

На правах рукописи

Гомонов Константин Геннадьевич

**ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ
ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ГЛОБАЛЬНЫЕ И
НАЦИОНАЛЬНЫЕ ИМПЕРАТИВЫ И ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Специальность 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономика промышленности)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени доктора экономических наук

Москва – 2026

Диссертация выполнена на кафедре экономико-математического моделирования экономического факультета ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН).

Научный консультант: **Ратнер Светлана Валерьевна,**

доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономико-математического моделирования экономического факультета ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Официальные оппоненты: **Кириченко Татьяна Витальевна,**

доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры безопасности цифровой экономики и управления рисками, факультет комплексной безопасности ТЭК, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина

Костюнина Галина Михайловна,

доктор экономических наук, профессор, старший научный сотрудник кафедры международных экономических отношений и внешнеэкономических связей имени Ливенцева Н.Н., факультет международных экономических отношений, ФГАОУ ВО «Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации»

Лавров Сергей Николаевич,

доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры международных экономических отношений, экономический факультет, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Роднянский Дмитрий Владимирович,

доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры технологического предпринимательства, институт искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Защита состоится «16» апреля 2026 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета ПДС 0600.005 при ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН им. Патриса Лумумбы) по адресу: 117198, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, зал №3.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке РУДН по адресу: 117198, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Объявление о защите диссертации и текст автореферата размещены на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (<https://vak.minobrnauki.gov.ru/>) и на сайте РУДН: <http://dissovet.rudn.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета ПДС 0600.005

М.В. Черняев

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена тем, что глобальная энергетическая система переживает беспрецедентную трансформацию, вызванную ростом возобновляемых источников энергии, развитием водородной энергетики и перераспределением инвестиций. Однако текущий период отличается от исторических смен технологических укладов наличием макроэкономических рисков и системных блокировок: ресурсные ограничения (спрос на никель и платину для электролизеров к 2030 г. может вырасти на 300%), высокая концентрация цепей поставок (70% электролизерных мощностей в Китае), дестабилизация рынка труда в традиционных секторах (до 63% занятых в угольной промышленности ЕС могут потерять рабочие места к 2035 г.) и асинхронный переток инвестиций (мировые расходы на водородные проекты в 2023 г. составили 240 млрд долларов США при реализации лишь 10% инициатив).

Водородная энергетика выступает связующим звеном между углеводородной и возобновляемой энергетическими системами. Снижение стоимости PEM-электролизеров на 50% за 2018–2022 гг. позволяет трансформировать системы на ископаемой энергии в низкоуглеродные, частично используя существующую инфраструктуру. Развитие этого сектора признано ключевым компонентом стратегии устойчивого роста, с прогнозируемым производством низкоуглеродного водорода до 49 млн тонн к 2030 г. Водородные технологии снижают риск дестабилизации рынка труда и чрезмерной концентрации цепей поставок благодаря более равномерному географическому распределению производства.

Современная структура мирового рынка водорода доминируется производством из ископаемых источников (45% – паровой риформинг метана, 36% – газификация угля) с себестоимостью 1,5–2,5 долл. США/кг против 5–7 долл. США/кг для электролиза. Электролиз с возобновляемыми источниками энергии сталкивается с недоиспользованием мощностей (загрузка китайских электролизеров в 2023 г. составляла 10%). Несмотря на рост исследований эколого-экономической эффективности (более 680 проектов в 2023 г.), экономическая эффективность зависит от капиталовложений (2000 долл. США/кВт для PEM), установленных мощностей (1,4 ГВт в 2023 г.) и стоимости энергии (0,03 долл. США/кВт·ч для рентабельности).

Для России развитие водородной энергетики является стратегической задачей, обусловленной необходимостью перехода на низкоуглеродную траекторию развития и диверсификацией экспортно-сырьевой модели. Водород связывает электроэнергетику, топливно-энергетический комплекс и энергоёмкие отрасли (металлургия, химия, транспорт), обеспечивая декарбонизацию, повышение

энергоэффективности и формирование новых высокотехнологичных рынков. Однако институциональная, методическая и инструментальная база развития этого сектора остаётся недостаточно развитой.

Российские водородные проекты обладают конкурентными преимуществами: значительные природные ресурсы, географическое положение, логистические преимущества для экспорта в Европу и Азию (потенциал 2,9 млн тонн к 2030 г.), потенциал производства до 12 млн тонн к 2035 г. и низкая себестоимость "голубого" водорода (1,8–2,2 долл. США/кг). Вместе с тем развитие сталкивается с серьёзными препятствиями. Санкции сократили доступ к 70% электролизерных технологий и отрезали страну от 85% планируемых рынков сбыта, создавая финансовые риски для долгосрочных инвестиций (требуемые вложения превышают 20 млрд долл. США). Существуют технологические и инфраструктурные ограничения: отсутствие водородных трубопроводов (только 2% газотранспортной системы пригодно для H₂), проблемы с хранением в суровых климатических условиях (потери при криогенном хранении 0,5–1% в сутки), нормативно-правовая неопределённость и отсутствие единых стандартов сертификации. Российские проекты находятся на ранних стадиях развития с ограниченной географической зоной применения (80% мощностей в 5 регионах).

Комплексный анализ организационно-экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в России в контексте глобального энергетического перехода, с учётом макроэкономических рисков, системных блокировок и национальной специфики, имеет высокую актуальность для разработки научно обоснованных стратегий управления этим сектором. Разработанное в диссертации методологическое и программное решение позволяет дать комплексную оценку водородных проектов не только по коммерческой рентабельности, но и по совокупному общественному эффекту — экологическому, технологическому, социальному и стратегическому. Это способствует выявлению проектов, обеспечивающих баланс экономической эффективности и положительных экстерналий, оптимизации механизмов государственной поддержки и согласованию интересов государства и бизнеса, что в конечном счёте ускоряет развитие низкоуглеродной энергетики и способствует достижению целей устойчивого развития в странах ЕАЭС.

Степень научной разработанности проблемы.

Исследование опирается на широкий круг отечественных и зарубежных работ, посвящённых развитию водородной энергетики. Теоретические основы анализа блокировок её развития, основанные на концепции path-dependence в

социотехнических системах, разработаны в трудах У. Артура, С. Либовица, С. Марголиса, Г. Унру и Г. Тренчера, исследовавших механизмы исторической и углеродной блокировки. Существенный вклад в понимание барьеров перехода к устойчивой энергетике внесли А. Клитку, П. Бушманн, А. Олс, Й. Сидов, Г. Шрейогт, Й. Кох, а также С. Негро, Ф. Алкемаде и М. Хеккерт. Однако специфические блокировки развития водородной энергетики, особенно в контексте рынков ВИЭ, остаются недостаточно изученными.

Методологические основы оценки эффективности цепочек поставок водорода с позиций DEA заложены М. Фарреллом, А. Чарнесом, В. Купером, Е. Родесом, Р. Банкером и развиты в сетевых моделях Ч. Као и Й. Чена. Подходы к оценке устойчивости цепочек поставок предложены Т. Бадиезаде, Р. Саеном, Т. Самавати, Х. Шабанпуром и другими. Вклад в область анализа цепочек водорода внесли С. Де-Леон Альмараз, К. Аззаро-Пантел, К. Вульф и П. Запп, а в России — С. Ратнер, С. Балашова, С. Ревина. Однако комплексная методология, сочетающая анализ жизненного цикла, сетевой DEA и ценностный подход, пока не сформирована.

В области прогнозирования стоимости зеленого водорода используются подходы кривых обучения, разработанные Т. Райтом, К. Эрроу, Г. Неметом, М. Юнгингером, К. Шуцем, Ф. Фериоли и Б. ван дер Званом. Развитие компонентного анализа представлено в работах Ф. Фериоли, Х. Бёма и С. Гёрса, а модели прогнозирования в условиях неопределенности — у Б. Лейна и соавторов. В российской науке данный подход развивали В. Матюшок, С. Ревина, И. Лазанюк и С. Ратнер. Тем не менее, существующие методики не учитывают в полной мере специфику динамики капитальных и энергетических компонентов стоимости.

Экономические и технико-экономические аспекты конкурентоспособности зеленого водорода изучены Г. Гленком, С. Райхельштайном, Дж. Армихо, К. Филибером, Е. Вартиайненом, Т. Лонгденом, Ф. Джоцо и Д.Й. Йованом. Анализ перспектив водородной экономики в России представлен в исследованиях С. Жизнина, В. Тимохова, А. Гусева, Е. Вечкинзовой, Л. Стебляковой, Н. Росляковой, С. Баженова, Ю. Добровольского и др. Однако разработка комплексных организационно-экономических механизмов, адаптированных к российским условиям, остаётся ограниченной.

Подходы к оценке эффективности водородных проектов включают многокритериальный анализ (Б. Церан, Р. д'Аморе-Доменек), индикаторную и системную оценку (Р. Конечна, Й. Кадер, П. Пенчан, М. Ву, Й. Ву, С. Чжан, Н. Чжан, Й. Циу, Й. Цзя), а также применение DEA (Х.-Й. Чунг, К.-Х. Чанг). Однако интегральная система показателей, объединяющая экономические, экологические,

технологические и управленческие аспекты водородных проектов, пока не разработана.

Комплекс рассмотренных проблем подтверждает актуальность тематики исследования в диссертационной работе, определяя цель и задачи.

Цель диссертационного исследования состоит в разработке и обосновании концепции организационно-экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации.

Поставленная цель потребовала решения ряда задач, которые соответствуют структуре и логике исследования:

1. Определить современное состояние и перспективы мирового рынка водорода.

2. Идентифицировать и обосновать макроэкономические риски и системные блокировки развития водородной энергетики на основе комплексного теоретического анализа процесса энергетического перехода с позиций теории технологических инноваций и зависимости от пройденного пути (path-dependence), выявив познавательные ограничения традиционных подходов к оценке энергетических трансформаций.

3. Выявить географические и технологические структуры российских водородных проектов и провести оценку их конкурентоспособности на мировом рынке.

4. Разработать и апробировать комплексную методологию оценки эколого-экономической эффективности различных технологических цепочек производства, хранения и транспортировки водорода.

5. Разработать и апробировать метод прогнозирования динамики снижения стоимости зеленого водорода в зависимости от масштабов производства на основе кривых обучения.

6. Разработать подход к прогнозированию динамики реализации потенциала спроса на водород на внутреннем рынке России с учетом специфики отечественной экономики на основе сценарного моделирования.

7. Выявить мировые практики стимулирования производства низкоуглеродного водорода и предложить возможности их адаптации для Евразийского экономического союза.

8. Разработать интегральную методику комплексной оценки эффективности водородных проектов и реализовать ее в виде программного обеспечения.

9. Разработать таксономию организационно-экономических инструментов

развития водородной энергетики в России и алгоритм выбора оптимального инструмента в зависимости от текущей эколого-экономической эффективности технологически и географически доступной цепочки производства, хранения и транспортировки водорода.

10. Разработать концепцию организационно-экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации.

Объект исследования – организационно-экономический механизм функционирования водородной энергетики в Российской Федерации.

Предметом исследования являются организационно-экономические и управленческие отношения по поводу формирования и развития эффективного механизма функционирования водородной энергетики в Российской Федерации.

Соответствие темы диссертационного исследования Паспорту специальности ВАК РФ. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с п. 2.11. Формирование механизмов устойчивого развития экономики промышленных отраслей, комплексов, предприятий. п. 2.14. Проблемы повышения энергетической эффективности и использования альтернативных источников энергии Паспорта специальности ВАК РФ 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономика промышленности).

Теоретическую основу исследования составили разработки и научные труды отечественных и зарубежных исследователей, отражающие закономерности развития сложных систем, прежде всего: теория энергетического перехода как глобальной трансформации; теория смены энергетических укладов и технико-экономических парадигм; теория зависимости от прошлого пути (path-dependence) для анализа блокировок инновационного развития; теория разрыва энергоэффективности для исследования барьеров внедрения технологий; концепция макроэкономических рисков; теория кривых обучения для прогнозирования снижения стоимости технологий; теория устойчивого развития и управления цепочками поставок (SCM), интегрирующая экономические, экологические и социальные аспекты. Важной частью теоретической основы является интеграция концепций макроэкономических рисков, системных блокировок и микроэкономических/потребительских барьеров в единую аналитическую рамку.

Методология и методы исследования. Помимо общих научных методов исследования, к ключевым методологиям и методам исследования относятся: Анализ жизненного цикла (LCA), инвентаризация жизненного цикла (LCI) и оценка воздействия жизненного цикла (LCIA) для оценки воздействия технологических цепочек на окружающую среду. Сетевой оболочечный анализ данных (NDEA) для

оценки сравнительной эколого-экономической эффективности производственных систем, в том числе многоэтапных цепочек поставок водорода. Проектирование с учетом ценности (VSD) для выбора приоритизации экологических критериев оценки воздействия. Методика кривых обучения (одно- и двухфакторный, многокомпонентный подход) для прогнозирования снижения стоимости водорода. Мета-анализ данных для синтеза результатов множества исследований, выявления общих тенденций и оценки темпов обучения на основе исторических данных. Сценарный подход для прогнозирования динамики реализации потенциала внутреннего спроса на водород и оценки ценовой конкуренции. Методы многокритериального анализа решений для комплексной оценки эффективности водородных проектов.

Информационная база исследования представлена результатами мета-анализа различных литературных источников и статистических данных. В том числе данные ведущих международных агентств (МЭА, IRENA, BloombergENF, McKinsey, Hydrogen Council и др.), международных баз данных (EcoInvent, Enerdata, IEA) и обзоры, содержащие экологические и экономические параметры технологий производства, хранения и транспортировки водорода. Данные Минпромторга и Росстата о текущих российских водородных проектах и данные МЭА для поиска проектов-аналогов. Временные ряды европейской статистики по внедрению альтернативных видов топлива для построения сценарных прогнозов внутреннего спроса в РФ. Стратегические документы и программы развития, и научная литература по вопросам водородной энергетики и энергетического перехода.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке и валидации комплексного подхода к оценке эколого-экономической эффективности цепочек производства и поставок водорода, позволяющего повысить эффективность управленческих решений в условиях многокритериального выбора и неопределенности. В отличие от традиционных, данный подход включает гибридную модель и оригинальную методику прогнозирования динамики снижения стоимости зеленого водорода. В исследовании впервые раскрыты специфические блокировки (lock-in) и макроэкономические риски развития водородной энергетики с использованием методологии зависимости от пройденного пути (path-dependence) в социотехнических системах. На основе разработанной системы интегральных показателей, объединяющей экономические, экологические, технологические, стратегические, социально-управленческие и инновационные аспекты, предложены методические подходы к комплексной оценке эффективности водородных проектов и представлены в виде программного обеспечения. Предложены принципиально новые

таксономия организационно-экономических инструментов развития водородной энергетики и механизм формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации.

Положения, выносимые на защиту, обладающие научной новизной, полученные лично соискателем:

1. **Определено** современное состояние и перспективы развития мирового рынка водорода в контексте энергетического перехода, целей по декарбонизации мировой экономики и необходимых для их достижения структурных изменений в промышленности. **Выявлены** уникальные характеристики водорода для развития инновационных энергосистем: (1) обеспечение эффективного балансирования производства и потребления энергии, особенно при интеграции возобновляемых источников, что фундаментально для стабильности энергосистем; (2) возможность передачи энергии на большие расстояния и в труднодоступные регионы; (3) предложение экономически эффективных решений для хранения энергии по сравнению с аккумуляторными альтернативами; и (4) уникальная способность декарбонизировать трудно поддающиеся сокращению выбросов секторы, такие как промышленность, морской транспорт и авиация.

2. **Раскрыта** роль Российской Федерации в развитии мировой водородной энергетики как потенциального стратегического лидера, что обусловлено уникальным сочетанием инфраструктурных, технологических и ресурсных активов. **Доказано**, что синергетическое использование существующей газовой инфраструктуры, передовых технологических компетенций и колоссального потенциала ВИЭ позволяет Российской Федерации не только диверсифицировать свой энергетический экспорт, но и стать одним из ключевых мировых центров по производству и поставке низкоуглеродного водорода, играя ведущую роль в глобальном энергетическом переходе. **Доказано**, что LCOH в российских низкоуглеродных водородных проектах варьируется от 1,2 до 11,7 долларов США за килограмм водорода, что соответствует среднемировым показателям и позволяет достичь объема рынка водорода 2,2–3,9 млрд долларов США в период 2025–2035 годов.

3. С использованием методологии зависимости от прошлого пути в социо-технических системах (path-dependence) **определены** блокировки развития водородной энергетики, к которым в отличие от известных блокировок развития инновационных энергетических технологий, связанных с доминирующим положением углеводородной энергетики в прошлом отнесены блокировки инновационного развития, характерные для становления новых энергетических

рынков, основанных на использовании технологий ВИЭ, а именно: 1) блокировки развития альтернативных технологий возобновляемой энергетики; 2) блокировки развития децентрализованных энергетических систем; 3) блокировки совершенствования технологий ВИЭ; 4) блокировки чрезмерной ориентации на природно-климатические условия и 5) блокировки искажения рыночных сигналов.

4. **Разработана** модель оценки комплексной эколого-экономической эффективности цепочки производства и поставок водорода на основе гибридного подхода, включающего в себя методику анализа и оценки жизненного цикла продукции (LCA), методику сетевого оболочечного анализа данных (NDEA) и методику ценностно-ориентированного проектирования (VSD). **Применение** данного подхода к оценке комплексной эколого-экономической эффективности различных промышленно освоенных технологий производства водорода **позволило выделить** следующие наиболее эффективные цепочки: 1) Атомная энергетика – электролиз PEM; 2) Гидро-энергетика – электролиз PEM; 3) Ветровая энергия – электролиз PEM.

5. **Разработана** методика прогноза будущей стоимости зеленого водорода, произведенного при помощи электролиза воды по технологиям PEM и АЕ электролиза с использованием ветровой (наземные ветровые турбины) и солнечной (фотовольтаика) электроэнергии, основанная на применении теории покомпонентных кривых обучения, в предположении, что оба основных компонента стоимости зеленого водорода – стоимость электролизера и стоимость энергии – подвержены действию эффектов обучения и со временем снижаются. В отличие от представленных в литературе способов расчета прогнозных значений приведенной стоимости зеленого водорода (LCOH) в будущем, данная методика позволяет пренебречь неопределённостью оценок некоторых технико-экономических параметров технологии электролиза и получить интервальные оценки прогнозных значений снижения стоимости зеленого водорода при удвоении объемов производства.

6. **Разработана** модель оценки потенциала обеспечения ценовой конкурентоспособности зеленого водорода на внутреннем рынке Российской Федерации, основанная на сценарном подходе и кривых обучения. С помощью данной модели **выявлены** ключевые факторы конкурентоспособности зеленого водорода, к которым отнесены стимулирование спроса и обеспечение максимально высоких темпов обучения в производстве водорода.

7. **Выявлены** основные инструменты преодоления блокировок развития инновационных технологий производства низкоуглеродного водорода в зарубежных странах, такие как: таксономия устойчивых проектов, углеродные контракты на

разницу, налоговые льготы, субсидии, государственные закупки, стандарты и нормативы, целевые программы и бюджетное финансирование НИОКР. **Предложены** варианты адаптации этих инструментов к специфике ЕАЭС. В результате анализа технологического, институционального и инфраструктурного ландшафта экономик стран ЕАЭС, к инструментам, обладающим наибольшим адаптационным потенциалом, отнесен вариант «зеленого финансирования» через включение водородных проектов в таксономию «зеленых проектов» ЕАЭС для привлечения ESG-инвестиций и создания единого регионального рынка водорода.

8. **Предложена** система интегральных показателей для оценки комплексной эффективности водородных проектов, включающая экономические, экологические, технологические, стратегические, социально-управленческие и инновационные показатели, такие как: чистая приведенная стоимость, энергетическая рентабельность, удельная себестоимость производства, углеродный след жизненного цикла, водный след, энергоэффективность электролиза, стабильность работы оборудования, индекс локализации, экспортный потенциал, индекс производственной безопасности, кадровая обеспеченность, уровень технологической готовности, индекс патентной активности. **Разработан и апробирован** программный продукт, позволяющий проводить оценку коммерческих водородных проектов по данной системе интегральных показателей. Разработанная система показателей позволяет учесть положительные экстерналии водородных проектов и стимулировать те проекты, которые имеют наилучший баланс коммерческой эффективности и положительных экстерналий.

9. **Разработана** таксономия инструментов стимулирования производства низкоуглеродного водорода в странах ЕАЭС и **предложен** алгоритм выбора наиболее эффективных инструментов в зависимости от удаленности технологической цепочки от границы эффективности в пространстве эколого-экономических координат. Таксономия включает инструменты стимулирования развития углеродного рынка, стимулирования внутреннего спроса на водород за счет развития смежных отраслей экономики, декарбонизация которых является приоритетной, стимулирование вовлеченности потребителей и развитие водородных хабов в регионах с богатыми возобновляемыми ресурсами и действующей инфраструктурой для использования водорода, например в портах и промышленных центрах.

10. **Предложена** концепция организационно – экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации. Концепция представляет собой систему преобразованного движения, в которой взаимодействуют пять подсистем: институционально-регуляторная, финансово –

инвестиционная, инновационно – технологическая, производственно – инфраструктурная и организационно – управленческая. **Определены** три уровня обратных связей в механизме: стратегический, операционный и рыночный. **Обоснованы** пять триггеров автономного функционирования механизма. **Систематизированы** роли ключевых акторов механизма в пяти блоках: государство, бизнес, наука и образование, международные партнёры, гражданское общество. **Определены** конкретные функции, ресурсы и показатели эффективности для каждого актора (стейкхолдера).

Теоретическая значимость диссертационного исследования основывается на формировании теоретико-методологических основ для комплексного анализа и управления развитием водородной энергетики в условиях энергетического перехода. Исследование обогащает научное понимание процессов энергетического перехода, рисков и барьеров внедрения инновационных технологий, вносит вклад в теорию path-dependence применительно к энергетическим системам, развивает методологию оценки эколого-экономической эффективности, теорию кривых обучения для сложных многокомпонентных систем, а также концептуальные основы кластерного развития и межсекторального взаимодействия в энергетике и методологию многокритериальной оценки проектов. Диссертационное исследование вносит вклад в развитие экономической науки, предложив эпистемологически комплементарный подход к познанию формирующейся отрасли водородной энергетики, основанный на интеграции методов анализа жизненного цикла (LCA), сетевого оболочечного анализа данных (NDEA) и проектирования с учётом ценностей (VSD). Такой подход позволяет согласовать различные типы экономического знания (теоретическое, эмпирическое, прогнозное и экспертное) и преодолеть познавательные ограничения монодисциплинарных и сугубо технико-экономических схем анализа.

Практическая значимость результатов исследования определяется возможностью их использования для совершенствования национальных и международных стратегий энергетического перехода, разработки дифференцированных политик и механизмов стимулирования внедрения водородных технологий. Результаты исследования могут служить основой для: создания систем поддержки принятия решений при проектировании устойчивых цепочек поставок водорода, формирования политики финансирования проектов, приоритизации инвестиций, разработки стандартов, расширения международного сотрудничества. Разработанные подходы прогнозирования стоимости и оценки эффективности проектов, а также предложенные инструменты и организационно-экономический механизм имеют прямое прикладное значение для государственных структур,

корпоративного сектора и научно-исследовательских организаций в Российской Федерации и странах ЕАЭС.

Обоснованность результатов исследования обеспечена полнотой учета факторов, влияющих на организационно-экономический механизм формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации.

Достоверность результатов исследования подтверждается согласованностью получаемых на их основе выводов с формированием и развитием водородной энергетики в Российской Федерации, а также положительными результатами внедрения основных научных результатов.

Апробация результатов исследования. Основные теоретические, методические и методологические положения, полученные результаты и выводы диссертационного исследования, были апробированы на следующих мероприятиях: III Международная научная конференция «В целях устойчивого развития цивилизации: сотрудничество, наука, образование, технологии. Путь Латинской Америки и стран Карибского бассейна к 17 ЦУР: комплексный подход» (2024 год, г. Москва, Россия), IX International Scientific Conference «New trends, strategies and structural changes: digital transformation and sustainable development» (2024 год, г. Москва, Россия), Virtual Conference on Recent Trends on Renewable Energy, Smart Grid and Electric Vehicle Technologies (2020 г., г. Веллор, Индия), «The 14th International Days of Statistics and Economics» (2020 г., г. Прага, Чехия), а также ряде международных научных семинаров по устойчивому развитию. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» по программам магистратуры экономического факультета, а именно в дисциплины: «Методология исследования проблем управления», «Введение в многомерный статистический анализ». Внедрение достигнутых результатов подтверждается справками от ООО «Новас Энерджи Сервисис» и ООО «СКАТ».

Публикации результатов исследований. Основные положения и научные результаты диссертационного исследования отражены в 48 научных работах общим объемом 115,06 п.л., из которых 22 публикации, индексируемые в международных базах Scopus и Web of Science, 10 публикаций, входящих в Перечень ВАК РФ / Перечень РУДН, а также 1 монография (32 п.л.). В публикациях, подготовленных в соавторстве, основные результаты, выносимые на защиту диссертации, разработаны лично автором.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем работы составляет 425 страниц, 27

таблиц, 48 рисунков, списка источников литературы из 707 источников и 2 приложений.

II. СТРУКТУРА РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА

- 1.1 Энергетический переход и риски для мировой экономики
- 1.2 Проблема path-dependence в энергосистеме
- 1.3 Водородная энергетика как перспективный способ ускорения энергетического перехода
- 1.4 Теоретические основы организационно-экономического механизма формирования водородной энергетики

Выводы по первой главе

ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РАМКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА

- 2.1 Барьеры внедрения инновационных энергетических технологий на микроуровне экономической системы
- 2.2 Блокировки и барьеры развития водородной энергетики
- 2.3 Стимулирование производства водорода: зарубежный опыт и практическая реализация в ЕАЭС

Выводы по второй главе

ГЛАВА 3. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ЦЕПОЧЕК ПРОИЗВОДСТВА И ПОСТАВОК ВОДОРОДА

- 3.1 Экономическая и экологическая эффективность технологических цепочек производства водорода
- 3.2 Разработка (авторской) комплексной модели для эколого-экономической оценки системы производства водорода
- 3.3 Модель оценки сравнительной эколого-экономической эффективности технологических цепочек производства водорода для европейского региона

Выводы по третьей главе

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ПРОГНОЗА БУДУЩЕЙ СТОИМОСТИ ЗЕЛЕНОГО ВОДОРОДА С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ОБУЧЕНИЯ

- 4.1. Эффекты обучения в производстве водорода
- 4.2 Методика оценки темпов обучения в случае развития всех этапов технологической цепи
- 4.3 Прогноз снижения стоимости водорода в зависимости от объемов производства

Выводы по четвертой главе

ГЛАВА 5. ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

5.1 Формирование водородной энергетики Российской Федерации и экономические проекты по её развитию

5.2 Оценка потенциала внутреннего спроса на водород в России и прогноз его реализации: сценарный подход

5.3 Организационно-экономические инструменты оптимизации и стимулирования развития водородной энергетики в Российской Федерации

5.4 Таксономия организационно-экономических инструментов развития водородной энергетики в Российской Федерации

5.5 Концепция организационно – экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации

Выводы по пятой главе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

ПРИЛОЖЕНИЯ

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Определено современное состояние и перспективы развития мирового рынка водорода в контексте энергетического перехода, целей по декарбонизации мировой экономики и необходимых для их достижения структурных изменений в промышленности.

Комплексное определение стратегической роли водорода сформулировано в условиях структурной трансформации мировой экономики, обусловленной достижением целей декарбонизации. Водород выступает перспективным инновационным энергоносителем, снижающим критические макроэкономические риски и устраняющим системные блокировки на пути к углеродной нейтральности. Энергетический переход — глобальный процесс отказа от ископаемого топлива в пользу возобновляемых источников — отличается от предыдущих технологических смен тем, что его драйвером является не коммерческая, а экологическая неэффективность углеводородных технологий. Этот переход требует глубоких структурных преобразований в секторах с трудно сокращаемыми выбросами.

Сценарий Net Zero by 2050 (NZE) МЭА служит ключевой измеримой стратегией энергетического перехода. Согласно NZE 2023, прогнозируются

критические изменения, подчеркивающие необходимость интеграции водорода:

1. Прогнозируемый рост доли водорода: доля водородного топлива в конечном потреблении энергии должна увеличиться с 1% к 2030 году до 8% к 2050 году, то есть вырасти в 8 раз.

2. Масштабы декарбонизации: реализация климатических целей, определенных в определяемых на национальном уровне вкладах (NDC), привела к сокращению целевых выбросов к 2030 году примерно на 5 Гт. Однако даже полная реализация NDC в развитых экономиках к 2030 году оставляет высокий уровень выбросов — около 5,5 тонн на душу населения, что указывает на сохранение крупной промышленной базы, требующей радикальной декарбонизации, где водород играет ключевую роль.

3. Риск кумулятивных выбросов: при эксплуатации действующих активов энергетического сектора до конца стандартного срока службы дополнительные кумулятивные выбросы за 2023–2050 годы составят около 600 Гт CO₂. На Китай приходится 45% (270 Гт CO₂) из-за значительного парка угольной генерации и масштаба промышленности (производство более половины мирового спроса на сырую сталь и цемент), что требует не только технологических улучшений, но и структурных изменений на основе низкоэмиссионных энергоносителей, включая водород.

4. Трансформация рынка труда: ожидается, что к 2030 году в сфере чистой энергии будет создано 30 миллионов новых рабочих мест, при этом около 13 миллионов рабочих мест в отраслях, связанных с ископаемым топливом, будут потеряны. Это соотношение (примерно 2:1) подчеркивает масштаб структурной перестройки рынка труда.

Прогнозируется стремительный рост мирового рынка водорода к 2050 году (Рис 1.), являясь системным ответом на необходимость структурных изменений в промышленности и минимизацию макроэкономических рисков.

Выявлены уникальные характеристики водорода для развития инновационных энергосистем:

(1) Обеспечение эффективного балансирования производства и потребления энергии, особенно при интеграции возобновляемых источников, что фундаментально для стабильности энергосистем.

Нестабильность выработки энергии от солнечных и ветровых электростанций требует механизмов крупномасштабного долгосрочного хранения. Водород, производимый методом электролиза с использованием избыточной энергии ВИЭ (P2G – power-to-gas), служит эффективным способом преобразования и хранения

энергии, необходимой для балансирования энергосистемы. Это критически важно для устранения блокировки совершенствования технологий ВИЭ, которая ведет к закреплению неоптимальных технических решений из-за отсутствия стимулов для инновационного развития.

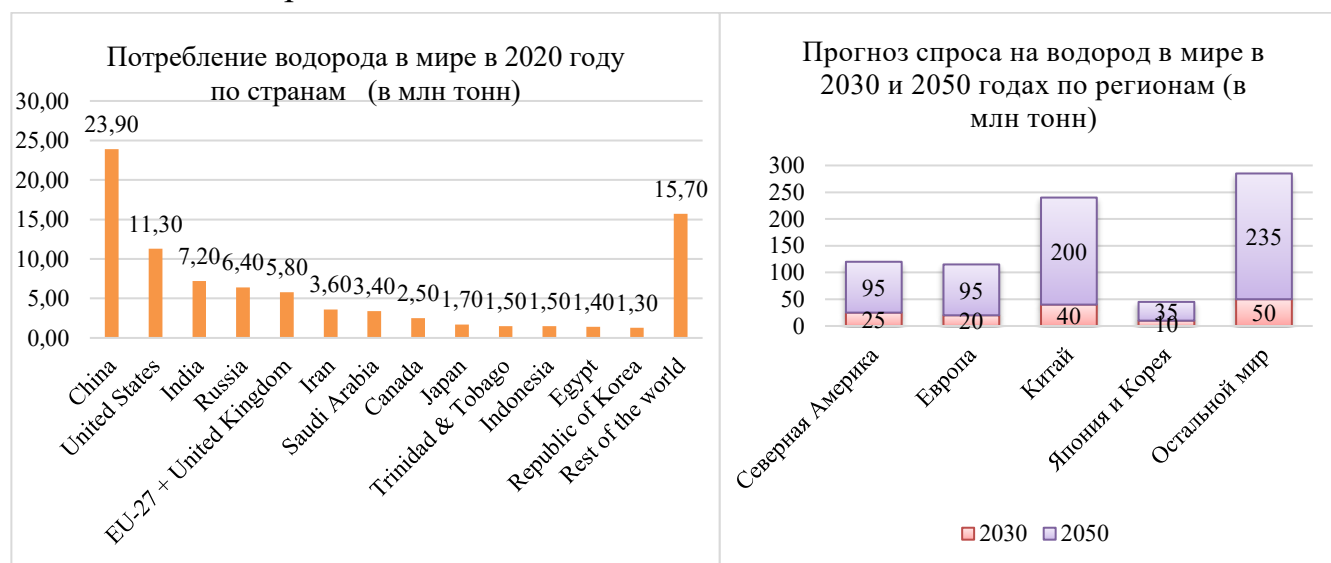


Рисунок 1. Потребление водорода в мире в 2020, перспектива 2030 г. и 2050 г.

Источник: составлено автором по Statista; IRENA. Hydrogen consumption worldwide in 2020, by country (in million metric tons) [Graph] [Электронный ресурс] // Statista. 2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/1292403/global-hydrogen-consumption-by-country/>. Hydrogen Council. Hydrogen for Net Zero—A Critical Cost-Competitive Energy Vector [Электронный ресурс]. — 2021. — URL: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero.pdf>.

(2) Возможность передачи энергии на большие расстояния и в труднодоступные регионы.

Энергетический переход осложняется риском высокой концентрации цепей поставок и традиционных энергоносителей. Производство нефти и газа, согласно сценарию NZE, будет концентрироваться у небольшого числа поставщиков, где доля Ближнего Востока увеличится с 25% до 40% к 2050 году. Способность водорода к транспортировке (в чистом виде или в составе смесей, в том числе, с использованием существующей газопроводной инфраструктуры) способствует диверсификации поставок и повышению энергетической безопасности, противодействуя геополитическим рискам. Кроме того, использование водорода для передачи энергии на большие расстояния позволяет частично использовать существующие производства и инфраструктуру, что является одним из способов устранения эффекта зависимости от прошлого пути (path-dependence).

(3) Предложение экономически эффективных решений для хранения энергии

по сравнению с аккумуляторными альтернативами.

Сценарий NZE прогнозирует к 2050 году рост установленной мощности стационарных аккумуляторов энергии (батарей) до 4200 ГВт. Если поведенческие изменения, необходимые для достижения целей декарбонизации, не произойдут, к 2030 году потребуется дополнительно 1,3 миллиона тонн критических минералов только для сектора электромобилей. Водородное хранение, особенно в крупномасштабном и долгосрочном формате, предлагает экономически эффективную альтернативу, которая снижает зависимость системы от критических минералов и уменьшает риск высокой концентрации цепей поставок инновационных энергетических технологий.

(4) Уникальная способность декарбонизировать трудно поддающиеся сокращению выбросов секторы, такие как промышленность, морской транспорт и авиация.

Для тяжелой промышленности и дальнего транспорта, сложно поддающихся электрификации, необходимы специальные меры политики. Даже полная реализация NDC приведёт к высоким остаточным выбросам из-за размера промышленной базы. МЭА разработало рамки для измерения водорода с низким уровнем выбросов, что напрямую связано со стратегией производства стали и цемента с близкими к нулю выбросами, подчеркивая роль водорода как необходимого инструмента радикальной трансформации капиталоемких и энергоемких промышленных секторов.

Выявленные характеристики научно подтверждают роль водорода как системного элемента инновационной энергетики, необходимого для преодоления макроэкономических рисков (асинхронный переток инвестиций) и блокировок развития (препятствование развитию альтернативных технологий ВИЭ), что фундаментально для достижения целей декарбонизации.

2. Раскрыта роль Российской Федерации в развитии мировой водородной энергетики как потенциального стратегического лидера, что обусловлено уникальным сочетанием инфраструктурных, технологических и ресурсных активов.

Российская Федерация рассматривает развитие водородной энергетики как стратегический ответ на ключевые глобальные вызовы, связанные с замедлением роста мирового спроса на энергоресурсы, изменением его структуры, а также ужесточением требований к углеродоемкости продукции и развитием нормативной базы по регулированию выбросов парниковых газов в странах ЕС, Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) и США. Концепция развития водородной энергетики, утвержденная Правительством РФ в августе 2021 года, нацелена на

позиционирование страны как одного из ключевых игроков в глобальном энергетическом переходе. Прогнозы указывают на многократное увеличение российского рынка водородной энергетики: ожидается, что к 2025–2035 годам он достигнет объема 2,2–3,9 млрд долларов США. Стратегия предполагает, что Россия имеет все шансы стать одним из лидеров на мировом рынке водорода и занять до 12% мирового рынка к 2035 году. Стратегическое лидерство РФ обусловлено уникальным сочетанием активов, позволяющих синергетически развивать низкоуглеродный водород. Россия обладает колоссальным потенциалом возобновляемых источников энергии (ВИЭ), который критически важен для производства низкоуглеродного водорода.

Выявлено, что наиболее распространенным источником для электролиза в заявленных проектах являются гидроэлектростанции (15% проектов), что объясняется наличием крупных рек и гидроэнергетических объектов. Также активно используются энергия ветра (13%) и солнечная энергия (13%), а атомные и приливные электростанции задействованы в 26% проектов. Использование возобновляемых источников энергии, в частности дешевой гидроэнергии, является основным конкурентным преимуществом, способствующим снижению углеродного следа и удельной себестоимости водорода (LCOH). Ключевым инфраструктурным активом является существующая развитая система транспортировки природного газа. Эта инфраструктура может быть синергетически использована для транспортировки водорода, в том числе в виде метаново-водородных смесей. Применение трубопроводной транспортировки смесей H_2 - CH_4 позволяет сократить затраты на логистику до 0,8–1,2 долл.США/кг водорода.

Доказано, что важным фактором, позволяющим России стать лидером, является отсутствие зависимости от прошлого пути (path-dependence) в развитии технологий электролиза. Это дает возможность опираться на лучшие мировые достижения в производстве электролизеров. Активное масштабирование производства (потенциально в 4500 раз для удовлетворения внутреннего спроса) должно запустить эффект обучения (learning-by-doing), характерный для высокотехнологичных отраслей. Для обеспечения максимального снижения затрат (достижения темпа обучения 10,1%) и ценовой конкурентоспособности критически важен импорт и адаптация современных технологий производства электролизеров.

Россия стремится стать ключевым мировым центром по поставке низкоуглеродного водорода, что отражено в формировании экспортно-ориентированных кластеров и логистических коридоров. Разработаны три основных экспортных коридора: Северо-Западный (для ЕС), Восточный (для АТР) и

Арктический (с использованием Северного морского пути).

- Восточный кластер (Сахалин): ориентирован на Азиатско-Тихоокеанский рынок. Обладает логистическими преимуществами, например, расстояние до Токио составляет 1100 км, что на 40% ближе, чем из Австралии. Стоимость доставки в Японию оценивается в 1,8–2,1 долл.США/кг водорода, что ниже, чем 2,5–3,0 долл.США/кг из Среднего Востока. В кластере сочетается производство «голубого» (паровая конверсия метана с CCS) и «зеленого» (на базе ветрогенерации) водорода.
- Северо-Западный кластер (Мурманск, Калининград): сфокусирован на производстве «зеленого» водорода с использованием энергии ветропарков. Расстояние до ключевых европейских хабов (Роттердам, Гамбург) составляет 1200–1500 км, что на 30% короче маршрутов из Северной Африки.
- Арктический кластер: требует инновационных решений, включая плавучие электролизные станции на базе АЭС малой мощности и подземные хранилища в вечной мерзлоте.

Доказана конкурентоспособность РФ по стоимости водорода. Проведенный анализ LCOH (скорректированной стоимости производства водорода) для российских проектов показал, что в российских низкоуглеродных водородных проектах колеблется от 1,2 до 11,7 долл.США за килограмм водорода, что соответствует среднемировым показателям (Рис.2).

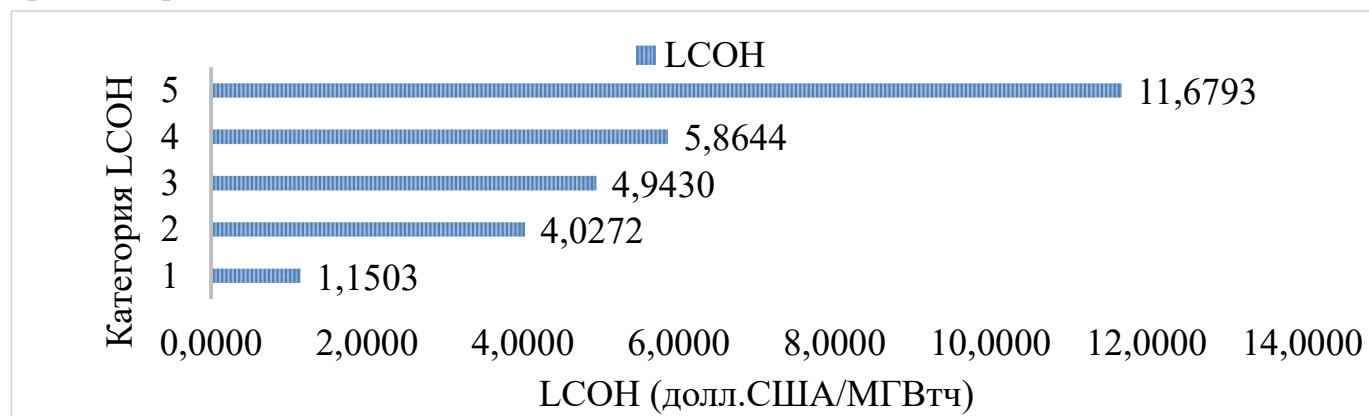


Рисунок 2. LCOH российских проектов низкоуглеродного водорода.

Источник: составлено автором.

Медианное значение для «зеленого» водорода составляет 4,9 долларов США за килограмм, что несколько ниже среднемирового уровня. При этом для обеспечения ценовой конкурентоспособности на внутреннем рынке необходимо снизить стоимость до целевого уровня 3,8–4,1 долл.США/кг для «зеленого» водорода. Это достигается путем масштабного стимулирования спроса и обеспечения высоких темпов обучения в производстве.

Таким образом, раскрытый пункт новизны демонстрирует, что Российская

Федерация обладает фундаментальными предпосылками (ресурсными, технологическими и инфраструктурными) для трансформации из традиционного поставщика ископаемого топлива в ключевой мировой центр низкоуглеродного водорода, что соответствует ее стратегическим целям и прогнозируемому экономическому росту рынка в размере 2,2–3,9 млрд долларов США в период до 2035 года.

3. С использованием методологии зависимости от прошлого пути в социотехнических системах (path-dependence) определены блокировки развития водородной энергетики

Методология зависимости от прошлого пути (path-dependence) в социотехнических системах рассматривается как аналитический инструмент выявления барьеров инновационного развития энергетики и трактуется как зависимость текущих и будущих возможностей системы от ранее принятых решений, накопленных инвестиций и технологической траектории, затрудняющих переключение на альтернативные пути развития. В отличие от традиционно описываемой «углеродной блокировки», обусловленной доминированием ископаемого топлива, в исследовании идентифицированы новые типы блокировок, характерные для становления рынков на основе ВИЭ и влияющие на перспективы водородной энергетики (Табл.1):

Таблица 1. Блокировки инновационного развития, характерные для энергетических систем, основанных на технологиях ВИЭ.

| Вид блокировки | Риски | Примеры |
|--|--|--|
| Препятствия для развития альтернативных технологий возобновляемой энергетики | Закрепление неоптимальных технических решений за счет ориентации на наиболее коммерчески зрелые технологии | Препятствия для развития приливной энергетики в Великобритании |
| Препятствия для развития децентрализованных систем | Олигополизация энергетического рынка, нарушение энергетической справедливости | Развитие крупных солнечных ферм в Израиле |
| Препятствия для совершенствования технологий ВИЭ | Отсутствие стимулов для инновационного развития, закрепление неоптимальных технических решений | Непропорциональное развитие ветровой энергетики в Германии |
| Чрезмерная ориентация на природно-климатические условия | Недиверсифицированное развитие ВИЭ | Развитие гидроэнергетики в Бразилии |
| Искажение рыночных сигналов | Монополизация и олигополизация энергетического рынка | Развитие солнечной и ветровой энергетики в Чили |

Источник: составлено автором.

1) Блокировки развития альтернативных технологий возобновляемой энергетики. Постоянное использование устоявшихся технологий ВИЭ формирует заинтересованные стороны, адаптированные к ним, что препятствует проникновению альтернативных технологий. Пример: приливная энергетика в Великобритании имеет эффективность до 80%, но занимает долю процента в энергобалансе, так как решения ориентированы на ветровую энергию, усиливая отрицательную обратную связь для инвестиций и масштабирования.

2) Блокировки развития децентрализованных энергетических систем. Политическое давление на регуляторы для быстрого достижения целевых показателей ВИЭ часто приводит к поддержке крупных проектов в ущерб децентрализованным. Пример: Израиль достиг целей 10% ВИЭ к 2020 г., 25% к 2025 г., 30% к 2030 г., сконцентрировав более 80% мощности в крупных проектах, хотя регуляторы признают, что это не всегда оптимально с точки зрения сети, землепользования и финансов.

3) Блокировки совершенствования технологий ВИЭ. Механизм фиксированных тарифов (feed-in tariff), как правило, основанный на подходе «затраты плюс» и задаваемый на длительный период (часто до 20 лет и более), снижает стимулы к модернизации и переходу на более инновационные решения. Пример — Германия: высокие фиксированные тарифы поддержали быстрый рост ветроэнергетики, но одновременно закрепили одностороннюю технологическую специализацию и ослабили стимулы к развитию альтернативных направлений ВИЭ.

4) Блокировки чрезмерной ориентации на природно-климатические условия. Фокус на наиболее подходящую локально технологии (солнечная — в Саудовской Аравии, ветровая — в Ирландии, гидроэнергетика — в Бразилии) может сделать замену другими технологиями экономически и энергетически чрезмерно дорогой, а также усилить экологические эффекты при высокой интенсивности использования. Пример — Бразилия, где гидроэнергетика обеспечивает более двух третей выработки электроэнергии: накопленная зависимость сопровождается значимыми экологическими последствиями и высокой стоимостью технологической замены при требованиях энергобезопасности.

5) Блокировки искажения рыночных сигналов. Регуляторные преференции (субсидии, налоговые льготы, страхование рисков) способны закреплять рыночную власть отдельных игроков и формировать трудноизменяемую неконкурентную структуру даже после сворачивания мер поддержки. Пример — Чили: доля ветровой и солнечной генерации выросла с незначительной в 2014 году до более 18 000 ГВт·ч в 2021 году, однако прежние решения способствовали

закреплению доминирования отдельных участников рынка.

Водородная энергетика способна снижать интенсивность ряда блокировок path-dependence (прежде всего технологических, экономических, юридических и психологических). За счёт частичного использования известных технологий и существующей инфраструктуры снижается риск дестабилизации рынка труда, а более равномерное распределение производителей водорода по странам и регионам уменьшает риск сверхвысокой концентрации цепей поставок. Вместе с тем экономические и экологические аспекты развития инновационных водородных технологий, особенно производства «зелёного» водорода, требуют постоянного мониторинга во избежание формирования новых блокировок. С учётом многовариантности технологической цепочки производства, хранения и транспортировки водорода и её зависимости от регионального контекста такой мониторинг целесообразно вести на страновом или региональном уровне. Определенные в исследовании типы блокировок создают основу для дальнейшего изучения барьеров инновационного развития энергетического сектора и разработки эффективных механизмов управления энергетическим переходом с учетом долгосрочных последствий принимаемых сегодня решений.

4. Разработана модель оценки комплексной эколого-экономической эффективности цепочки производства и поставок водорода на основе гибридного подхода, включающего в себя методологию анализа и оценки жизненного цикла продукции (LCA), методологию сетевого оболочечного анализа данных (NDEA) и методологию ценностно-ориентированного проектирования (VSD).

Модель базируется на гибридном подходе, который интегрирует три методологических блока: 1-Методология анализа и оценки жизненного цикла продукции (LCA), применяемая для системного анализа производственных систем и количественного определения экологических последствий; 2-Методология ценностно-ориентированного проектирования (VSD), используемая для формирования иерархии значимости и отбора наиболее критичных категорий экологического воздействия; 3-Методология сетевого оболочечного анализа данных (NDEA), выбранная для агрегации разнородных экономических и экологических показателей и оценки эффективности многоступенчатых производственных систем. Данный гибридный подход обеспечивает более полное и сбалансированное понимание устойчивости системы по сравнению с традиционными методами. В разработанной NDEA-модели цепочка поставок водорода в общем случае состоит из четырех стадий: 1-Производство топлива/электроэнергии; 2-Производство водорода;

3-Хранение водорода; 4-Транспортировка водорода потребителю (Рис.3).

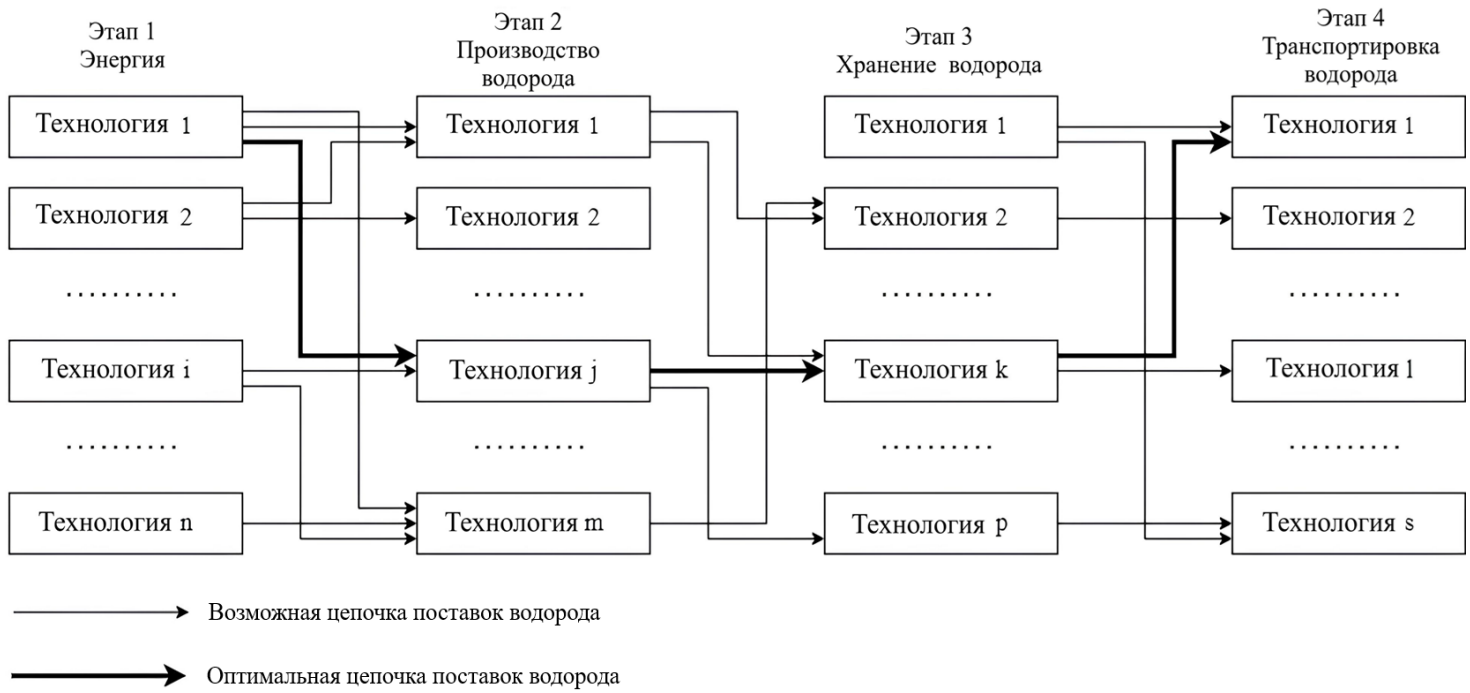


Рисунок 3. Цепочки поставок водорода.

Источник: составлено автором.

В данном случае задача дробного линейного программирования сформулирована следующим образом:

$$\max E_I = \frac{\sum_{r=1}^k u_r y_{r0} - \sum_{s=k+1}^p u_s y_{s0}^{bad}}{\sum_{i=1}^M v_i x_{i0}} \quad (1)$$

или

$$\max E_{II} = \frac{\sum_{r=1}^k u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^M v_i x_{i0} + \sum_{s=k+1}^p u_s y_{s0}^{bad}} \quad (2)$$

где x_i ($i=1, \dots, M$) - входные данные; y_r ($r=1, \dots, k$) - желательные выходные данные; y_r ($r=k+1, \dots, p$) - нежелательные выходные данные; u_i ($i=1, \dots, k+p$) и v_i ($i=1, \dots, M$) являются весовыми коэффициентами; E_I и E_{II} показатели экологической эффективности.

Оба подхода позволяют интегрировать желаемые (экономические) и нежелательные (экологические) результаты производственного процесса в единый показатель эффективности и максимизировать их. При втором подходе нежелательные воздействия на окружающую среду рассматриваются так же, как и затраты, и сокращаются аналогично. И тот, и другой подход дают эквивалентные результаты.

На каждой стадии определены следующие параметры:

- Свободные входы (экономические показатели): Капитальные затраты

(CAPEX) и затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание (OPEX).

- Свободные нежелательные результаты (экологические показатели): Четыре агрегированных категории воздействия на окружающую среду.
- Промежуточные выходы: Количество полезного продукта (энергии или водорода).

В сетевых моделях общая эффективность DMU (системы) может быть рассчитана по-разному. Одним из простейших методов является вычисление показателей эффективности (E^i) каждого этапа отдельно (оставляя значения промежуточных выходных данных неизменными), а затем интегрирование их в коэффициент эффективности системы (E) с использованием аддитивной

$$E = E^1 + E^2 + \dots + E^T \quad (3)$$

или мультипликативной свертки

$$E = E^1 \times E^2 \times \dots \times E^T \quad (4)$$

Комплексная эколого-экономическая эффективность цепочки (или эко-эффективность) рассчитывается как свертка комплексной эко-эффективности каждого этапа. В данном исследовании использовалась мультипликативная свертка.

Проведен численный эксперимент с целью сравнительной оценки эколого-экономической эффективности технологических цепочек производства водорода. Апробация проводилась на данных по европейскому региону и охватывала 22 варианта промышленно освоенных технологий получения водорода. Из-за ограниченной доступности данных по всем вариантам хранения и транспортировки водорода в базе EcoInvent, численный пример был ограничен анализом двух наиболее изученных этапов: 1-Этап производства энергии/топлива (смоделирован по подходу "cradle-to-gate"); 2-Этап производства водорода. Расчеты комплексной эколого-экономической эффективности (свертка показателей эффективности производства энергии/топлива и производства водорода) проводились в программном обеспечении MaxDEA.

Результаты численного эксперимента (Рис.4) позволили выделить три наиболее эффективные технологические цепочки поставок водорода, продемонстрировавшие наивысшие показатели эффективности системы: 1. Гидро-энергетика – электролиз PEM (H-PEMEC); 2. Атомная энергетика – электролиз PEM (N-PEMEC); 3. Ветровая энергия – электролиз PEM (W-PEMEC). Данные цепочки поставок водорода показали одинаковые показатели экологической эффективности на первом и втором этапах, что объясняется низким негативным воздействием на окружающую среду, связанным с использованием возобновляемых и низкоуглеродных источников энергии (ветер, вода, ядерная энергия).

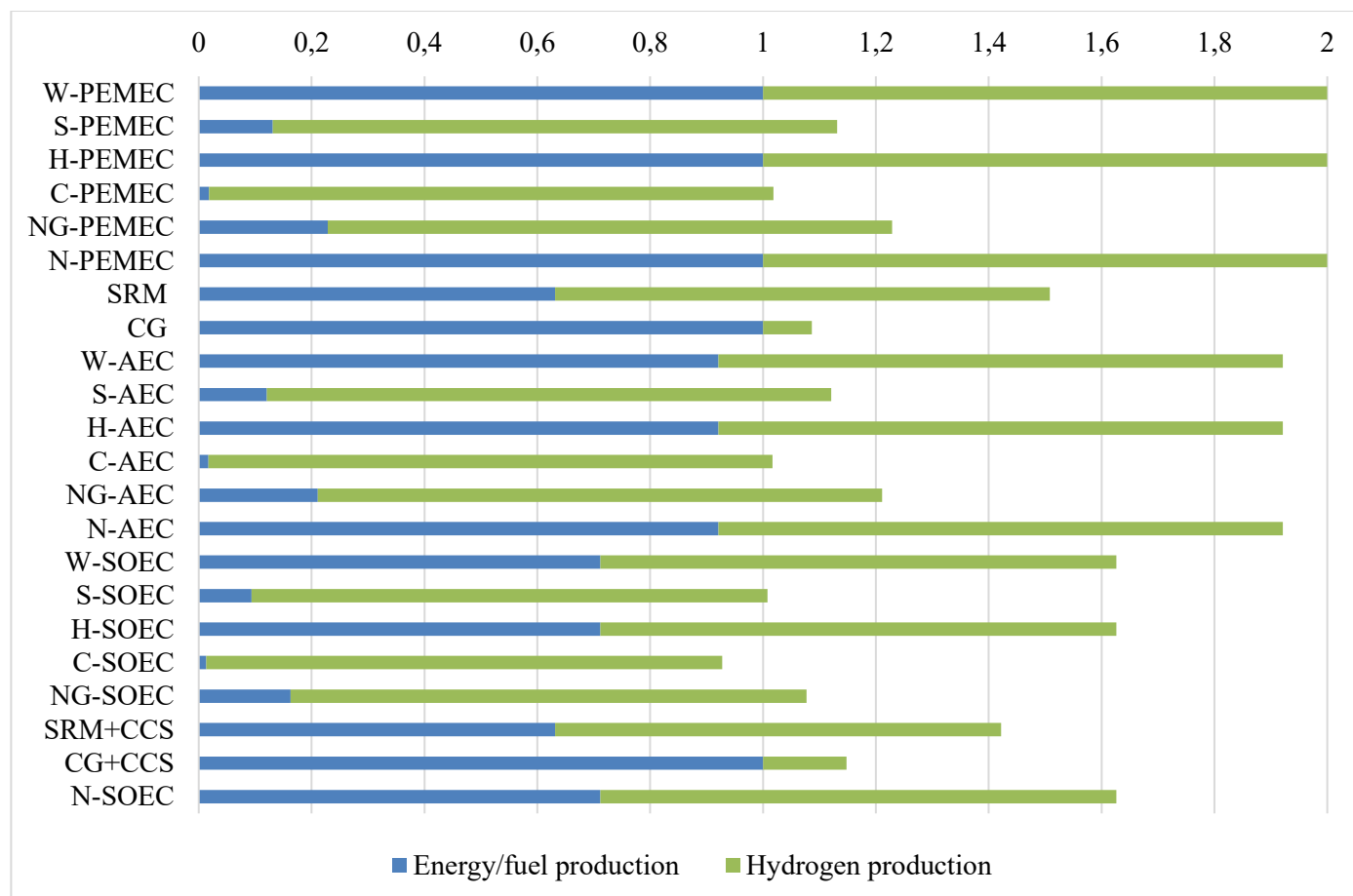


Рисунок 4. Показатели эколого-экономической эффективности цепочек поставок водорода.

Источник: составлено автором.

Предложенная гибридная методология (LCA, NDEA, VSD) обеспечивает детальную оценку устойчивости системы, учитывающую не только эффективность, но и этические последствия, способствуя принятию сбалансированных решений. Основной вклад разработанной модели заключается в предложении нового подхода к моделированию устойчивых цепей поставок водорода, который сочетает развитый математический аппарат NDEA и LCA, при этом не требует полного знания потребностей конечных пользователей. Это делает модель универсальным инструментом, применимым на любом этапе стратегического планирования. Таким образом, разработка и применение гибридной модели оценки эколого-экономической эффективности подтверждает высокую эффективность именно тех цепочек, которые основаны на использовании возобновляемой и низкоуглеродной электроэнергии в сочетании с передовыми технологиями электролиза (PEM).

5. Разработана методика прогноза будущей стоимости зеленого водорода, произведенного при помощи электролиза воды по технологиям PEM и АЕ электролиза с использованием ветровой (наземные ветровые турбины) и солнечной (фотовольтаика) электроэнергии.

Разработанная методика прогноза будущей стоимости зеленого водорода, произведенного посредством электролиза воды с использованием ветровой (наземные ветровые турбины) и солнечной (фотовольтаика) электроэнергии, представляет собой значимый вклад в формирование механизмов устойчивого развития экономики промышленных отраслей, комплексов, предприятий. Данная разработка, опирается на применение теории покомпонентных кривых обучения, что позволяет получить интервальные оценки снижения стоимости конечного продукта при удвоении объемов производства. Методика базируется на фундаментальном законе теории обучения, или «обучении на практике» (learning-by-doing), который постулирует, что удельная себестоимость продукции демонстрирует снижение по мере увеличения совокупного (кумулятивного) объема производства. Кривые обучения, таким образом, выражают гипотезу о том, что затраты на освоение технологии уменьшаются на постоянную процентную долю при каждом удвоении установленной мощности.

В контексте производства зеленого водорода, получаемого путем электролиза воды с питанием от возобновляемых источников энергии (ВИЭ), наиболее существенное влияние на конечную стоимость оказывают два ключевых компонента: стоимость электролизных установок и стоимость возобновляемой электроэнергии. Доля электроэнергии в стоимости производства водорода составляет, по оценкам, от 30% до 60%. Ввиду того, что технологический прогресс и эффекты обучения затрагивают оба эти элемента — как электролизеры, так и генерацию ВИЭ (солнечную и ветровую) — в исследовании была применена методология покомпонентной кривой обучения.

Математическая модель, используемая для системы, состоящей из двух основных затратных компонентов, подверженных обучению, а также компонента, не связанного с обучением (например, эксплуатационные расходы, составляющие около 10% от общей стоимости), имеет вид:

$$C(X_t) = \sum_i \alpha_i C_0 \left(\frac{X_t}{X_0} \right)^{-r_i} = C_0 \left(\alpha_1 \left(\frac{X_t}{X_0} \right)^{-r_1} + \alpha_2 \left(\frac{X_t}{X_0} \right)^{-r_2} + \alpha_3 \right) \quad (5)$$

где α_1 и α_2 — доли стоимости электролизера и энергии соответственно, r_1 и r_2 — соответствующие показатели обучения, а α_3 — доля компонента, не связанного с обучением. Такой многокомпонентный подход признается адекватным и практичным для оценки ранней скорости обучения на уровне компонентов.

Ключевым преимуществом разработанной методики является ее способность пренебречь неопределённостью оценок ряда технико-экономических параметров, которые традиционно необходимы для расчета прогнозных значений приведенной

стоимости водорода (LCOH, Levelized Cost of Hydrogen). Оценка LCOH сопряжена с высокой степенью неопределенности, поскольку требует точного определения множества трудноизмеримых или конфиденциальных параметров. К таким параметрам относятся: коэффициент использования мощности, который сильно зависит от колебаний мощности ВИЭ; режим работы системы (сетевой или автономный); коэффициент деградации стека электролизера (снижение эффективности), данные о котором часто являются конфиденциальными; а также расходы на замену стека и экономический срок службы установки.

Разработанная упрощенная методика позволяет избежать необходимости расчета этих неопределенных технико-экономических параметров. Вместо этого, она использует отношение текущих объемов производства к начальным (X_t/X_0) для прогнозирования снижения стоимости.

Для практической реализации методики был проведен мета-анализ исторических данных с целью оценки темпов обучения (LR) для ключевых технологических компонентов. В исследовании были рассмотрены наиболее зрелые и коммерциализированные технологии электролиза — щелочные электролизеры (AE) и электролизеры с полимерной электролитической мембраной (PEM), имеющие уровень готовности TRL 9.

Расчеты показали, что темп обучения капитальных затрат (CAPEX) для электролизеров AE и PEM является одинаковым: при удвоении производства их стоимость снижается в среднем на 4%. Эта оценка соответствует пределам, указанным в литературе для других технологий в энергетическом секторе, хотя и является относительно консервативной ввиду ранней стадии коммерциализации рынка электролизеров.

В отношении возобновляемой генерации исторический анализ несубсидируемой LCOE (приведенная стоимость электроэнергии) ветровой и солнечной энергии показал существенные различия в темпах обучения (Табл.2): Таблица 2. Темпы обучения в зависимости от источника энергии и его доли.

| Доля энергии по типу | Нижняя граница | Медиана | Верхняя граница |
|----------------------|----------------|---------|-----------------|
| Доля энергии 30% | | | |
| Ветряная | 4% | 5% | 5% |
| Солнечная | 7% | 7% | 8% |
| Доля энергии 60% | | | |
| Ветровая | 6% | 6% | 7% |
| Солнечная | 10% | 10,1% | 10,2% |

Источник: составлено автором.

- Для ветровой энергии (наземные турбины) темп обучения при удвоении производства составляет в среднем 8,01%, варьируясь в интервале от 7,35% до 9,63%.
- Для солнечной энергии (фотовольтаика) темп обучения значительно выше (почти в два раза), достигая медианы 14,35%, с диапазоном от 14,28% до 14,44%.

На основе полученных темпов обучения компонентов и с учетом двух сценарных допущений относительно доли энергии в конечной стоимости водорода (30% или 60%), методика позволяет получить интервальные оценки снижения стоимости зеленого водорода при двукратном увеличении кумулятивных объемов производства ($X_t/X_0 = 2$).

Согласно расчетам, агрегированная скорость снижения стоимости зеленого водорода составляет от 4% до 10,2%. Наиболее высокий темп обучения (до 10,2%) прогнозируется в сценариях, где производство основано на солнечной энергии и доля стоимости электроэнергии в конечной стоимости высока (60%). Это подтверждает, что технологии ВИЭ, особенно солнечная энергетика, вносят наиболее существенный вклад в снижение конечной стоимости зеленого водорода. Несмотря на то, что полученные оценки (4%–10,2%) являются более консервативными по сравнению с некоторыми оптимистичными прогнозами в литературе, они демонстрируют потенциал для существенного удешевления технологии. Эти результаты позволяют ожидать достижение ценового паритета зеленого водорода с традиционными (серым и коричневым) видами водорода примерно к 2030–2035 годам, при условии сохранения текущих темпов технологического развития и масштабирования производства. Таким образом, разработанная методика служит надежным инструментом для количественной оценки перспектив водородной энергетики, учитывая сложную динамику обучения и взаимодействия ключевых технологических компонентов.

6. Разработана модель оценки потенциала обеспечения ценовой конкурентоспособности зеленого водорода на внутреннем рынке РФ, основанная на сценарном подходе и кривых обучения.

Концепция развития водородной энергетики (утверждена Правительством РФ) определяет стимулирование внутреннего спроса на водород и энергетические смеси как ключевую задачу активации эффектов масштаба и обучения (learning-by-doing). Для оценки потенциала ценового паритета и конкурентоспособности была разработана модель сценарного прогнозирования спроса и методология кривых обучения (learning curves) для оценки снижения производственной стоимости. Модель позволяет оценить потенциал внутреннего спроса на водород в среднесрочной перспективе с учётом замещения углеродных топлив в углеродоёмких

секторах экономики, выявляя прогнозное снижение скорректированной стоимости производства низкоуглеродного водорода (LCOH) за счёт эффектов масштаба и обучения.

Ввиду недостатка исторических данных для комплексной прогнозной модели, учитывающей государственную поддержку, развитие инфраструктуры и климатическое законодательство, был использован сценарный подход. Рассмотрены три сценария реализации спроса на зеленый водород в РФ: пессимистичный, реалистичный и оптимистичный. Динамика спроса в транспортном секторе аппроксимирована на основе исторической динамики распространения автомобилей на альтернативных видах топлива в странах ЕС, обеспечивая эмпирическую основу для прогнозов. Прогноз снижения стоимости водорода базируется на кривых обучения, связывающих кумулятивный объём производства с удельными затратами. Использованы две оценки темпа обучения (Learning Rate): 5% (минимальная) и 10,1% (максимальная), отражающие разброс в зависимости от типа электролизера и источника возобновляемой энергии. Начальная стоимость "зеленого" водорода установлена на уровне 15 долл.США/кг водорода.

Моделирование сосредоточено на двух наиболее перспективных для декарбонизации в РФ секторах. Металлургия: на основе объёма производства стали 70 млн тонн и удельного потребления водорода 50 кг/т стали потенциал оценивается в 3,5 млн тонн в год. Автодорожный транспорт (грузовой, автобусный, легковой): потенциал замещения топлива составляет 14,697 млн тонн в год. Таким образом, суммарный потенциал потребления водорода в секторе производства стали и автодорожном секторе оценивается в 18,197 млн тонн в год.

Применение сценарного подхода и методологии кривых обучения позволило спрогнозировать сроки достижения ценовой конкурентоспособности (определяемой как снижение первоначальной стоимости на 50%, то есть до 7,5 долл.США за 1 кг водорода), которые критически зависят как от темпов стимулирования спроса, так и от темпов обучения (Табл.3 и Рис.5).

Таблица 3. Результаты сценарного подхода.

| Сценарий | Описание динамики спроса | Темп обучения (LR) | Срок достижения снижения стоимости на 50% (15 → 7,5 долл.США) | Прогнозируемая стоимость к концу прогнозного периода (долл.США/кг H ₂) |
|----------------|--|--------------------|---|--|
| Пессимистичный | Отсутствие системной господдержки (0,5–1% от потенциала в год) | 5% | Не достигается на горизонте 100 лет | 9,99 |
| | | 10,1% | Достигается через 50 лет | 5,96 |

| | | | | |
|----------------------|--|-------|-------------------------------------|------|
| Реалистичный | Введение мер господдержки, аналогичных ЕС (3% в металлургии) | 5% | Не достигается | 9,19 |
| | | 10,1% | Достигается через 21 год | 4,93 |
| Оптимистичный | Введение максимальных мер господдержки (5% в металлургии) | 5% | Не достигается | 8,24 |
| | | 10,1% | Достигается уже через 12 лет | 3,84 |

Источник: составлено автором

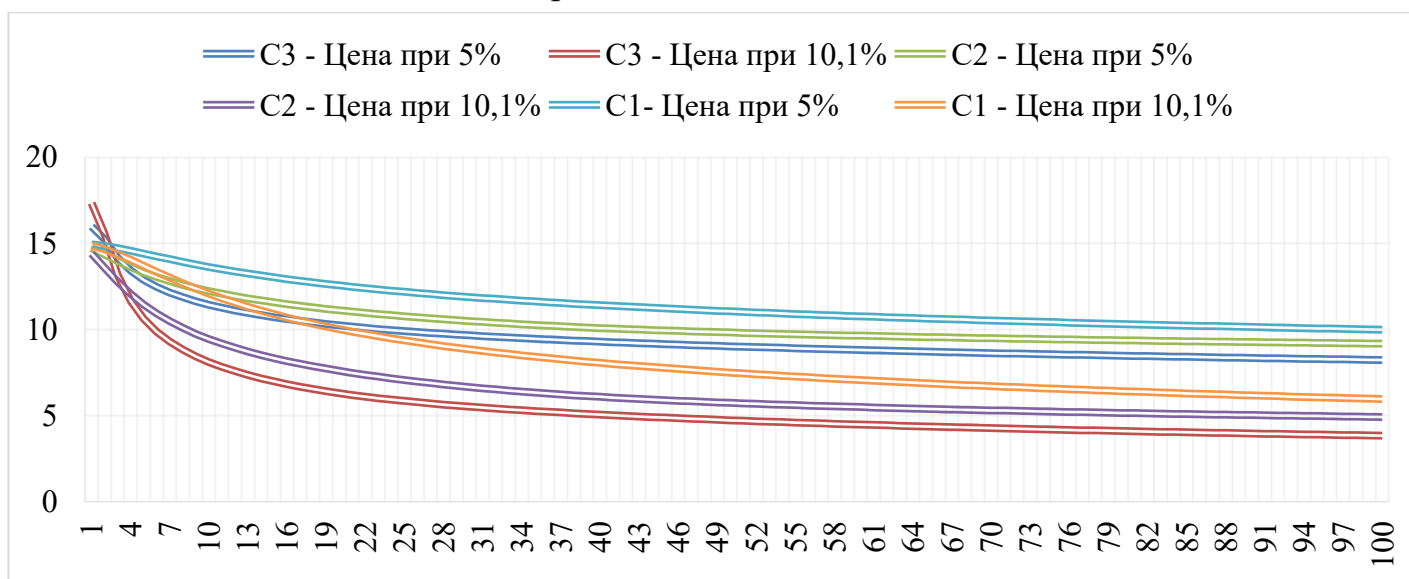


Рисунок 5. Прогноз снижения стоимости зеленого водорода за счет реализации эффекта обучения в производстве (learning-by-doing) по трем сценариям спроса.

Источник: расчеты автора.

Наиболее значимое сокращение затрат (до 50% от исходного уровня в 15 долл.США/кг водорода) достигается только при оптимистичном сценарии и максимально высоком темпе обучения в 10,1%. В этом случае удельная себестоимость снижается до 7,5 долл.США/кг водорода уже через 12 лет. При этом прогнозируемая стоимость «зеленого» водорода в рамках наиболее благоприятного сценария (Оптимистичный, 10,1% LR) на конец прогнозного периода составит 3,84 долл.США/кг водорода. Эта оценка демонстрирует потенциальную возможность приближения к медианному значению ожидаемой LCON российских проектов (которое, по расчетам, составляет 4,9 долл.США/кг водорода) и достижению ценового уровня, необходимого для конкуренции на экспортных рынках (целевой уровень для РФ: 3,2-4,1 долл.США/кг для зеленого водорода).

Результаты сценарного моделирования показали, что для обеспечения ценовой конкурентоспособности зелёного водорода на внутреннем рынке РФ необходима активация двух ключевых факторов: значительное стимулирование спроса и

обеспечение высоких темпов обучения в производстве. Реализация мер по быстрому росту внутреннего спроса критически важна для активации эффектов масштаба и обучения. Однако введение масштабных мер государственной поддержки спроса представляется затруднительным.

Обеспечение высоких темпов обучения признано более реалистичным способом достижения конкурентоспособности и предполагает активное ускорение технологического развития. Высокие темпы обучения (10,1% и выше) активируются при стремительном росте объёмов производства. Важным преимуществом России является отсутствие проблемы path-dependence (зависимости от прошлого пути) в технологиях электролизеров, поскольку отрасль зелёной водородной энергетики формируется с нуля. Это открывает возможность для импорта и адаптации современных технологий производства электролизеров. Необходимо внедрение организационно-экономических механизмов субсидирования НИОКР, создания центров компетенций и технологического трансфера для ускоренного выхода на уровень промышленной готовности ($TRL \geq 7$).

7. Выявлены основные инструменты преодоления блокировок развития инновационных технологий производства низкоуглеродного водорода и предложены варианты адаптации этих инструментов к специфике ЕАЭС.

Развитие водородной энергетики является стратегическим императивом в контексте глобального энергетического перехода и достижения целей по декарбонизации. Анализ ведущих мировых практик свидетельствует о необходимости комплексного подхода, сочетающего директивное государственное стимулирование и привлечение частных инвестиций. Выявлены группы инструментов, направленные на преодоление блокировок развития инновационных энергетических технологий (Табл.4).

Таблица 4. PESTEL-анализ инструментов, направленных на преодоление блокировок развития инновационных энергетических технологий

| PESTEL | Ключевые инструменты | Эффект | Пример |
|-----------|---|--|--|
| Political | Госпрограммы, бюджет НИОКР, «хабы» | Снижает политико-институциональную неопределённость и ускоряет запуск проектов | Regional Clean Hydrogen Hubs (США) как модель кластерного развития водорода |
| Economic | CfD/аукционы премий, субсидии, налоговые льготы | Закрывает ценовой разрыв и делает проекты банковскими | European Hydrogen Bank: фиксированная премия евро/кг H ₂ до 10 лет (аукционы); США: 45¢ до 3 долл.США/кг для «чистого» водорода |

| | | | |
|---------------|---|--|---|
| Social | Стимулирование спроса, формирование единого рынка | Повышает принятие и формирует устойчивый спрос со стороны отраслей/покупателей | Требования к работе с сообществами в программе хабов США - элемент общественной легитимности |
| Technological | Поддержка электролиза, демонстрации, инфраструктура/CUS | Ускоряет технологическое обучение и масштабирование цепочки поставок | Clean Hydrogen Partnership (EC): финансирование исследований/демонстраций на 184,5 млн евро |
| Environmental | Пороги углеродной интенсивности, требования LCA | Гарантирует климатический эффект и защищает рынок от «псевдозелёных» поставок | Таксономия ЕС для водорода: ориентир <3 тCO ₂ e/тH ₂ и критерий снижения выбросов 73,4%; RFNBO: минимум 70% экономии выбросов |
| Legal | Стандарты, сертификация/определения, нормы соответствия | Создаёт юридически значимые определения и правила доступа к стимулам | Критерии устойчивости /соответствия в рамках подходов ЕС (таксономия и требования к порогам) |

Источник: составлено автором.

Таксономия ЕС является основополагающим инструментом для стандартизации критериев устойчивого развития и переориентации финансовых потоков. Она устанавливает требование к низкоуглеродному водороду: углеродная интенсивность менее 3 тонн CO₂-эквивалента на тонну, а для "зелёного" водорода обязательны принципы дополненности и временной/географической корреляции при использовании ВИЭ. В 2023–2024 гг. европейские компании инвестировали в соответствующие проекты 440 млрд евро; компании с высокой степенью соответствия демонстрируют финансовую доходность на уровне 110% (с 2019 г.), подтверждая связь между экологической ответственностью и финансовой эффективностью.

Финансовые инструменты прямого стимулирования включают углеродные контракты на разницу (CfD) и Европейский водородный банк (ЕНВ), предоставляющий производителям фиксированную премию на 10 лет (максимум 4 евро/кг водорода). Первый аукцион показал премии в диапазоне 0,37–0,48 евро/кг водорода. В США Закон о снижении инфляции предусматривает налоговые кредиты до 3 долл.США/кг, Южная Корея предоставляет 10-летнее освобождение от корпоративного налога для производителей "зелёного" водорода.

Субсидии и целевые программы также играют важную роль. Япония выделяет 15-летние субсидии производителям и импортёрам; ЕС в рамках Clean Hydrogen Partnership выделил 184,5 млн евро на 19 проектов в 2025 г. Программа Green Innovation Fund в Японии выделила 70,83 млрд йен (450 млн евро) на развитие электролизных технологий. В США Hydrogen Hubs получил 8 млрд долларов США для инфраструктуры транспортировки, хранения и внедрения CCUS, а инициатива

Hydrogen Energy Earthshot направлена на снижение стоимости до 1 долл.США/кг к 2030 г. Стандарты и нормативы (низкоуглеродного водорода в ЕС и Великобритании) устанавливают минимальный порог сокращения выбросов (более 70% для топлив из ВИЭ), формируя основу единого рынка и гарантируя спрос.

Страны ЕАЭС обладают значительными ресурсными преимуществами: крупные запасы природного газа и угля для производства голубого водорода с CCUS, высокий потенциал ВИЭ и существующая газовая инфраструктура, пригодная для транспортировки водорода. Россия является ключевым игроком региона, на долю которой приходится 86,3% (107 из 124) водородных проектов ЕАЭС. Вместе с тем ЕАЭС сталкивается с системными барьерами: высокая стоимость низкоуглеродного водорода в России (LCOH варьируется от 1,2 до 11,7 долл.США/кг; средняя стоимость зелёного водорода в регионе 3,2–4,1 долл.США/кг), отсутствие единой нормативно-правовой базы, гармонизированных стандартов сертификации, финансовые ограничения и геополитическая напряжённость.

Анализ технологического, институционального и инфраструктурного ландшафта ЕАЭС показывает наибольший адаптационный потенциал инструмента "зелёного финансирования" через включение водородных проектов в таксономию "зелёных проектов" ЕАЭС. Евразийская экономическая комиссия разработала Модельную таксономию в сотрудничестве с ВЭБ.РФ и Центром зелёных финансов Казахстана, которую применяет Евразийский банк развития (ЕАБР) при классификации "зелёных" проектов. Внедрение таксономии унифицирует подходы к финансированию и гармонизирует климатическую повестку на пространстве ЕАЭС, что критично для создания единого регионального рынка водорода и интеграции в глобальные цепочки поставок.

Включение водородных инициатив в таксономию позволяет привлекать ESG-инвестиции — наиболее эффективный способ привлечения частного капитала в условиях ограниченного государственного финансирования и геополитических ограничений. Портфель "зелёного" финансирования ЕАБР составил 1,65 млрд долларов к первому полугодью 2024 г., подтверждая институциональный и финансовый спрос на такие инструменты. Таким образом, использование инструмента «зеленого финансирования» через таксономию ЕАЭС обеспечивает необходимое нормативно-правовое поле и финансовую основу для преодоления системных блокировок, стимулируя производство низкоуглеродного водорода в соответствии с мировыми стандартами и спецификой региона.

8. Предложена система интегральных показателей для оценки комплексной эффективности водородных проектов.

Для формирования эффективной системы управления структурными изменениями в промышленности, связанными с развитием водородной энергетики, была разработана интегрированная система показателей. Система объединяет количественные и качественные критерии, структурированные в шесть ключевых категорий, охватывающих весь жизненный цикл проекта: экономическая целесообразность, экологическая устойчивость, технологическая зрелость, стратегическая согласованность, инновационный потенциал, социально-управленческие аспекты (Табл. 5). Ключевым аспектом новизны является способность системы учесть положительные экстерналии (прежде всего, экологические и социальные) наряду с традиционной коммерческой эффективностью.

Модель (п.4) использует гибридный подход (NDEA-LCA-VSD) для проведения сравнительной оценки эколого-экономической эффективности технологических цепочек. На этом этапе определяются базовые измерители, которые рассматриваются как "входы" (экономические затраты, CAPEX, OPEX) и "нежелательные выходы" (экологические воздействия, такие как углеродный след, экотоксичность и водный след и пр). Предлагаемые показатели интегрального индекса включают эти фундаментальные метрики, такие как удельная себестоимость производства (LCOH) и углеродный след жизненного цикла, и расширяют их до шести комплексных категорий (экономические, экологические, технологические, стратегические, социально-управленческие и инновационные). Таким образом, если NDEA-LCA-VSD выявляет технологическую неэффективность цепочки, то показатели предоставляет управленческий инструментарий для оценки общей устойчивости проекта. Интегральный индекс основан на методах многокритериального анализа (MCA) и нормализации показателей. Веса категорий отражают их относительную важность для устойчивого развития проекта.

$$I = \sum_{k=1}^6 \left(w_k \cdot \sum_{j=1}^m \frac{P_{kj} - P_{min,kj}}{P_{max,kj} - P_{min,kj}} \right) \quad (6)$$

w_k – вес категории (k) (например, экономические – 0,25, экологические – 0,2, технологические – 0,2 и т.д.). P_{kj} – значение показателя (j) в категории (k).

$P_{min,kj}$ и $P_{max,kj}$ – минимальное и максимальное нормативные значения показателя.

Таблица 5. Показатели оценки эффективности водородных проектов в Российской Федерации.

| Категория | Название показателя | Формула для расчета | Пояснение |
|-----------------------------|--|---|--|
| 1. Экономические показатели | 1.1. Чистая приведённая стоимость (NPV) | $NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0$ <p> CF_t — денежный поток в период t- период r — ставка дисконтирования (7% для госпроектов, 12% для коммерческих); I_0 — начальные инвестиции. </p> | <p>Отражает способность проекта генерировать прибыль с учётом стоимости денег во времени. Для водородных проектов с длительным сроком окупаемости (8-15 лет) NPV >0 считается минимальным требованием.</p> <p>Ключевой параметр для привлечения инвесторов. Проекты с NPV <0 исключаются из госпрограмм поддержки.</p> |
| | 1.2. Энергетическая рентабельность (EROEI) | $EROEI = \frac{E_{output}}{E_{input}} = \frac{LHV_{H_2} \cdot Q_{H_2}}{E_{feedstock} + E_{process} + E_{transport}}$ <p> $LHV_{H_2} = 33,3$ кВт·ч/кг — низшая теплота сгорания; $E_{feedstock}$ — энергия сырья (газ, вода); $E_{process}$ — энергия технологического процесса. $E_{process}$ — энергия логистики </p> | <p>Характеризует энергоэффективность производства. Значение EROEI <1 означает, что проект потребляет больше энергии, чем производит.</p> <p>Критичен для “зелёного” водорода. При EROEI <3 требуются компенсационные меры (углеродные кредиты), EROEI ≥ 5: минимальный порог для промышленного внедрения.</p> |
| | 1.3. Удельная себестоимость производства | $C_{H_2} = \frac{C_{CAPEX} \cdot CRF + C_{OPEX}}{Q_{annual}}$ $CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$ — коэффициент восстановления капитала; Q_{annual} — годовой объём производства. C_{CAPEX} — капитальные затраты; C_{OPEX} — операционные расходы | <p>Позволяет сравнивать разные технологии. Для РФ целевой уровень:</p> <ul style="list-style-type: none"> Голубой водород: 1,8-2,5 долл.США/кг; Зелёный водород: 3,2-4,1 долл.США/кг. <p>Определяет конкурентоспособность на экспортных рынках. Превышение порога 4,5 долл.США/кг делает проект нерентабельным.</p> |
| 2. Экологические показатели | 2.1. Углеродный след жизненного цикла | $CO_2e = \sum_{i=1}^k (E_i \cdot EF_i) + \sum_{j=1}^m D_j$ <p> E_i — энергозатраты этапа EF_i — эмиссионный фактор энергоносителя; D_j — прямые выбросы. </p> | <p>Учитывает выбросы от добычи сырья до транспортировки. Примеры значений:</p> <ul style="list-style-type: none"> Голубой водород с УХУ: 2,5-3 кг CO₂e/кг H₂; Зелёный водород на ВИЭ: 0,5-1 кг CO₂e/кг H₂. <p>Определяет доступ к рынкам ЕС через механизм СВМ. При CO₂e >4 кг вводится пошлина 80 евро/т.</p> |
| | 2.2. Водный след | $W_{H_2} = \frac{W_{direct} + W_{indirect}}{\eta_{purification}}$ <p> $\eta_{purification}$ — КПД системы очистки воды (85-92% для мембранных технологий). </p> | <p>Для производства 1 кг водорода требуется:</p> <ul style="list-style-type: none"> Паровая конверсия метана: 8-10 л; РЕМ-электролиз: 12-15 л. <p>Критичен для регионов с дефицитом воды (Крым, Арктика). Превышение нормы 20 л/кг ведёт к штрафам.</p> |
| 3. Технологические | 3.1. Энергоэффективность электролиза | $\eta = \frac{LHV_{H_2}}{E_{input}} \times 100\%$ | <p>КПД преобразования электроэнергии:</p> <ul style="list-style-type: none"> Паровая конверсия метана: 70-75% |

| | | | |
|--|---|---|--|
| показатели | | Einput — суммарные энергозатраты | РЕМ-электролиз: 60-68%; • Щелочной электролиз: 50-60%. Увеличение КПД на 1% снижает себестоимость на 0,15 долл.США/кг для установки 100 МВт. |
| | 3.2. Стабильность работы оборудования | $MTBF = \frac{T_{operational}}{N_{failures}}$ $T_{operational}$ — время работы (часы); $N_{failures}$ — количество отказов. | Для компрессоров водорода MTBF должно превышать 8,000 часов. При MTBF <5,000 ч затраты на ремонт составляют >15% ОРЕХ. Влияет на страховые взносы. Проекты с MTBF <4,000 ч не получают финансирование ЕБРР. |
| 4. Стратегические показатели | 4.1. Индекс локализации | $L = \frac{C_{local}}{C_{total}} \times 100\%$ C_{local} — стоимость локальных компонентов C_{Total} — общая стоимость компонентов | • Специальный инвестиционный контракт (СПИК): минимальный порог — 40%; • Цель 2030: 60% для электролизёров. Обоснование: снижает зависимость от импорта катализаторов (85% которых поставляются из ЕС). |
| | 4.2. Экспортный потенциал | $K = \frac{C_{world} - C_{project}}{C_{world}} \times \frac{Q_{reserve}}{Q_{world}}$ C_{world} — мировая себестоимость, $Q_{reserve}$ — резервы сырья | При $K > 0.7$ проект признаётся стратегически значимым; Для Сахалинского кластера: $K = 0,65$ (2024 г.). Определяет доступ к кредитам ВЭБ.РФ под 3% годовых. |
| 5. Социально-управленческие показатели | 5.1. Индекс производственной безопасности | $TRIR = \frac{N_{incident} \times 200,000}{H_{worked}}$ $N_{incident}$ — количество инцидентов; H_{worked} — отработанные часы | • Допустимое значение: ≤ 2.0 ; • При $TRIR > 3,0$ приостанавливается сертификация ISO 45001. Обоснование: снижает страховые премии на 25% при $TRIR < 1.5$. |
| | 5.2. Кадровая обеспеченность | $S = \frac{N_{certified}}{N_{total}} \times 100\%$ | Требование для экспортных проектов: $\geq 75\%$; Текущий уровень в РФ: 34% (2024 г.). Сокращает аварийность на 40% (данные Ростехнадзора). |
| 6. Инновационные показатели | 6.1. Уровень технологической готовности (TRL) | $TRL = \frac{\sum_{i=1}^n TRL_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$ w_i — веса подсистем (электролизёр — 0,4, компрессор — 0,3, система контроля — 0,3). | • $TRL \geq 7$ — промышленное внедрение; • $TRL < 4$ — запрет на участие в конкурсах Минпромторга. |
| | 6.2. Индекс патентной активности | $I_{pat} = \frac{N_{patents} \cdot C_{claims}}{t}$ C_{claims} — количество отказов. | • Целевой показатель для НИОКР: ≥ 2 патента/год; |

Источник: авторская разработка.

Многокритериальный подход обоснован научными исследованиями по оценке инновационных проектов и проектов устойчивого развития, где такие методы доказали эффективность. Применение многокритериальной оценки позволяет комплексно учесть экономическую целесообразность, технологическую зрелость и экологическую устойчивость водородных проектов, обеспечивая баланс между экономическими выгодами и минимизацией воздействия на окружающую среду. Система показателей обеспечивает адресность стимулирования, позволяя целенаправленно устранять узкие места в проектах. Выявленные отклонения по ключевым показателям (низкий NPV, высокий углеродный след, низкий TRL) определяют применяемый пакет организационно-экономических инструментов поддержки (см. п.9 ниже).

Интегральная система показателей и методология расчётов реализованы в виде веб-приложения, обеспечивающего комплексный анализ и поддержку принятия решений. Для государственных структур приложение предоставляет инструментарий для транспарентного распределения субсидий на основе интегрального индекса, позволяет мониторить выполнение программ в реальном времени и оптимизировать межрегиональное планирование водородных кластеров (Северо-Западный, Восточный, Арктический регионы). Для корпоративного сектора - используется для инвестиционного скрининга, стратегического моделирования сценариев и бенчмаркинга, позволяя количественно оценить риски и прогнозировать снижение себестоимости водорода за счёт эффекта обучения. Для научных организаций - применяется для оценки уровня технологической готовности разработок, идентификации узких мест и метрической поддержки грантовых заявок.

Ключевые конкурентные преимущества решения включают адаптивность весовых коэффициентов под специфические задачи (экспортные, локальные, научные проекты) и интуитивный интерфейс, не требующий специальных технических компетенций. Перспективы развития предусматривают внедрение блокчейн-технологий для распределённого реестра проектов и предиктивных модулей на базе машинного обучения, трансформируя приложение в инфраструктурный элемент стратегического развития водородной энергетики.

Таким образом, предложенная система интегральных показателей и разработанный программный продукт обеспечивают научно обоснованную, многокритериальную оценку водородных проектов, что является критически важным для адресного стимулирования и эффективного управления структурными изменениями в промышленности.

9. Разработана таксономия инструментов стимулирования

производства низкоуглеродного водорода в странах ЕАЭС и предложен алгоритм выбора наиболее эффективных инструментов в зависимости от удаленности технологической цепочки от границы эффективности в пространстве эколого-экономических координат.

Разработанная таксономия организационно-экономических инструментов — научно-методологический конструкт, критически важный для преодоления системных барьеров в водородной энергетике и обеспечения конкурентоспособности производителей промышленной продукции в странах ЕАЭС. Её внедрение необходимо для адресного стимулирования в условиях глобального энергетического перехода, характеризующегося множеством макроэкономических рисков, включая зависимость от прошлого пути развития (path-dependence) и риск фрагментации рынка.

Научная новизна таксономии заключается в ее интегративном характере, который увязывает стратегические цели с конкретными инструментами политики, базируясь на результатах многокритериальной оценки. Фундаментальный принцип таксономии — это принцип адресного воздействия, при котором выбор, тип и интенсивность применения стимулирующих инструментов определяются положением проекта (технологической цепочки) относительно «границы эффективности». Граница эффективности определяется линейным отношением выходов к входам, согласно теории сетевого оболочечного анализа данных (NDEA). Удаленность проекта от этой границы трактуется как интегральный разрыв по нормированным показателям, требующий применения адресных инструментов воздействия для «сдвига» проекта к границе. В то же время таксономия интегрирует результаты NDEA–LCA–VSD-подхода:

- Она учитывает вклад каждой стадии цепочки (производство энергии, производство водорода, хранение, транспортировка) в общую эколого-экономическую эффективность, идентифицированный NDEA-анализом.
- Инструменты выбираются с учетом приоритизации экологических воздействий (например, токсичности для человека, водный след), релевантных для регионов ЕАЭС, что было разработано в рамках VSD-подхода.

Таким образом, таксономия представляет собой не просто список мер, а управленческий цикл с обратной связью, который обеспечивает воспроизводимость и транспарентность решений о поддержке. Разработанная таксономия полностью структурирована по шести ключевым блокам показателей (KPI) интегрального индекса эффективности (Табл.5), что обеспечивает формализацию критериев и их привязку к управленческим решениям и представлена в Табл.6.

Таблица 6. Структура таксономии организационно-экономических инструментов.

| Категория КРІ | Ключевые показатели | Цель инструмента | Инструменты стимулирования | Обоснование взаимосвязи с таксономией |
|-----------------------------|---|---|--|---|
| 1. Экономические | Чистая приведенная стоимость (NPV), Удельная себестоимость (LCON), Энергетическая рентабельность (EROEI). | Снижение стоимости капитала и стабилизация доходов, повышение EROEI. | Налоговые пакеты (кредиты, ускоренная амортизация, субсидии CAPEX/OPEX), контракты на разницу (CfD), зеленое финансирование, экспортное страхование. | <p>Определяет финансовую жизнеспособность и доступ к госпрограммам. Механизмы (CfD, субсидии) направлены на повышение NPV.</p> <p>Оценка ресурсоэффективности. При EROEI < 3 требуются компенсационные меры (углеродные кредиты).</p> <p>Ключевой параметр конкурентоспособности. Используется в Фазе 2 Алгоритма для определения экономического разрыва и выбора CAPEX/OPEX-субсидий.</p> |
| 2. Экологические | Углеродный след жизненного цикла (CO _{2e} /кг H ₂), Водный след. | Обеспечение соответствия международным "зеленым" стандартам, минимизация LCA-воздействий. | Обязательная LCA/LCSA-сертификация проектов, установление "зеленых" стандартов электроэнергии, компенсационные углеродные кредиты. | <p>Определяет соответствие таксономии (например, ЕС и ЕАЭС). Экологический разрыв требует обязательной LCA-сертификации (Пакет А).</p> <p>Приоритизация в VSD-подходе. Важно для регионов с водными ограничениями (например, некоторые регионы Казахстана).</p> |
| 3. Технологические | Энергоэффективность, Стабильность работы (надежность) оборудования (MTBF). | Ускорение достижения TRL≥7, снижение операционных рисков и простоев. | Гранты на НИОКР, страхование технологических рисков, пилотные проекты, требования к КПД и надежности. | <p>Технологический разрыв определяет необходимость грантов НИОКР и требований к КПД. Влияет на LCON.</p> <p>Снижает OPEX и влияет на страховые взносы.</p> |
| 4. Стратегические | Индекс локализации, Экспортный потенциал кластеров. | Снижение импортной зависимости, формирование устойчивых экспортных ниш (ATP, ЕС). | Локализационные требования (СПИК), создание экспортных хабов (аммиак, LOHC, LH ₂), зональная тарифная политика. | <p>Снижает импортную зависимость (СПИК). Стратегический разрыв требует введения локализационных требований (Пакет D).</p> <p>Определяет доступ к льготным кредитам. Привязка к кластерной политике (Пакет D: Восточный, Арктический кластеры).</p> |
| 5. Социально-управленческие | Индекс производственной безопасности (TRIR), Кадровая обеспеченность. | Повышение социальной легитимности, снижение операционных рисков, устранение дефицита компетенций. | Отраслевые стандарты безопасности, привязка страховых тарифов к TRIR, образовательные консорциумы, ваучеры на переобучение. | <p>Снижает страховые премии.</p> <p>Нивелирует дефицит компетенций. Сокращает аварийность.</p> |
| 6. Инновационные | Уровень технологической готовности (TRL), Индекс патентной активности. | Ускорение инновационного цикла, снижение технологической неопределенности. | Грантовые линии для НИОКР-кооперации, патентные ваучеры, «регуляторные песочницы» (сэндбоксы), ускоренная стандартизация. | <p>Технологический и инновационный разрыв определяет приоритет НИОКР и трансфера технологий.</p> <p>Стимулирует инновационный цикл (Патентные ваучеры, гранты).</p> |

Источник: составлено автором

Для практической реализации таксономии разработан алгоритм выбора организационно-экономических инструментов стимулирования водорода в РФ (Рис.6 и Табл.7), который функционирует как итерационный управленческий цикл с четкими фазами принятия решений, предназначенный для регуляторов и институтов развития ЕАЭС.

Автором предлагается сгруппировать инструменты по четырем стратегическим пакетам, нацеленным на формирование устойчивого рынка:

1. Пакет А: Развитие углеродного рынка. Включает инструменты, направленные на внутреннее и внешнее ценообразование на углерод. Это подразумевает введение ETS (Системы торговли выбросами) или налога на углерод, углеродные кредиты, а также гармонизацию стандартов для обеспечения совместимости с европейскими и азиатскими трансграничными механизмами. Цель — создать экономический стимул для декарбонизации, делая «грязный» водород (серый) менее выгодным, чем «голубой» и «зеленый».
2. Пакет В: Стимулирование внутреннего спроса за счет смежных отраслей. Направлен на преодоление проблемы недостаточного внутреннего спроса (при потенциале 18,2 млн тонн/год). Инструменты включают отраслевые квоты на использование низкоуглеродного водорода (например, для производства «зеленой» стали), субсидии на водородную мобильность (автобусы, грузовики) и пилотные проекты в ЖКХ и НПЗ.
3. Пакет С: Вовлеченность потребителей. Нацелен на снятие микроуровневых барьеров потребительского выбора. Включает долгосрочные контракты «H₂-по подписке» для промышленных парков и муниципалитетов, а также тарифные скидки за предоставление гибкости сети (например, для электролизеров, интегрированных с ВИЭ).
4. Пакет D: Водородные хабы (Кластеры). Обеспечивает инфраструктурное и региональное развитие. Включает создание региональных кластеров (Северо-Западный, Восточный, Арктический) на базе ресурсных преимуществ (ГЭС/ВЭС/АЭС/газовая инфраструктура), а также совместное финансирование портов, терминалов, мощностей для аммиака и LH₂.

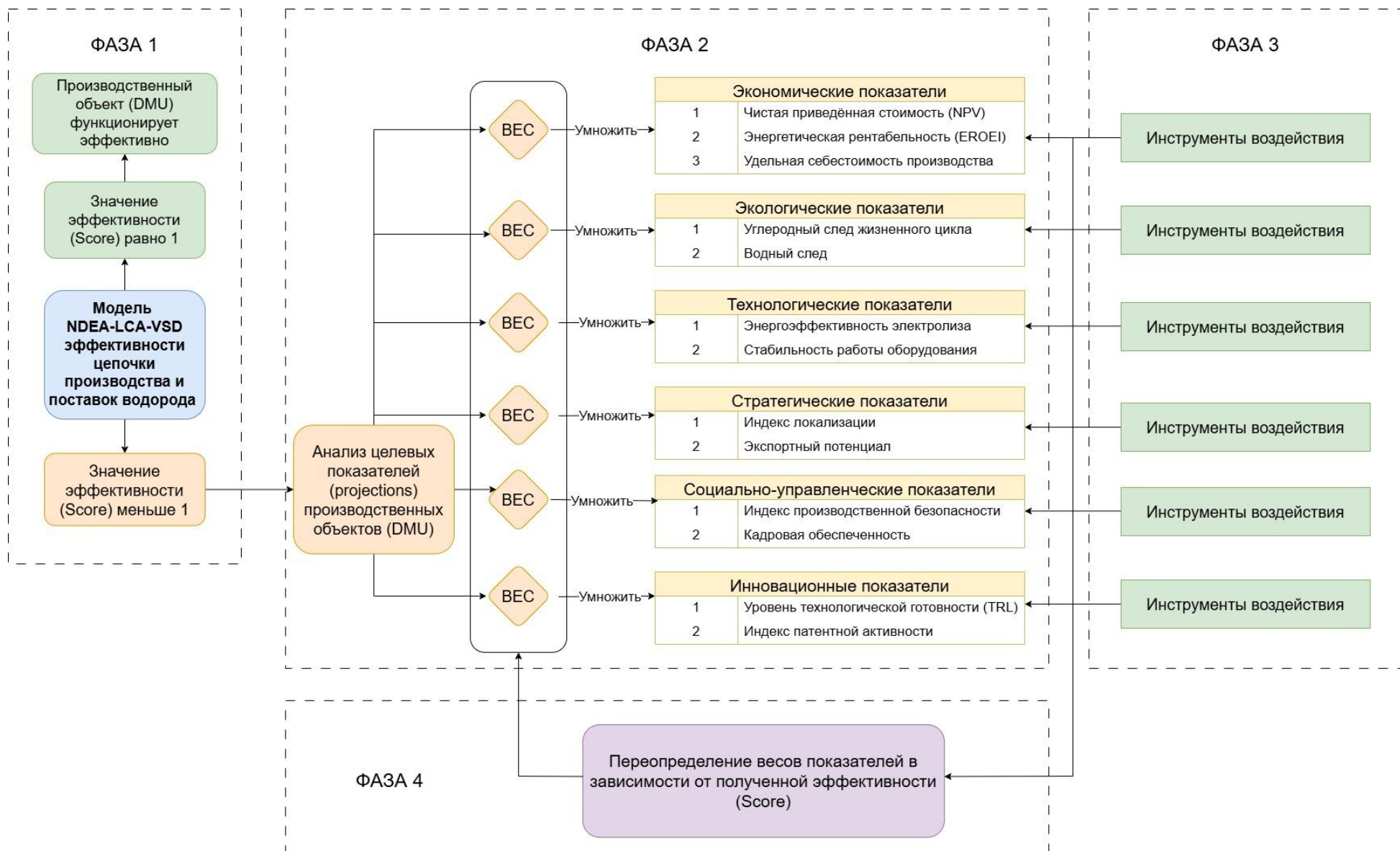


Рисунок 6. Алгоритм выбора организационно-экономических инструментов стимулирования низкоуглеродного водорода в РФ.

Источник: разработано автором.

Таблица 7. Фазы алгоритма выбора инструментов стимулирования низкоуглеродного водорода.

| | |
|--|---|
| Фаза 1: Диагностика и классификация проекта | Осуществляется оценка эффективности проекта по методологии NDEA-LCA-VSD, также осуществляется сбор, нормализация данных по шести блокам показателей и расчет интегрального индекса эффективности (I). Проекты классифицируются по степени удаленности от границы эффективности, что позволяет определить необходимую интенсивность поддержки: <ul style="list-style-type: none"> • Класс I (приграничные проекты): $I \geq 0,75$ и $\max \Delta I \leq 0,25$. • Класс II (умеренная удаленность): $0,5 \leq I < 0,75$ или $\max \Delta I \in (0,25; 0,5]$. • Класс III (значительная удаленность): $0,25 \leq I < 0,5$. • Класс IV (критическая удаленность): $I < 0,25$ |
| Фаза 2: Сопоставление вектора разрыва и приоритетного пакета. | Выявленный вектор отклонений по показателям определяет приоритетные инструменты. |
| Фаза 3: Адресное воздействие и интенсивность. | Интенсивность поддержки строго дифференцируется в зависимости от класса удаленности проекта, что обеспечивает адресность мер и минимизирует бюджетную нагрузку. |
| Фаза 4: Итерационное совершенствование. | По мере улучшения интегрального индекса и выполнения контрольных точек акцент поддержки динамически смещается. Проекты переводятся от капиталоемкой поддержки (Класс III) к рыночным стимулам (Класс I), что позволяет адаптировать политику к эволюции технологий и рыночным условиям ЕАЭС. |

Источник: составлено автором

Эффективность разработанной таксономии подтверждается прикладным инструментом CAPEX–OPEX–CCUS. Этот инструмент, ориентированный на Восточный кластер (Сахалин), предназначен для снижения удельной себестоимости «голубого» водорода путем целевого воздействия на его основное «узкое место» — высокую стоимость CCUS-модулей. Исходная приведенная себестоимость (LCOH) «голубого» водорода на Сахалине без поддержки составляла 8,85 долл.США/кг. Последовательное применение адресных инструментов, выбранных алгоритмом в ответ на экономический и экологический разрыв, показало следующий результат (Рис.7.):

1. Субсидирование CAPEX CCUS (40%): снизило LCOH до 7,65 долл.США/кг.
2. Государственные гарантии (снижение WACC с 12% до 8%): снизило LCOH до 7,47 долл.США/кг.
3. Льготный тариф на электроэнергию (20% экономии OPEX): снизило LCOH до 7,1 долл.США/кг.

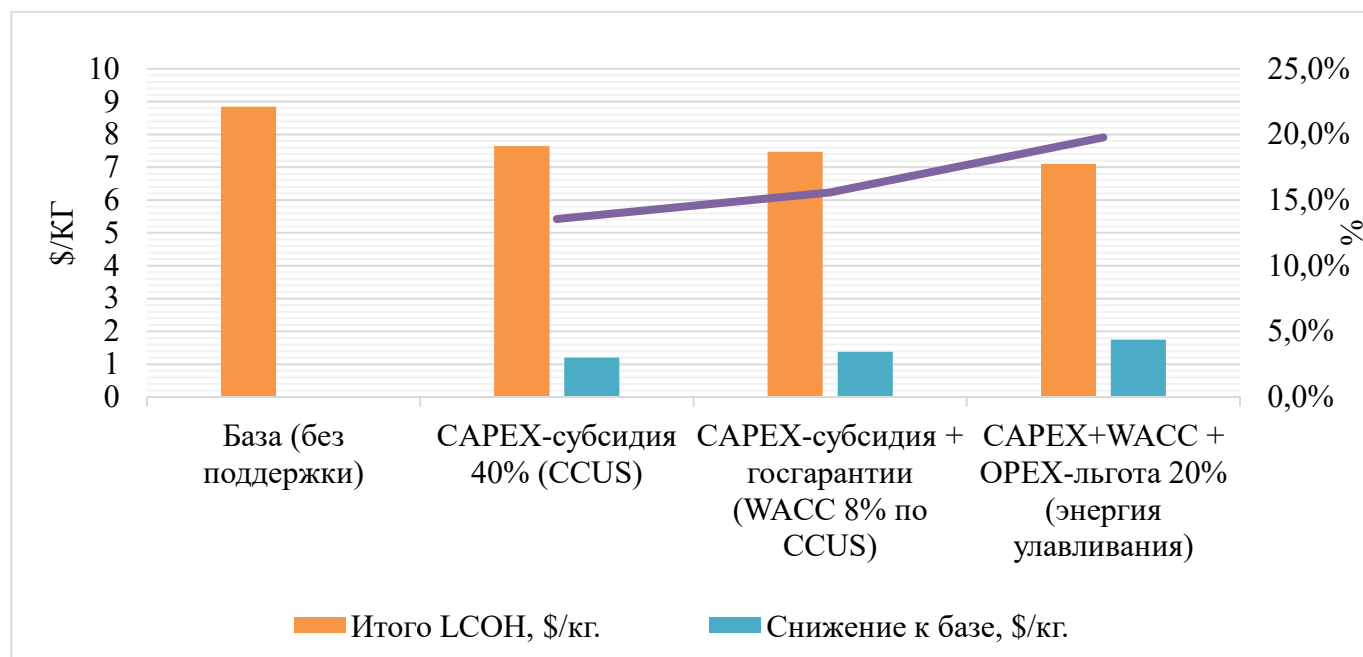


Рисунок 7. Пример реализации инструмента CAPEX–OPEX–CCUS.

Источник: рассчитано автором

Совокупный эффект инструмента составил $-1,75$ долл.США/кг, или около $-19,8\%$ от базовой себестоимости. Этот результат доказывает, что целевое воздействие на конкретное звено технологической цепочки (CCUS), выявленное в ходе диагностики, позволяет приблизить проект к границе эффективности, обеспечивая его конкурентоспособность и сокращая углеродный след жизненного цикла.

Уникальность подхода выражается в связности теории и практики: таксономия не только систематизирует инструменты стимулирования, но и встраивает их в управленческий цикл с обратной связью от метрик эффективности, позволяя адаптировать политику к различным технологическим конфигурациям и региональным условиям ЕАЭС. Благодаря этому она может служить стандартом проектирования программ поддержки низкоуглеродного водорода, сопоставимым по строгости с отраслевыми технико-экономическими требованиями и пригодным для масштабирования на наднациональном уровне.

10. Предложена концепция организационно – экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации.

Разработанная концепция организационно-экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации представляет собой систему преобразованного движения ресурсов и управленческих решений. Данный механизм не является простой совокупностью разрозненных инструментов поддержки, а функционирует как целостная, саморегулирующаяся

система, обеспечивающая скоординированное, адресное и итерационное развитие отрасли. Фундаментальной характеристикой механизма выступает его способность к автономному функционированию и самовоспроизводству после запуска, что достигается за счет встроенных контуров обратной связи и алгоритмизации процессов принятия решений (Рис.8.).

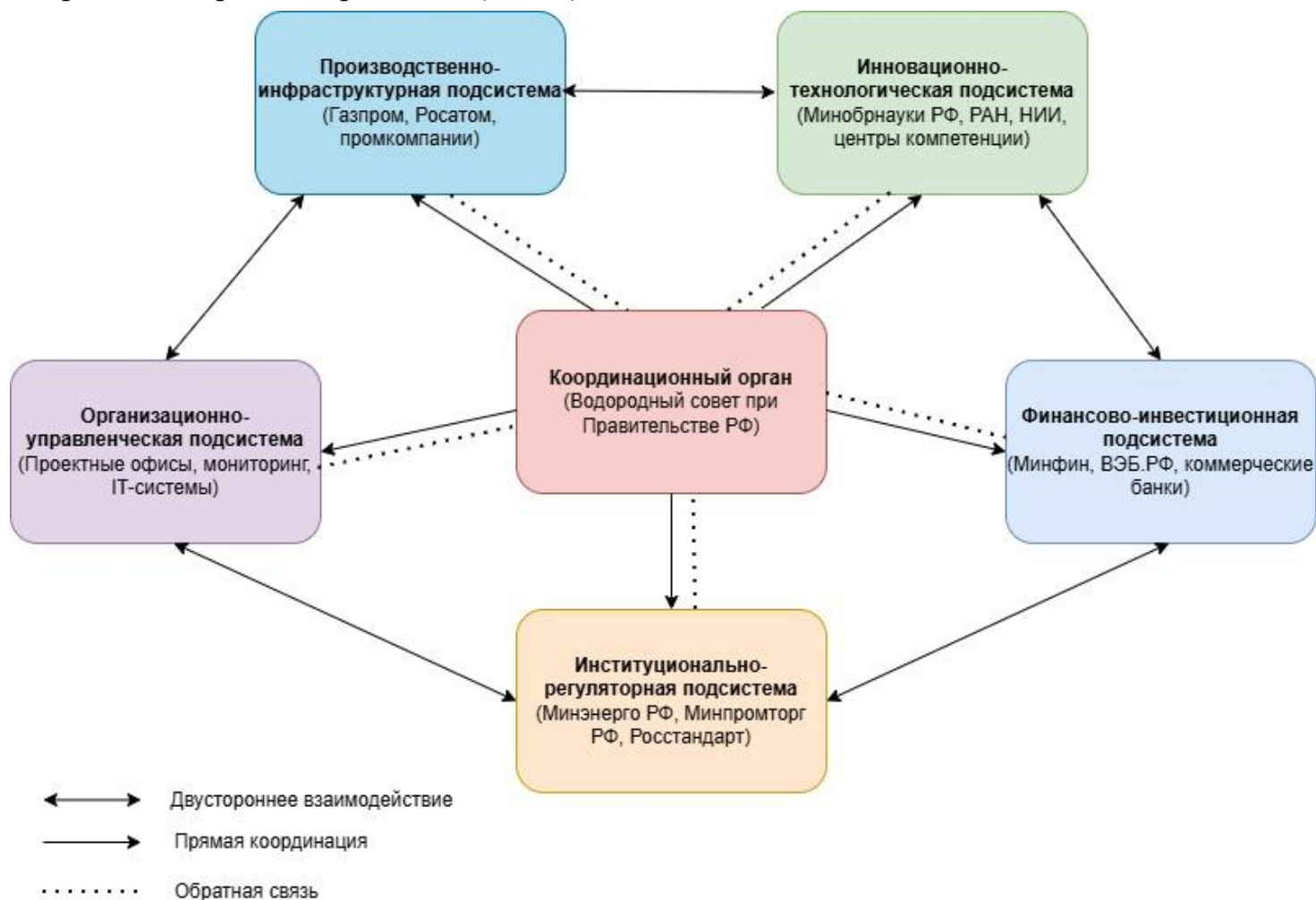


Рисунок 8. Архитектура организационно-экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации. Источник: авторская разработка.

В основе функционирования механизма лежит разработанный алгоритм выбора организационно-экономических инструментов стимулирования, базирующийся на непрерывной диагностике положения проектов относительно границы эффективности. Структурная архитектура механизма построена на синергетическом взаимодействии пяти ключевых подсистем. Институционально-регуляторная подсистема формирует нормативный ландшафт: от разработки профильного законодательства и национальных стандартов до их гармонизации с международными нормами (ISO/TC 197). Финансово-инвестиционная подсистема отвечает за мобилизацию капитала и де-рискование инвестиций через инструменты

льготного кредитования, контракты на разницу (CfD) и зеленые облигации. Инновационно-технологическая подсистема обеспечивает научно-технологический суверенитет, фокусируясь на повышении уровня готовности технологий (TRL) и кадровом обеспечении отрасли. Производственно-инфраструктурная подсистема реализует физическое создание мощностей — водородных кластеров и экспортных хабов. Организационно-управленческая подсистема осуществляет общую координацию, мониторинг KPI и управление рисками.

Ключевым отличием данной архитектуры от набора инструментов является наличие жестких структурных связей, обеспечивающих синергетический эффект. Например, государственные субсидии в НИОКР (инновационная подсистема) повышают TRL технологий, что автоматически снижает инвестиционные риски и привлекает частный капитал (финансовая подсистема), запуская цепную реакцию развития. Функционирование механизма реализуется через замкнутый управленческий цикл, состоящий из четырех фаз:

Фаза I. Диагностика (Вход в механизм): Сбор и нормализация данных по ключевым показателям (LCOH, углеродный след, TRL и др.) для определения класса проекта.

Фаза II. Адресное воздействие (Процесс трансформации): Применение дифференцированных пакетов мер (от А до D) в зависимости от вектора отклонения KPI.

Фаза III. Реализация (Продукт и инфраструктура): Непосредственное создание производственных и инфраструктурных объектов, запуск эффекта обучения (learning-by-doing).

Фаза IV. Мониторинг и корректировка (Выход и обратная связь): Итерационный пересчет индекса эффективности и калибровка инструментов поддержки.

Система обратных связей действует на трех уровнях: стратегическом (корректировка дорожных карт раз в 3–5 лет), операционном (ежегодный мониторинг проектных офисов) и рыночном (непрерывное саморегулирование через конкуренцию и спрос).

Структура организационно-экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации представлена в виде шести взаимосвязанных блоков, каждый из которых характеризуется специфическими функциями, целями, инструментами, участниками, ресурсами и показателями эффективности (Табл. 8).

Таблица 8. Детализированная структура организационно-экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в РФ.

| Блок механизма (инструмент) | Функция | Цель (KPI) | Инструменты воздействия | Участники и Ресурсы | Ожидаемые результаты |
|--------------------------------------|---|---|---|--|---|
| 1. Инвестиционный (Экономический) | Снижение WACC и OPEX. Повышение финансовой жизнеспособности (NPV). | NPV > 0 (мин. требование), Целевой LCON (3,2–4,1 долл.США/кг), EROEI 5. | Контракты на разницу (CfD), Субсидии CAPEX/OPEX (включая CAPEX–OPEX–CCUS), Налоговые кредиты, Госгарантии (снижение WACC), Зеленые облигации. | Государство (Минфин), Банки, Частный бизнес. Ресурсы: Фонд ГЧП (150 млрд руб. до 2026 г.), Субсидии (7,6 млрд долл.США). | Увеличение доли проектов с положительной NPV. Сокращение LCON до 7,1 долл.США/кг (кейс Сахалина). |
| 2. Институциональный (Экологический) | Обеспечение "зеленой" сертификации и соответствие трансграничным механизмам (CBAM). | Углеродный след 3 кг CO ₂ e/кг H ₂ . Водный след 20 л/кг H ₂ . | Обязательная LCA/LCSA-сертификация, Компенсационные углеродные кредиты, Введение «зеленых» стандартов электроэнергии (доля ВИЭ), Квоты на водопотребление. | Государство (Регулятор), Экспертные центры, Международные партнеры (CertifHy). | Доступ к рынкам ЕС. Снижение углеродоемкости ВВП на 45% к 2035 г.. |
| 3. Технологический | Ускорение промышленного внедрения и повышение надежности. | TRL 7 (промышленное внедрение). MTBF компрессоров 8000 часов. КПД электролиза (РЕМ) до 78%. | Гранты на НИОКР (до 70% субсидии), Требования к КПД и надежности, Страхование технологических рисков. | НИОКР-центры (ИК СО РАН), Бизнес. | Снижение OPEX за счет сокращения простоев. Максимально высокие темпы обучения (10,1%). |
| 4. Стратегический | Снижение импортной зависимости, формирование экспортных хабов. | Индекс локализации 40% (СПИК). Экспортный потенциал (K) > 0,7. | Локализационные требования (СПИК), Создание экспортных хабов (Восточный, Арктический), Зональная тарифная политика, Совместное финансирование портов (Владивосток, Мурманск). | Государство (Минпромторг), Региональные власти, Транспортные компании. | Формирование устойчивых экспортных ниш (АТР). Снижение логистических издержек (Восточный кластер: 12–15% от FOB). |
| 5. Социально-управленческий | Повышение безопасности и устранение дефицита компетенций. | TRIR 2.0. Кадровая обеспеченность 75%. | Привязка страховых тарифов к TRIR, Образовательные консорциумы, Целевая подготовка 15000 специалистов к 2026 году. | Бизнес, Образовательные учреждения, Страховые компании. | Сокращение аварийности на 40%. Снижение страховых премий на 25% при TRIR < 1,5. |
| 6. Инновационный | Сокращение технологической неопределенности, стимулирование патентной активности. | Индекс патентной активности 2 патента/год. | Грантовые линии для НИОКР-кооперации, Патентные ваучеры, «Регуляторные песочницы» (сэндбоксы) для отработки новых технологий хранения. | НИОКР, Индустрия. | Ускорение инновационного цикла. |

Источник: составлено автором

Функционирование механизма является итерационным и саморегулирующимся, что подтверждает его статус «системы преобразованного движения». Такая динамическая архитектура, опирающаяся на объективную многокритериальную оценку, обеспечивает высокую транспарентность и минимизирует риски нецелевого использования субсидий, позволяя механизму функционировать эффективно и автономно после его запуска и первоначальной калибровки. Предполагается, что механизм переходит в режим самоподдержания при достижении установленных условий. Такими условиями могут быть например: критическая масса производства (более 500 тыс. тонн водорода/год), обеспечивающая эффект масштаба; LСОН менее 2,5 долл.США/кг; локализация производства более 60%; устойчивый спрос (контракты на поставку более 300 тыс. тонн водорода в год); уровень частных инвестиций более 70% от общего финансирования новых проектов и ряд других.

При достижении этих условий государственная поддержка может быть переориентирована с прямых субсидий на рамочное регулирование (стандарты, углеродное ценообразование, поддержка экспорта), а механизм продолжит функционировать за счёт внутренних рыночных стимулов. Таким образом, предложенный организационно-экономический механизм является адаптивной системой, способной трансформировать стратегические приоритеты государства в реальные технологические и экономические результаты.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании решена научная задача разработки и обоснования концепции организационно-экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации с учетом глобальных и национальных императивов энергетического перехода и выявленных макроэкономических рисков и системных блокировок (lock-in, path-dependence). Получены новые научные результаты, включающие идентификацию специфических блокировок развития водородной энергетики и обоснование роли водорода как системного элемента декарбонизации, а также оценку конкурентоспособности и потенциальных экспортных ниш российских проектов. Разработан и апробирован комплексный методический аппарат оценки эколого-экономической эффективности технологических цепочек производства, хранения и транспортировки водорода на основе гибридного подхода LCA–NDEA–VSD, а также методика прогнозирования динамики снижения стоимости «зеленого» водорода на базе покомпонентных кривых обучения и сценарная модель оценки потенциала внутреннего спроса. Предложены система интегральных показателей комплексной эффективности

водородных проектов и программный продукт для их прикладной оценки, что обеспечивает сопоставимость проектов по экономическим, экологическим, технологическим, стратегическим и социально-управленческим критериям и позволяет учитывать положительные экстерналии при принятии решений о поддержке и инвестировании. Сформирована таксономия организационно-экономических инструментов стимулирования развития водородной энергетики и алгоритм выбора оптимальных мер (в том числе с учетом адаптации зарубежных практик к условиям ЕАЭС), а также предложена концепция организационно-экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации. Практическая значимость результатов определяется возможностью их использования органами государственной власти и корпоративным сектором при проектировании устойчивых цепочек поставок водорода, приоритизации инвестиций, разработке стандартов и настройке дифференцированных мер господдержки, что в совокупности способствует ускорению низкоуглеродного развития и повышению конкурентоспособности промышленности Российской Федерации.

V. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в рецензируемых журналах МБЦ Scopus и Web of Science:

1. Gomonov K., Matyushok V., Balashova S., Berezin A. Introduction of smart grid in Russia: feasibility study // The 11th International Days of Statistics and Economics (Prague) : conference proceedings. — 2017. — P. 428–438.
2. Gomonov K., Balashova S., Matyushok V. The relationship of socio-economic development and the drivers of green economy // The 13th International Days of Statistics and Economics (Prague, September 5–7, 2019): conference proceedings. — 2019.
3. Matyushok V., Balashova S., Gomonov K. Electricity consumption for the Russian economy: Does smart grid matter? // International Journal of Economic Policy in Emerging Economies. — 2019. — Vol. 12, № 4. — P. 407–424.
4. Ratner S., Gomonov K., Revinova S., Lazanyuk I. Energy Saving Potential of Industrial Solar Collectors in Southern Regions of Russia: The Case of Krasnodar Region // Energies. — 2020. — Vol. 13.
5. Balashova S., Ratner S., Gomonov K., Berezin A. Modeling Consumer and Industry Reaction to Renewable Support Schemes: Empirical Evidence from the USA and Applications for Russia // International Journal of Energy Economics and Policy. — 2020. — Vol. 10, № 3. — P. 158–167.
6. Revinova S., Ratner S., Lazanyuk I., Gomonov K. Sharing Economy in Russia: Current Status, Barriers, Prospects and Role of Universities // Sustainability. — 2020. — Vol. 12. — Art. 4855.
7. Ratner S., Gomonov K., Revinova S., Lazanyuk I. Eco-design of Energy Production Systems: The Problem of Renewable Energy Capacity Recycling // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10.

8. Ratner S., Lazanyuk I., Revinova S., Gomonov K. Barriers of Consumer Behavior for the Development of the Circular Economy: Empirical Evidence from Russia // *Applied Sciences*. — 2021. — Vol. 11, № 1.
9. Gomonov K., Ratner S., Lazanyuk I., Revinova S. Clustering of EU Countries by the Level of Circular Economy: An Object-Oriented Approach // *Sustainability*. — 2021. — Vol. 13.
10. Ratner S., Gomonov K., Revinova S., Lazanyuk I. Ecolabeling as a Policy Instrument for More Sustainable Development: The Evidence of Supply and Demand Interactions from Russia // *Sustainability*. — 2021. — Vol. 13.
11. Ratner S., Gomonov K., Lazanyuk I., Revinova S. Barriers and Drivers for Circular Economy 2.0 on the Firm Level: Russian Case // *Sustainability*. — 2021. — Vol. 13.
12. Ratner S., Berezin A., Gomonov K., Serletis A., Sergi B. S. What is stopping energy efficiency in Russia? exploring the confluence of knowledge, negligence, and other social barriers in the Krasnodar region // *Energy Research & Social Science*. — 2022. — Vol. 85.
13. Revinova S., Gomonov K. A Comparative Analysis of Government Policies to Promote Energy Efficiency in the US, China, and India // *International Journal of Energy Economics and Policy*. — 2023. — Vol. 13, № 1. — P. 291–306.
14. Lazanyuk I., Ratner S., Revinova S., Gomonov K., Modi S. Diffusion of Renewable Microgeneration on the Side of End-User: Multiple Case Study // *Energies*. — 2023. — Vol. 16.
15. Gomonov K., Reshetnikova M., Ratner S. Economic Analysis of Recently Announced Green Hydrogen Projects in Russia: A Multiple Case Study // *Energies*. — 2023. — Vol. 16.
16. Sorokin L., Balashova S., Gomonov K., Belyaeva K. Exploring the Relationship between Crude Oil Prices and Renewable Energy Production: Evidence from the USA // *Energies*. — 2023.
17. Revinova S., Lazanyuk I., Ratner S., Gomonov K. Forecasting Development of Green Hydrogen Production Technologies Using Component-Based Learning Curves // *Energies*. — 2023. — Vol. 16.
18. Ratner S., Gomonov K., Revinova S. Public Funding for Energy Innovation and Decarbonization Goals: A Coherence Challenge // *International Journal of Energy Economics and Policy*. — 2023. — Vol. 13, № 4. — P. 40–45.
19. Ratner S., Sergi B. S., Gomonov K. Eco-efficiency of hydrogen supply chains: NDEA-based approach // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2024. — Vol. 73. — P. 598–608.
20. Gomonov K., Permana C. T., Handoko C. T. The growing demand for hydrogen: current trends, sectoral analysis, and future projections // *Unconventional Resources*. 2025.
21. Permana C. T., Handoko C. T., Gomonov K. Hydrogen's Potential and policy pathways for Indonesia's energy Transition: The Actor-Network Analysis // *Unconventional Resources* 2025.
22. Balashova S., Gomonov K. Index Approach to Assessing the Energy Efficiency at a Regional Level // *Modern Management Trends and the Digital Economy: from Regional Development to Global Economic Growth (MTDE 2020): proceedings*. — 2020.

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных Высшей

аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации и входящие в Перечень РУДН:

23. Матюшок В. М., Балашова С. А., Гомонов К. Г. Экономическое обоснование создания интеллектуальных энергосетей в России // Экономика и предпринимательство. — 2016. — № 2 (ч. 1).

24. Гомонов К. Г. Интеллектуальные энергосистемы как перспективное развитие электроэнергетики // Экономика и предпринимательство. — 2016. — № 2 (ч. 2). — С. 474–478.

25. Матюшок В. М., Серджио Б., Балашова С. А., Гомонов К. Г. Влияние Smart Grid и возобновляемых источников энергии на энергоэффективность: зарубежный опыт // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. — 2017. — Т. 25, № 4. — С. 583–598.

26. Гомонов К. Г., Карташов В. С. Внедрение интеллектуальных сетей Smart Grid в европейском и российском энергетическом секторе // Управленческий учет. — 2018. — № 11. — С. 20–35.

27. Матюшок В. М., Балашова С. А., Ревина С. Ю., Гомонов К. Г. Энергоэффективность и развитие умных сетей в регионах России // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. — 2019. — № 1 (57). — Ст. 5702.

28. Ратнер С. В., Гомонов К. Г. Оценка результативности мер государственной поддержки возобновляемой энергетики и энергоэффективной экономики: обзор подходов // Экономический анализ: теория и практика. — 2019. — Т. 18, № 8. — С. 1428–1447.

29. Гомонов К. Г., Сипакова П. О., Чапурная А. П. Внедрение микрогенерации и энергосберегающих технологий в рамках концепции зеленой экономики: зарубежный опыт и Россия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. — 2019. — Т. 27, № 3. — С. 442–454.

30. Гомонов К. Г. Анализ среды функционирования циркулярной экономики в странах Латинской Америки и Карибского бассейна // Вопросы инновационной экономики. — 2021. — Т. 11, № 4. — С. 2019–2040.

31. Гомонов К. Г. Анализ наднациональных и национальных механизмов формирования экономики замкнутого цикла в странах ЕС // Russian Economic Bulletin. — 2022. — Т. 5, № 6. — С. 140–147.

32. Решетникова М. С., Гомонов К. Г. Анализ политики ведущих стран в сфере развития водородной энергетики // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. — 2024.

33. Матюшок В. М., Балашова С. А., Гомонов К. Г. Роль интеллектуальных энергосетей в повышении экономической эффективности российской электроэнергетической отрасли и конкурентоспособности национальной экономики // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. — 2017. — № 12 (ч. 4). — С. 457–460.

34. Гомонов К. Г. Оценка эффективности внедрения социально-экономических проектов в области циркулярной экономики в Европейском союзе на основе экономико-математического моделирования // Вопросы инновационной экономики. — 2022. — Т. 12, № 4.

35. Гомонов К. Г. Оценка уровня развития индустриального симбиоза в Европейском союзе // Креативная экономика. — 2022. — Т. 16, № 12.

Статьи, опубликованные в других изданиях

36. Balashova S., Gomonov K., Matyushok V., Revinova S. Energy efficiency and smart grids in the Russian regions // Academic Journal of Science. — 2019. — Vol. 9, № 1. — P. 267–278.

37. Gomonov K. G. The Implementation of Smart Grid in Energy System. Efficiency and Prospects // Les Cahiers du CEDIMES. — 2018. — Vol. 12, № 1. — P. 179–189.

Монографии и учебные пособия:

38. Гомонов К. Г. Организационно-экономические механизмы формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации: монография. — Москва: РУСАЙНС, 2025. — 278 с.

39. Ратнер С. В., Гомонов К. Г. Современные подходы к исследованию проблем управления: учебно-методическое пособие. — Москва: РУДН, 2019.

40. Гомонов К. Г., Ратнер С. В. Современные подходы к исследованию проблем управления: учебно-методическое пособие. — 2-е изд., испр. — Москва: РУДН, 2022. — 57 с.

Статьи, опубликованные по результатам конференций:

41. Matyushok V., Gomonov K., Berezin A., Sergi B. S. Long-term development of electric power industry using smart grids // 4th International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences & Arts SGEM 2017 (Albena, Bulgaria).

42. Berezin A., Gomonov K., Rossetti N. Energy efficiency: public private partnerships for sustainable economic development // Новые тренды, стратегии и структурные изменения в экономике стран с развивающимися рынками: сборник расширенных аннотаций докладов участников VII Международной научной конференции / под ред. В. М. Матюшка, И. В. Лазанюк. — 2018. — С. 32–34.

43. Balashova S. A., Gomonov K. G., Matyushok V. M. The influence of energy production from renewable energy sources on energy efficiency and total factor productivity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 937. — 012003.

44. Gomonov K., Matyushok V., Kotlukov K. The role of lean production and the life cycle assessment in a circular economy // The 14th International Days of Statistics and Economics (Prague, September 10–12, 2020): conference proceedings. — 2020. — P. 328–338.

45. Lazanyuk I., Ratner S., Gomonov K., Revinova S., Modi S. The impact of the circular economy on the pro-ecological behaviour of consumers in Russia // SHS Web of Conferences. — 2021. — Vol. 110. — 01029.

46. Gomonov K. Eco-innovations for a circular economy: the EU countries rankings // SHS Web of Conferences. — 2021. — Vol. 114. — 01012.

47. Gomonov K., Matyushok V. The development of green hydrogen: assessment of approaches // The 15th International Days of Statistics and Economics (Prague, September 9–11, 2021).

48. Gomonov K. Data Envelopment Analysis of the Circular Economy in the European Union // Sustainable Development of Regional Infrastructure (ISSDRI 2022) : материалы II Международной научно-практической конференции. — 2022. — С. 450–455

Гомонов Константин Геннадьевич (Российская Федерация)

Организационно-экономический механизм формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации: глобальные и национальные императивы и подходы к оценке эффективности

Диссертация посвящена исследованию организационно-экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации в контексте глобального энергетического перехода, включая диагностику системных блокировок, оценку конкурентоспособности технологических цепочек и обоснование инструментов государственной поддержки и регулирования для достижения целей декарбонизации и технологического суверенитета.

Сформирована и апробирована комплексная модель оценки эколого-экономической эффективности цепочек производства, хранения и транспортировки водорода на основе сочетания анализа жизненного цикла, сетевых DEA-моделей и ценностного подхода; разработана методика прогноза снижения стоимости «зеленого» водорода на основе многокомпонентных кривых обучения с учетом динамики капитальных и энергетических компонентов; предложены сценарные оценки внутреннего спроса, таксономия инструментов стимулирования низкоуглеродного водорода для России и стран ЕАЭС; предложена концепция организационно-экономического механизма формирования и развития водородной энергетики в Российской Федерации.

Gomonov Konstantin (Russian Federation)

Organizational and Economic Mechanism for the Formation and Development of Hydrogen Energy in the Russian Federation: Global and National Imperatives and Approaches to Efficiency Assessment

The dissertation is devoted to the study of the organizational and economic mechanism for the formation and development of hydrogen energy in the Russian Federation in the context of the global energy transition, including the diagnosis of systemic lock-ins, the assessment of the competitiveness of technological value chains, and the justification of instruments of state support and regulation aimed at achieving decarbonization and technological sovereignty goals.

A comprehensive model for assessing the environmental and economic efficiency of hydrogen production, storage, and transportation chains has been developed and tested, based on a combination of life cycle analysis, network DEA models, and a value-based approach; a methodology has been developed for forecasting reductions in the cost of green hydrogen using multi-component learning curves that account for the dynamics of capital and energy components; scenario-based assessments of domestic demand and a taxonomy of policy instruments for promoting low-carbon hydrogen in Russia and the EAEU countries have been proposed; a concept for an organizational and economic mechanism for the formation and development of hydrogen energy in the Russian Federation has been put forward.