканскую ГЭС им. А.Ф. Дьякова, Кольскую АЭС и Ленинградскую АЭС. Возможности производства водорода на них показаны на Рисунке 4.

Усть-Среднеканская ГЭС установленной мощностью 570 МВт, строительство которой ведут структуры ПАО «Русгидро» на реке Колыма в Магаданской области, представляет существенный интерес с точки зрения накопления генерируемой электроэнергии в виде водорода. В настоящее время станция находится в процессе строительства и должна выйти на проектную мощность к 2024 году, но в регионе отсутствует необходимый для загрузки станции рост потребления электроэнергии.

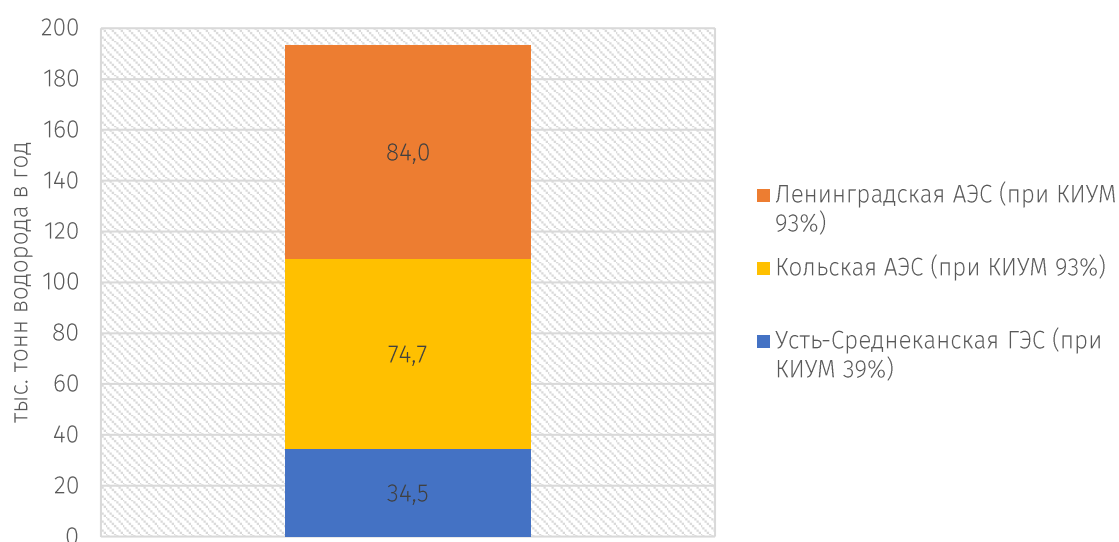


Рисунок 4. Возможности производства водорода на ряде ГЭС и АЭС, тыс. тонн в год. Источники: СО ЕЭС, АО «Концерн Росэнергоатом», ПАО «Русгидро», ЦСР Северо-Запад.

При этом Магаданская область характеризуется относительно коротким логистическим плечом до Японии – одного из наиболее перспективных рынков сбыта водорода. Возможности производства водорода оценены исходя из проектной установленной мощности станции при среднегодовом КИУМ на уровне КИУМ ГЭС ОЭС Востока в 2018 году – 38,7%.

Кольская АЭС с четырьмя реакторами ВВЭР-440 и установленной мощностью 1760 МВт в Мурманской области относится к числу «запертых» мощностей энергосистемы. В

силу сетевых ограничений КИУМ станции составляет 65,9% при среднем КИУМ АЭС в России в 2018 году более 85%. Возможность производства водорода на базе электроэнергии, вырабатываемой станцией, оценена при условии повышения КИУМ до 93%.

Ленинградская АЭС установленной мощностью 5200 МВт с четырьмя блоками на реакторах РБМК-1000 и одним вводимым в эксплуатацию ВВЭР-1200 также отличается невысоким КИУМ на уровне 76,4%. С учетом планового вывода из эксплуатации первых двух энергоблоков и ввода пятого блока установленная мощность составит 3200 МВт. Возможность производства водорода на базе электроэнергии, вырабатываемой станцией, оценена при условии повышения КИУМ до 93% за счет спроса на электроэнергию со стороны водородного производства.

Перечисленные три потенциальные пилотные площадки для создания первых экспортно-ориентированных производств водорода могут производить более 190 тыс. тонн водорода в год, покрывая на горизонте 2025 – 2030 годов основные потребности пилотных сегментов рынка водородного топлива как в Европе (в случае АЭС), так и в Японии (в случае ГЭС).

Совокупный производственный потенциал России в сфере водородного топлива, раскрытие которого не требует строительства новых генерирующих объектов, может быть оценен на основе величины выпускаемого и невыпускаемого резервов в энергосистеме России и показан на Рисунке 5. Совокупно эти мощности, работая со средним на 2018 год КИУМ ЕЭС на уровне 46%, могут производить до 2 млн тонн водорода в год, а при увеличении КИУМ указанных мощностей до 85% - до 3,5 млн тонн водорода в год. Тем самым Россия может претендовать на горизонте 2030 года на 10 – 15% глобального рынка, что сопоставимо с долей страны на мировых рынках нефти и газа.

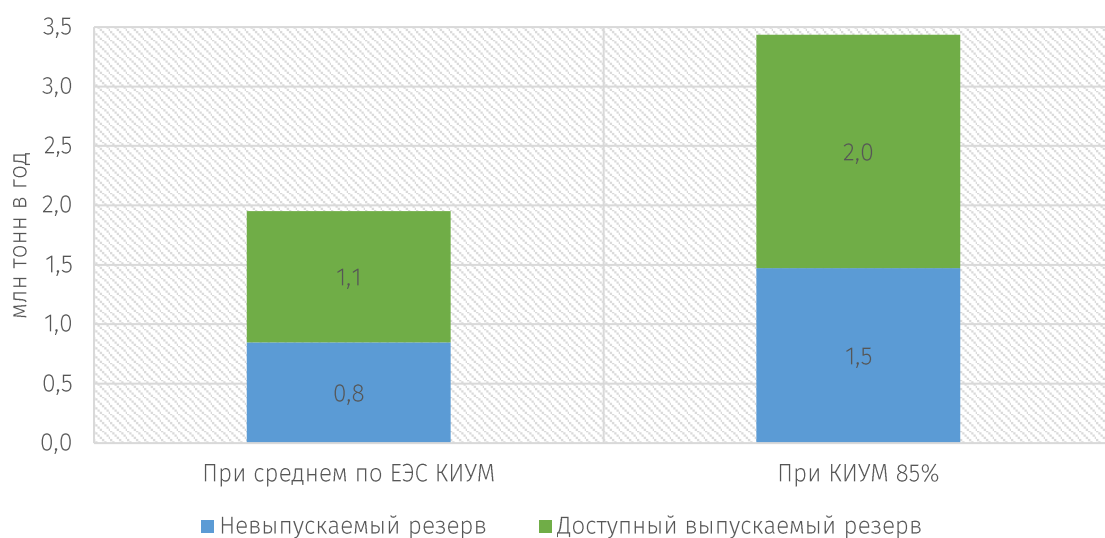


Рисунок 5. Возможности России по производству водородного топлива на основе накопления электроэнергии с резервов мощности энергосистемы. Источник: ИЦ EnergyNet.

Более подробная структура производственных возможностей на базе невыпускаемых резервов показана на Рисунке 6. Как видно, значительная доля запертых мощностей, которые могут быть использованы для производства водорода, сосредоточены в Сибири и на Дальнем Востоке в непосредственной близости от наиболее ориентированного на импорт водорода азиатского, в частности, японского рынков.

Предельно достижимые возможности производства водорода в России на базе существующих технологий при использовании недозагруженных генерирующих мощности таким образом, чтобы КИУМ в энергосистеме вырос до 90%, составляет 8,1 млн тонн в год – 23% от рынка в 2040 г.

При реализации описанного прогноза по росту рынка водородного топлива становится возможным создание промышленных активов по производству и транспортировке водорода. Целесообразность создания новых генерирующих активов в условиях экспорта водорода увеличивается. Производство водорода формирует устойчивый спрос на электроэнергию. Возможности России по производству и поставкам водорода, таким образом, могут быть при необходимости расширены путем строительства новых генерирующих мощностей.

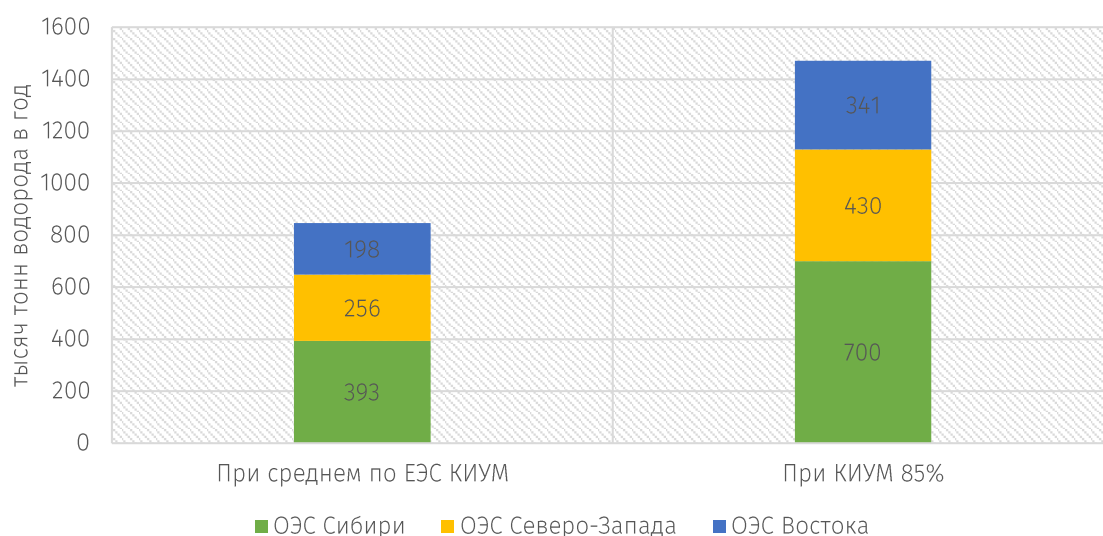


Рисунок 6. Возможности производства водорода на базе невыпускаемых резервов мощности.  
Источник: ИЦ EnergyNet.

Российский рынок систем накопления электроэнергии в водородном цикле, возникающий в связи с развитием экспорта водорода и показанный на Рисунке 7, оценен на основании данных о капитальной стоимости создания крупнотоннажного электролизного производства водорода и системы его дальнейшей транспортировки.



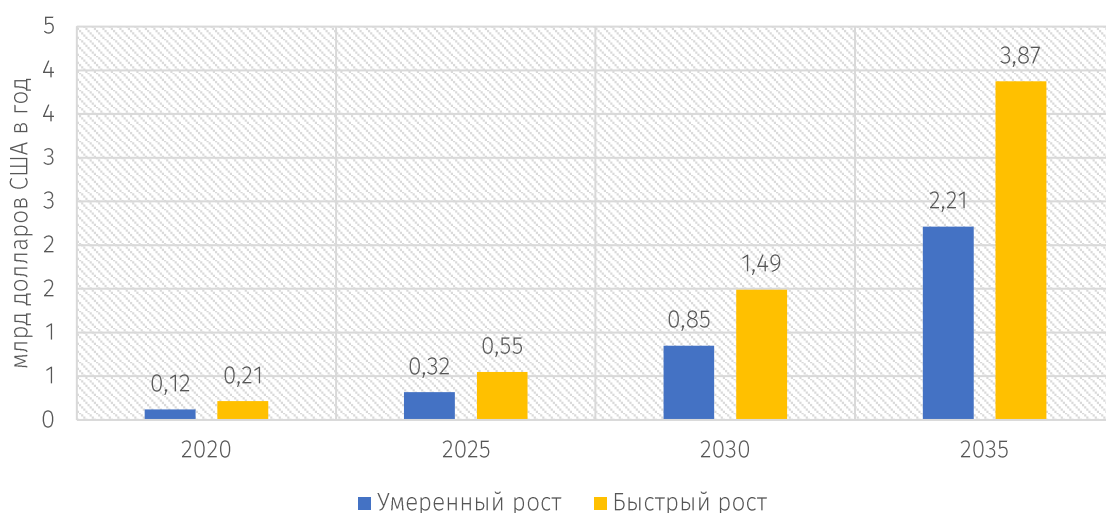


Рисунок 7. Прогноз роста российского рынка систем накопления электроэнергии в водородном цикле для экспортных поставок водородного топлива. Источник: ИЦ EnergyNet.

Возможность развития внутреннего рынка водородного топлива в России определяется кроме ряда специальных областей применения возможностью использования аккумуляции энергии в водородном цикле для повышения эффективности энергоснабжения удаленных и изолированных территорий. В основном такие территории сосредоточены в России на Крайнем Севере и в Дальневосточных регионах страны. Размер субсидий из федерального и региональных бюджетов на их энергоснабжение достигает 100 млрд рублей в год, а стоимость нефтяного топлива на месте потребления 70 – 100 рублей за литр.

При этом удаленных и изолированные территории часто обладают существенным потенциалом ВИЭ и использования собственных низкокалорийных энергоресурсов. Но их эффективное использование требует систем накопления энергии большой емкости. Аккумуляция энергии в водородном цикле позволяет не только сделать применение ВИЭ эффективным средством топливозамещения на указанных территориях, но и дает возможность сформировать локальные системы производства и транспортировки водорода как энергоносителя. Это позволит сократить логистическое плечо «северного завоза», снизить стоимость энергии и сократить необходимый объем субсидирования энергоснабжения.

По оценкам Института арктических технологий МФТИ, стоимость владения системой энергоснабжения изолированного поселка мощностью 100 кВт у гибридной системы, сочетающей ветрогенерацию, резервные дизель-генераторы и системы накопления энергии в водородном цикле, на 27% ниже, чем у традиционной системы на базе дизель-генераторов. При этом водород может вырабатываться не только на месте его потребления, но и доставляться внутри региона от центров производства, обладающих большими возможностями использования ВИЭ, к конечным потребителям. При таком подходе общая потребность в водородном топливе для энергоснабжения северных территорий, оцененная по замещению 30% завозимого топлива, составляет 130 тыс. тонн водорода в год.

## 5 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

К числу ключевых технологических барьеров развития водородной энергетики относятся задачи, связанные с достижением конкурентных технико-экономических показателей основными водородными технологиями:

1. Снижение себестоимости производства водорода на основе «безуглеродных» технологий, в том числе, позволяющих производить водород только на основе воды и электроэнергии.
2. Создание масштабируемой технологии крупнотоннажной транспортировки водорода с приемлемыми технико-экономическими показателями.
3. Снижение стоимости мощности и приведенной стоимости выработки электроэнергии на водородных топливных элементах.

### 5.1 Производство водорода

Водород – вторичный энергоноситель, химический аккумулятор энергии, и его производство требует первичного источника энергии. Этим источником может выступать электроэнергия или ископаемое топливо. В настоящее время промышленно освоенными являются следующие типы технологий производства водорода:

- **Паровой риформинг метана**, в ходе которого энергия природного газа используется для получения водорода из воды и самого метана. Преимуществом процесса является низкая стоимость производства водорода, недостатком – высокая эмиссия  $\text{CO}_2$  в ходе него и зависимость от топливного ресурса. Применение технологий улавливания и захоронения углекислого газа (CCS) существенно повышает стоимость водорода. Другим важным недостатком является невозможность использования полученного таким образом водорода в топливных элементах с PEM, крайне чувствительных к чистоте водорода.
- **Газификация угля**, в ходе которой в процессе термического разложения и/или окисления водяным паром, воздухом или кислородом (в зависимости от технологии) в ходе многостадийного процесса получается водород в смеси с  $\text{CO}_2$ . При том, что уголь – дешевый ресурс для производства водорода, способ имеет все те же недостатки, что и паровая конверсия метана.
- **Электролиз воды**, который осуществляется в промышленно производимых электролизных генераторах водорода. Наиболее распространенными являются технологии электролиза с жидким щелочным электролитом и твердым полимерным электролитом в виде протонпроводящей мембраны.

По оценкам IRENA, целевая планка цены водорода для покупателя с доставкой до места потребления (цены CIF, см. Рисунок 8) в зависимости от национальной программы по водородной энергетике лежит в пределах 3 – 6 долларов США за кг к 2025 году с перспективой снижения до 2 долларов США за кг на горизонте 2035 – 2040 годов. Цена CIF включает стоимость производства, хранения и транспортировки водорода.

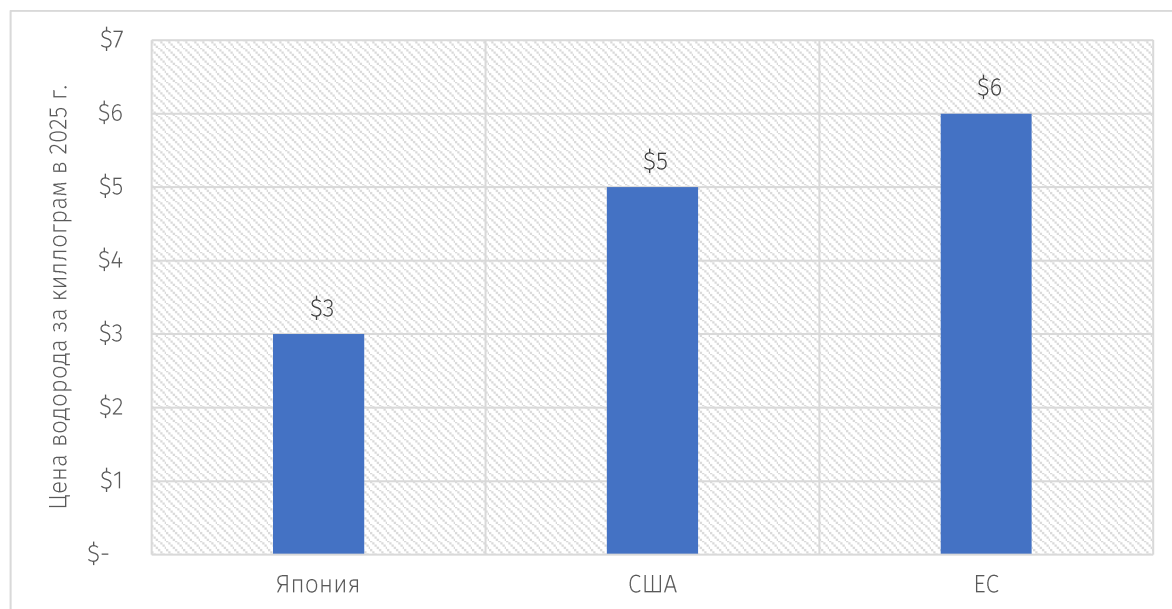


Рисунок 8. Целевые значения цен водорода для конечного потребителя в 2025 году, долларов США за кг. Источник: IRENA.

Сравнительный анализ приведенной стоимости производства водорода (LCOH) – основной составляющей цены водорода для потребителя – в случае перечисленных способов получения водорода, приведенный на Рисунке 9, показывает, что в настоящее время может быть выбрана или дешевая, или экологичная и универсальная технология.

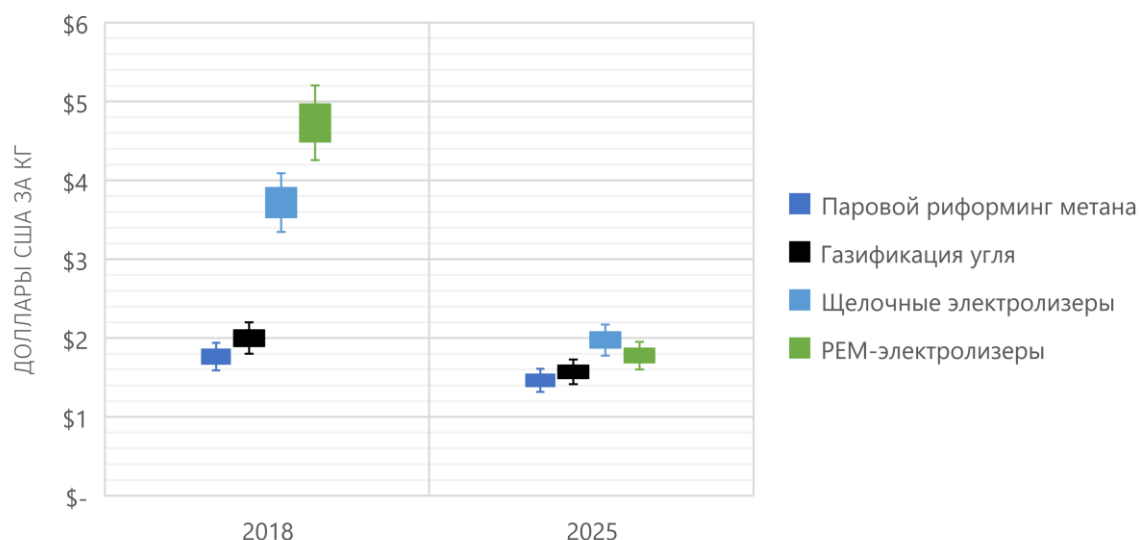


Рисунок 9. Приведенная стоимость производства водорода (LCOH), доллары США за кг. Источник: CSIRO.

Тем не менее, в перспективе 2025 года и далее ожидается существенное развитие электролизных технологий и снижение стоимости производимого электролизом водорода. Необходимо отметить, что параллельно и активно развиваются обе технологии электролизеров, и на основе щелочного, и на основе твердополимерного мембранного электролитов, причем зачастую производители стараются предлагать в своем портфолио обе технологии. Прогноз по улучшению стоимостных показателей электролизеров воды показан на Рисунке 10. На нем видно в том числе эффект масштаба при переходе к электролизерам большей единичной производительности.

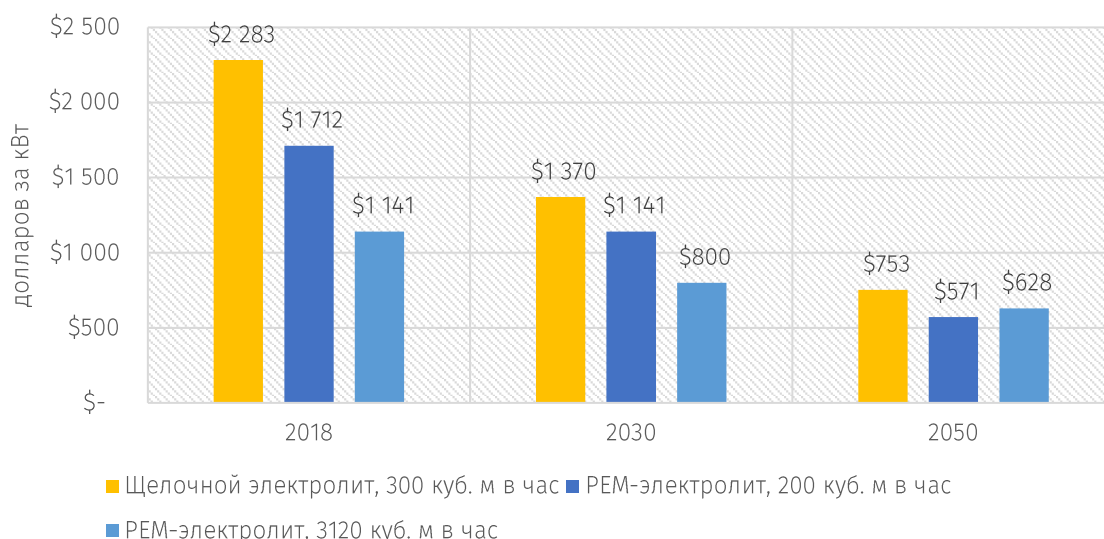


Рисунок 10. Стоимость мощности электролизеров воды. Источник: Hydrogenisc.

Динамика стоимости электролизного водорода, полученная на основе анализа пилотных проектов и работы экспериментальных установок, за 2005 – 2015 год, приведена на Рисунке 11. Она показывает, что целевые значения при определенных условиях уже достижимы.

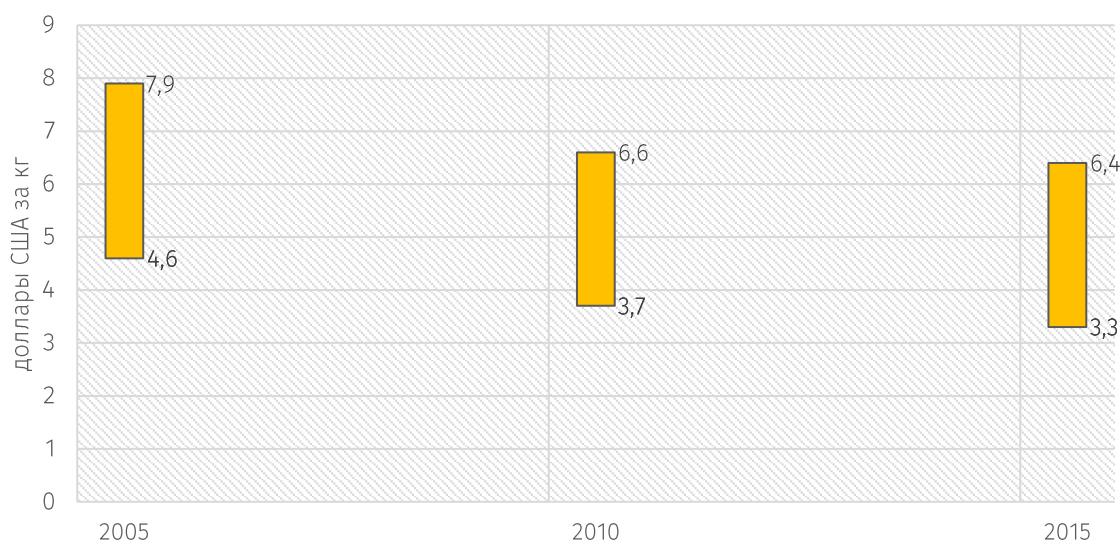


Рисунок 11. Историческая динамика себестоимости производства водорода электролизом воды. Источник: DoE.

Преодоление технологического барьера в области развития технологии производства водорода в значительной степени сводится к инженерно-технологическим задачам дальнейшего совершенствования щелочных и твердополимерных электролизеров.

## **5.2 Хранение и транспортировка водорода**

Водород – чрезвычайно летучий и легко воспламеняющийся газ с очень низкой температурой конденсации, обладающий способностью к охрупчиванию металлов. По этой причине хранение и транспортировка водорода, особенно в крупнотоннажных количествах, до сих пор является нетривиальной и до конца не решенной технологической задачей. Именно хранение и транспортировка водорода – тот ключевой технологический барьер, преодоление которого способно кардинальным образом изменить рынок. В настоящее время предлагаются следующие способы хранения водорода, позволяющие обратимо накапливать водород:

1. В сжатом виде под давлением до 700 бар в стальных или композитных баллонах и емкостях.
2. В сжиженном виде в криогенных емкостях при температуре  $-252^{\circ}\text{C}$ .
3. В химически связанном виде в жидких органических гидридах (ЛОHC). Суть способа состоит в гидрировании органического вещества, например, толуола, как правило, ароматической природы, и получении таким образом содержащего водород химического соединения, существенно отличного по своим свойствам от водорода, например, метилциклогексана. Это вещество затем каталитически дегидрируется, водород извлекается, а исходный субстрат возвращается в процесс.
4. В обратимо сорбирующих или содержащих в своем составе водород гидридах металлов и сложных сплавах. В рамках этого способа хранения активно развивается два направления. Одно связано с использованием обратимо сорбирующих водород под давлением до 8 бар сложных гидридов, десорбция из которых происходит при понижении давления. Второе – с получением стабилизированных за счет создания сильнощелочного pH водных растворов боргидридов щелочных металлов, которые необратимо дегидрируются с разложением на катализаторах.
5. В химически связанном виде в форме аммиака  $\text{NH}_3$ . Синтез аммиака по Габеру – Бошу досконально исследован, используется в крупнотоннажной промышленности с 1930-х годов, а сам процесс оптимизирован до предельно достижимой эффективности. Тем не менее, этот способ наименее освоен и проработан технологически, поскольку сложность состоит в получении водорода из аммиака или использовании аммиака непосредственно как топлива. Ни один из этих вариантов не доведен до стадии промышленного использования.

Основные технические характеристики указанных способов хранения приведены в Таблица 1. В настоящее время наиболее активные работы по разработке технологий

и промышленной реализации ряда указанных направлений движутся Япония и Австралия.

Таблица 1. Технологические характеристики способов хранения водорода. Источники: ИПХФ РАН, ИЦ EnrgyNet, SIP.

Способ хранения	Массовое содержание водорода	Рабочие температуры процесса	Рабочие давления процесса
Стальные баллоны для сжатого водорода	До 1%	20 – 40 °C	150 бар
Композитные баллоны высокого для сжатого водорода	5 – 7%	20 – 40 °C	350 бар
Композитные баллоны сверхвысокого давления для сжатого водорода	10,5 – 13,8%	20 – 40 °C	700 бар
Криогенные емкости для сжиженного водорода	До 7,1%	–252 °C	1 бар
Жидкие органические гидриды	До 7,2%	180 – 280 °C	1 – 10 бар
Обратимо гидрирующиеся металлы и сплавы (металлогидриды)	1,5 – 7,5%	100 – 300 °C	1 – 5 бар
Жидкий аммиак	17%	400 – 600 °C	350 – 500 бар

В Японии действуют технологические консорциумы, реализующие в перспективе 2020 года пилотные проекты по доставке водорода тремя из указанных способов. Консорциум во главе с Kawasaki Heavy Industries занимается совместным с Австралией проектом производства водорода газификацией угля с последующим охлаждением и доставкой специально разработанными криогенными танкерами. Консорциум во главе с торговым домом Mitsui и компанией Chiyoda Corp. ведет работы над транспортировкой в виде LOHC, используя схему «толуол – метилциклогексан», запущен пилотный проект с Брунеем. Консорциум SIP (“Green Ammonia”) во главе с Tokyo Gas работает над вариантом транспортировки в виде аммиака и ведет на базе вузов разработки способов низкотемпературного разложения аммиака и применения аммиака в качестве топлива для газовых турбин и твердооксидных топливных элементов.

Сравнение стоимости хранения (см. Рисунок 12) и транспортировки (см. Рисунок 13) водорода при использовании различных типов технологий показывает принципиальную перспективность аммиака как носителя, или формы хранения и перевозки водорода.

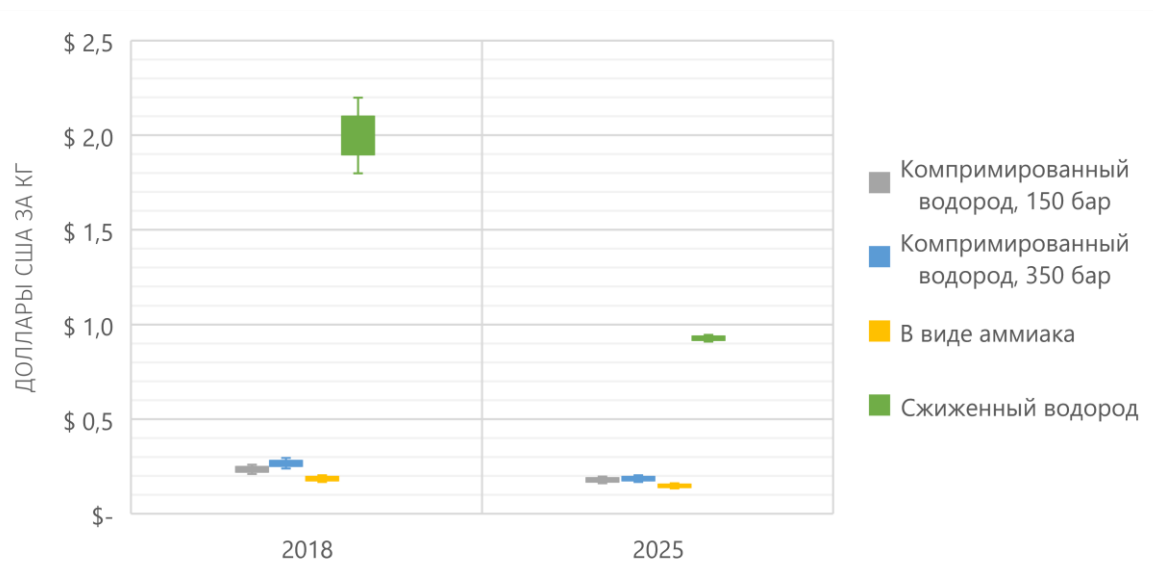


Рисунок 12. Стоимость хранения водорода, доллары США за кг. Источник: CSIRO.

Криогенное хранение с перевозкой жидкого водорода проигрывает по стоимости, но при этом остается на сегодня единственной промышленно освоенной технологией крупнотоннажной перевозки водорода.

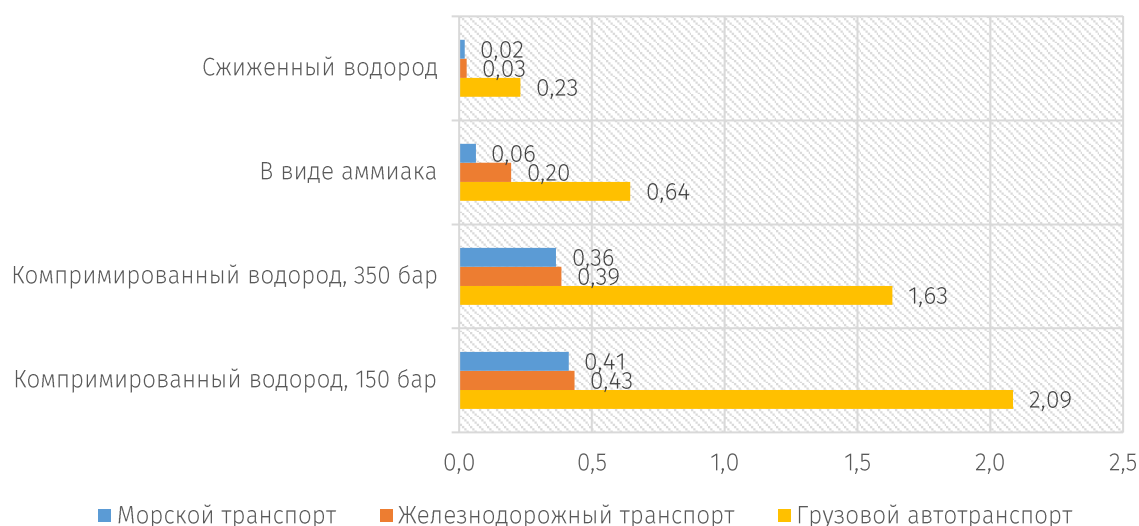


Рисунок 13. Стоимость перевозки водорода, доллары США за кг. Источник: CSIRO.

В значительной мере технологический барьер хранения и транспортировки водорода состоит в том, чтобы одновременно повысить массовое содержание водорода в носителе до 10% и более и сделать так, чтобы диапазон рабочих температур и давлений был как можно ближе к естественным условиям эксплуатации системы, не требовал бы ни сверхвысоких, ни сверхнизких температур и высоких давлений.

### 5.3 Генерация энергии из водорода

Наиболее многообещающим в силу сравнительно высокого КПД (55% и выше) способом генерации электрической и тепловой энергии из водорода являются топливные элементы. Сравнение себестоимости производства электроэнергии (LCOE)

при помощи топливных элементов в сравнении с другими типами генерации показано на Рисунке 14. Разрабатываются две магистральные линии развития этой технологии – низкотемпературные (с рабочими температурами до 100-120°C) топливные элементы с протонообменными мембранами и высокотемпературные (с рабочими температурами 500-900°C) на основе ион-проводящей керамики.

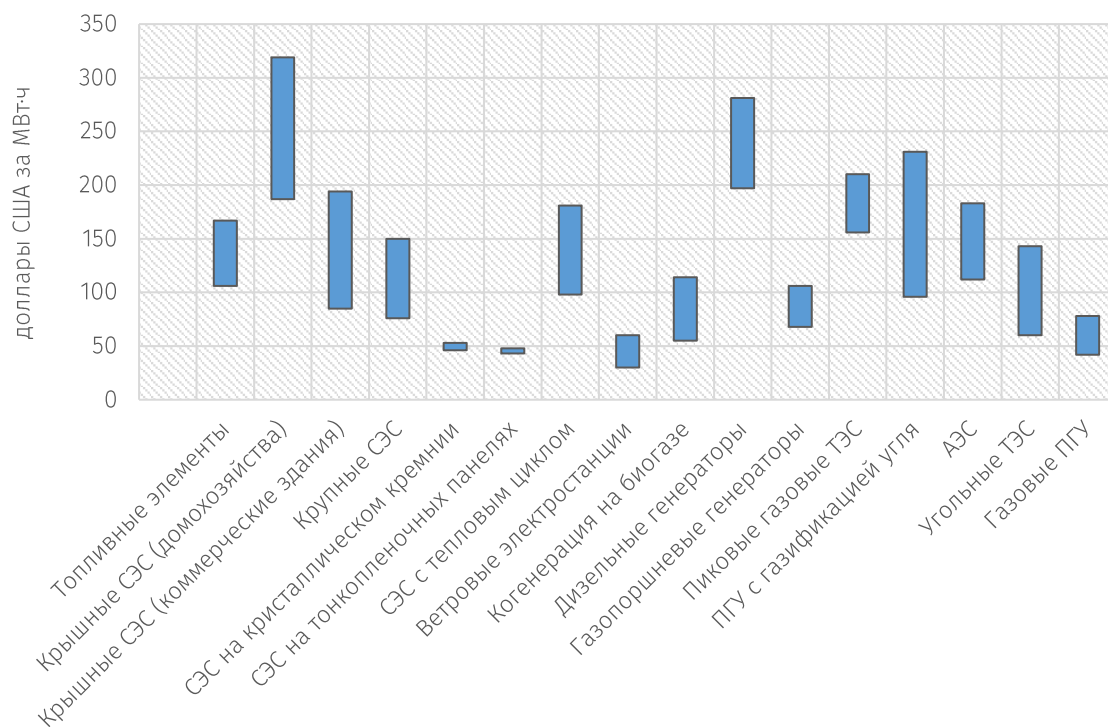


Рисунок 14. Приведенная стоимость электроэнергии (LCOE) от различных типов генерации. Источник: Lazard.

Несмотря на существенное улучшение эксплуатационных характеристики топливных элементов, их стоимостные параметры по-прежнему существенно проигрывают традиционной генерации. Особенно существенным технологическим барьером является снижение стоимости мощности, которая должна составлять не более 40 долларов США за кВт при условии массового производства на уровне 0,5 миллиона батарей топливных элементов в год. Стоимость батареи топливных элементов Toyota Mirai в 2016 году составляла 183 доллара США за кВт. По прогнозу Министерства энергетики США, стоимость мощности топливных элементов с PEM к 2025 году может снизиться до 36 долларов США за кВт при условии производства не менее 500 тыс. батарей топливных элементов в год.



## 6 ПИЛОТНЫЙ ПРОЕКТ ПОСТАВКИ РОССИЙСКОГО ВОДОРОДА В ЯПОНИЮ

С высокой вероятностью в силу стратегической ставки, сделанной японским правительством на развитие водородной энергетики, именно Япония первой из развитых экономик вступит в стадию промышленного масштабирования систем водородной энергетике на транспорте, включая заправочные станции, в энергоснабжении домохозяйств и в декарбонизации электроэнергетики.

В условиях отсутствия собственных первичных источников энергии в рамках программы построения водородного общества, ключевые параметры дорожной карты которой показаны на Рисунке 15, японский институт развития NEDO ориентирован на тестовую реализацию цепочек импортной поставки водорода в Японию. К 2020 году должны быть запущены в работу как минимум два таких тестовых пилотных проекта с Австралией и Брунеем. На очереди – проработка ТЭО проектов с Испанией и Колумбией.

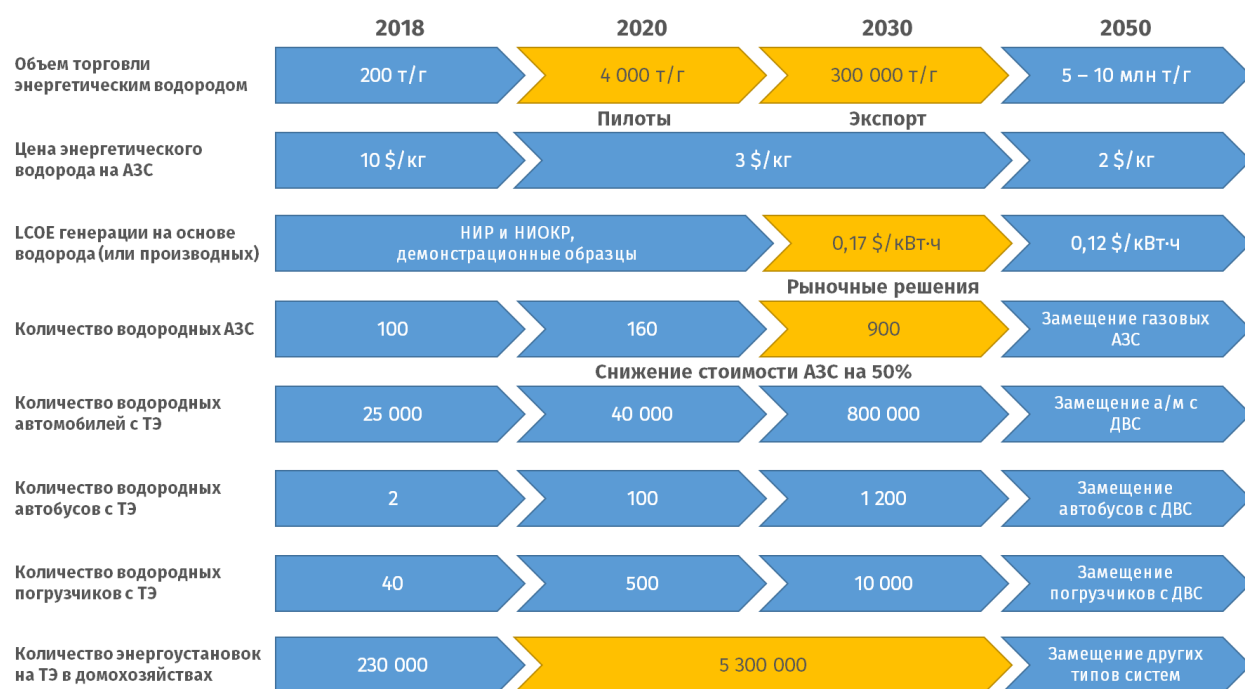


Рисунок 15. Основные параметры «дорожной карты» японской программы построения водородного общества. Источники: METI, NEDO.

Активность Японии открывает для России принципиальную возможность предложить свой пилотный проект, который даст возможность сделать заявку на существенную долю на формирующемся японском рынке водорода.

Такой пилотный проект может быть развернут на базе гидроэнергетических или ветроэнергетических мощностей на Дальнем Востоке, например, с использованием энергии, выработанной Усть-Среднеканской ГЭС им. А.Ф. Дьякова или

ветрогенераторами на о. Сахалин. На Рисунке 16 приведена оценка экономических показателей пилотного проекта предприятия производительностью 2,4 тыс. тонн водорода в год ориентировочной капитальной стоимостью 20 млн долларов США, осуществляющее покупку электроэнергии по ценам оптового рынка.

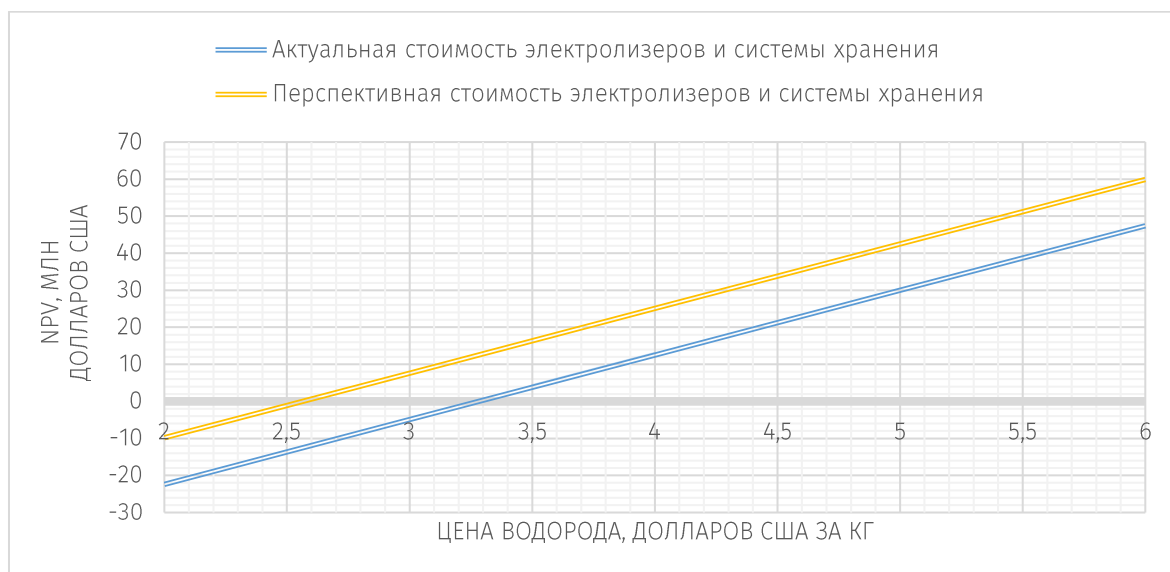


Рисунок 16. Экономические показатели потенциального пилотного проекта экспорта водорода в Японию. Источник: ИАТ МФТИ, ИЦ EnergyNet.

Такое предприятие может быть развернуто с использованием зарубежной технологической базы в части электролиза воды и системы хранения и транспортировки водорода.

## 7 СТРАТЕГИЯ ПРОДВИЖЕНИЯ РОССИИ НА ГЛОБАЛЬНЫЙ РЫНОК ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Россия имеет определенные конкурентные преимущества при выходе на глобальный рынок водородного топлива, связанные в первую очередь с логистической близостью ряда регионов страны к национальным рынкам сбыта водорода, а также с наличием значительной ресурсной базы. На Рисунке 17 показана достижимая цена продажи водорода в Японию, оцененная на основе ориентировочных затрат на создание и работу промышленного актива по производству водорода на Дальнем Востоке.

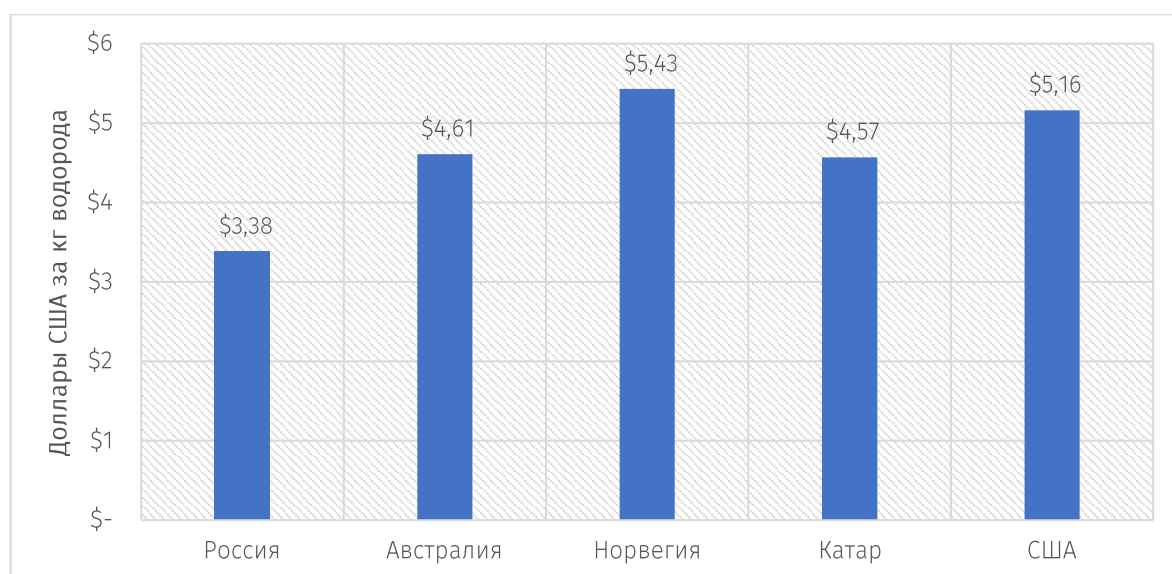


Рисунок 17. Достижимые цены продажи водорода в Японию (цена CIF) в 2025 году. Источники: ACIL ALLEN Consulting, ИЦ EnergyNet.

Конкурентные возможности российского предложения по отношению к Австралии, наиболее активной в направлении выхода на глобальный рынок водорода стране, определяются более низкой ценой на электроэнергию на Дальнем Востоке России и меньшим логистическим плечом.

В силу того, что в Австралии принята экспортно-ориентированная национальная программа перехода к водородной энергетике, а ряд компаний уже находится на стадии строительства пилотных объектов по производству и ожижению водорода для его поставки по технологии Kawasaki, возможный выход России на водородный рынок может произойти с опозданием.

В этой ситуации реализация стратегического маневра по развитию рынка систем накопления электроэнергии в части направления «Водородная энергетика» (см. Рисунке 18) должна заключаться в как можно более быстрой подготовке и реализации

пилотного проекта по поставке водородного топлива в Японию или на любой другой рынок, который готов к совместному пилотному проекту с российской стороной.

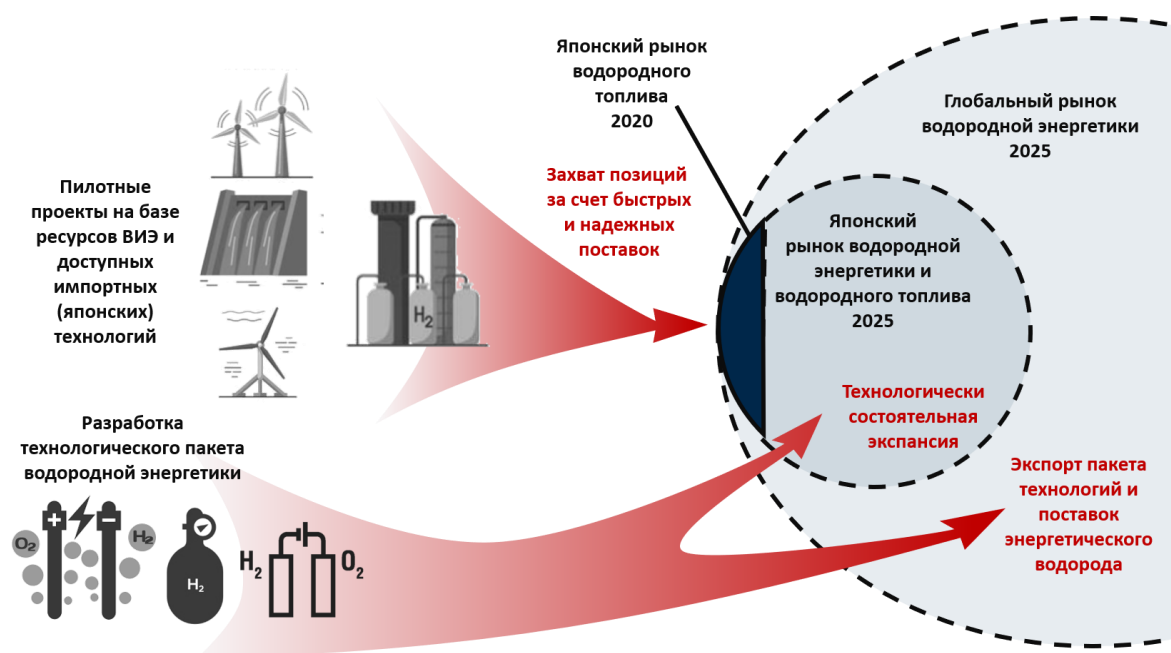


Рисунок 18. Стратегия продвижения на глобальный рынок водородного топлива. Источник: ИЦ EnergyNet.

Пилотный проект должен быть нацелен на демонстрацию принципиальной возможности надежных поставок водородного топлива зарубежным партнерам и уточнение технико-экономической и бизнес модели ведения такой деятельности по накоплению электроэнергии в виде экспортируемого водорода. При этом пилотный проект должен быть реализован на основании лучших доступных технологий, приоритет при выборе которых должен быть отдан наиболее готовым к промышленному использованию технологиям.

Одновременно с работами по реализации демонстрационных и пилотных проектов необходим запуск собственной национальной программы исследований и разработок в сфере водородной энергетики, ориентированной на преодоление наиболее значимых технологических барьеров в сфере водородной энергетики. Только при такой постановке задачи на разработку собственных технологий реализация промышленных проектов производства и экспорта водорода на стадии масштабирования позволит этим технологиям конкурировать с предложениями других стран.

Реализация описанного стратегического маневра из двух шагов – быстрые пилотные проекты и нацеленные на опережающее преодоление технологических барьеров разработки – позволит открыть для российских компаний существенный по величине формирующийся рынок водородного топлива, а в России сформировать новый рынок и новую отрасль систем накопления энергии в водородном цикле.

## 8 ПРИЗЫВ К ДЕЙСТВИЮ

Инфраструктурный центр EnergyNet, опираясь на различные механизмы поддержки со стороны Национальной технологической инициативы, нацелен на доведение описанного стратегического маневра до практического действия. Продолжается установление контактов с представителями японских компаний – участников создаваемой отрасли водородной энергетики – и разведка возможностей совместного с ними пилотного проекта по поставкам водорода в Японию с Дальнего Востока России.

Важную роль в реализации изложенной инициативы по развитию экспортно-ориентированной водородной энергетики в России должна сыграть активно создаваемая научная и инженерная инфраструктура. В 2018 году под эгидой Национальной технологической инициативы запущен технологический конкурс «Первый элемент», направленный на поиск опережающих образцов топливных элементов. Стартовала работа Центра компетенций НТИ по новым и портативным источникам энергии, ключевую роль в котором играет ИПХФ РАН. Его программа работы в значительной степени сосредоточена на водородных технологиях. Запущена деятельность ряда лабораторий Института арктических технологий МФТИ, которые совместно с ИПХФ РАН, ИФТТ РАН и Российским технологическим университетом ведут пионерские разработки по темам твердооксидных топливных элементов и разработки катализаторов для систем хранения водорода в жидких органических носителях и аммиаке.

Но одних только исследований и разработок, даже успешно доводимых до коммерциализации, для реализации стратегических возможностей страны по выходу на глобальный рынок водородного топлива недостаточно. Критически важной будет позиция крупнейших компаний страны и их готовность увидеть в описанном потенциале экспорта российского водорода возможности для новых направлений бизнеса. Инфраструктурный центр EnergyNet совместно с Центром энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО проводят работу с заинтересованными крупными российскими корпорациями по формированию их стратегической повестки в сфере водородной энергетики.

Настало время переходить от осторожных оценок собственных возможностей к заявлению позиции на зарождающемся рынке, переходить от академических дискуссий к переговорам с зарубежными контрагентами, в которых должен быть ясно проявлен российский бизнес-интерес к поставкам водорода.

