

На правах рукописи

Цянь Хайдун



**ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА**

*Специальность 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика
(экономика промышленности)*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат экономических наук

Галевский Сергей Геннадьевич

Официальные оппоненты:

Ильин Игорь Васильевич

доктор экономических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Высшая школа бизнес-инжиниринга, директор.

Шмелева Надежда Васильевна

доктор экономических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра цифрового менеджмента и инноватики, профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **02 июля 2026 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.1 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1163**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 30 апреля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВ
Юрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В условиях нарастающих экологических проблем, обусловленных сжиганием ископаемого топлива и процессами глобального изменения климата, мировое сообщество активизировало поиск низкоуглеродных направлений развития энергетики. С момента подписания Парижского соглашения в 2016 г. цели сокращения выбросов парниковых газов и достижения углеродной нейтральности были закреплены в стратегических документах большинства стран. Одновременно с этим в современных условиях, характеризующихся повышенными требованиями к энергетической безопасности и экономической устойчивости энергетических систем, возрастает необходимость системной и критической оценки реализуемости и экономической эффективности соответствующих технологических решений, в том числе в сфере производства водорода.

Вместе с тем широкомасштабное развитие производства водорода сопровождается существенными методологическими трудностями в области экономической оценки. Данная сфера характеризуется высокой капиталоемкостью, длительным жизненным циклом и значительной неопределённостью ключевых параметров, что ограничивает применимость традиционных показателей оценки экономической эффективности (NPV, IRR, PI, DPP) в рамках отраслевого анализа. В качестве альтернативы в научных исследованиях и практических расчётах всё чаще используется показатель LCOH (Levelized Cost of Hydrogen — приведенные удельные затраты на производство водорода), основанный на принципах расчёта нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) и предназначенный для сопоставления различных технологий производства водорода.

Однако использование показателя LCOH в его традиционной форме сопряжено с рядом методологических ограниче-

ний. Применение единой ставки дисконтирования в расчёте показателя LCOH приводит к систематическим искажениям результатов оценки приведённых удельных затрат на производство водорода.

В связи с указанными обстоятельствами возникает необходимость методологического совершенствования подходов к экономической оценке проектов производства водорода, направленного на повышение согласованности расчётов и интерпретируемости получаемых результатов. Это обуславливает актуальность разработки инструментов, обеспечивающих более обоснованное сопоставление технологических решений и проведение отраслевого экономического анализа в сфере водородной энергетики.

Степень разработанности темы исследования

Экономические вопросы оценки проектов в сфере водородной энергетики широко представлены в научных исследованиях отечественных и зарубежных авторов. Основное внимание уделяется анализу затрат и экономическому сопоставлению различных технологических маршрутов производства водорода. К числу соответствующих работ относятся исследования Моисеенковой Ю. И., Шанской В. С., Веселова Ф., Заниной А. А., Glenk H., Reichelstein S., Siala K., Yin C., Jin L., Yang B., Zheng C., Bernat R., Ishaq H., Dincer I., Crawford C., Wang H., van der Spek M., Norouzi N., Li J., Zou X., Chen W. и других авторов.

В работах, посвящённых показателю LCOH, рассматриваются вопросы его применения и уточнения расчётных параметров, что отражено в исследованиях Li T., Liu P., Li Z., Vivanco-Martín B., Iranzo A., Xu D., Wang J., Navas-Anguita Z. Вместе с тем использование LCOH преимущественно ограничивается сравнением технологических вариантов, тогда как интерпретация различий результатов технологического выбора в условиях неопределённости остаётся недостаточно освещённой.

Объектом исследования являются проекты по производству водорода.

Предметом исследования являются экономическая оценка проектов производства водорода и экономическое обоснование выбора технологий.

Цель диссертационного исследования состоит в разработке методического подхода к экономической оценке создания промышленных производств водорода, обеспечивающего обоснованность выбора технологии в условиях изменчивости технологических и экономических параметров.

Основная научная идея исследования заключается в применении бинарного дисконтирования с формированием интервальной оценки показателей экономической эффективности, позволяющей учесть неопределенность технологических и экономических факторов, для обоснованного выбора технологии производства водорода.

Задачи исследования:

1. Провести комплексный анализ современного состояния и перспектив развития водородной энергетики с учётом применяемых водородных технологий и факторов, влияющих на реализацию проектов производства водорода.

2. Оценить применимость и ограничения традиционных показателей экономической оценки при анализе проектов производства водорода в условиях высокой капиталоемкости и неопределённости исходных параметров.

3. Выявить недостатки показателя LCOH (приведенные затраты на производство водорода), обусловленные использованием единой ставки дисконтирования, и определить влияние указанных факторов на результаты расчётов приведённых удельных затрат на производство водорода.

4. Адаптировать модель бинарного дисконтирования к расчёту приведённых удельных затрат на производство водорода (LCOH) и выполнить сравнительные расчёты на основе

традиционного и бинарного подходов для различных технологий производства водорода.

5. Разработать методический подход к обоснованию выбора технологических решений в проектах производства водорода в условиях изменяющихся технологических и ценовых факторов.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Идентифицирована совокупность отраслевых и проектных факторов, присущих созданию промышленных производств в сфере водородной энергетики, включая высокую капиталоемкость, неординарную структуру денежных потоков проектов и отсутствие сформированных рыночных цен, которая ограничивает применимость традиционных методов и обуславливает необходимость разработки нового методического подхода к экономической оценке таких производств.

2. Установлено, что к числу методических ограничений классического подхода к оценке приведённых удельных затрат на производство водорода (LCOH), основанного на использовании единой ставки дисконтирования, относятся некорректный учет фактора времени, а также рисков и неопределенности, что приводит к недостаточной обоснованности получаемых результатов оценки.

3. Разработана экономико-математическая модель расчёта показателя LCOH на основе бинарного дисконтирования, использование которой обеспечивает корректное определение затрат на производство водорода и устраняет методические ограничения классического подхода.

4. Разработан методический подход к экономическому обоснованию выбора оптимальной технологии производства водорода, направленный на повышение обоснованности принимаемых решений в условиях изменчивости технологических и экономических параметров.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономика промышленности) по пунктам:

2.2. «Вопросы оценки и повышения эффективности хозяйственной деятельности на предприятиях и в отраслях промышленности».

2.14. «Проблемы повышения энергетической эффективности и использования альтернативных источников энергии».

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость исследования связана с уточнением подходов к экономической оценке проектов производства водорода и с обоснованием возможности использования показателя LCOH с учётом неопределённости экономических условий в энергетических проектах. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов при технико-экономическом обосновании проектов производства водорода и при сравнении альтернативных технологий производства водорода. Более корректная экономическая оценка способствует повышению обоснованности выбора технологий на ранних этапах анализа и создаёт предпосылки для более устойчивого развития водородной отрасли.

Результаты исследования использованы в аналитической и технико-экономической деятельности при рассмотрении направлений, связанных с водородной энергетикой. Получен акт внедрения от 16.03.2026, выданный ООО «Промышленный газ АЙПиДжиЭс (Чэнду), Лтд» (IPGS (Chengdu) Industrial Gas Co., Ltd.).

Методология и методы исследования

Теоретическую основу составляют научные труды в области оценки эффективности энергетических проектов, а также публикации, посвящённые LCOE и LCOH (в частности, работы

зарубежных и отечественных авторов по водородной тематике).

Используются методы сравнительного и системного анализа: сопоставление технологий производства водорода, критический разбор формулы LCOH; математическое моделирование в части разработки бинарной модели дисконтирования; сценарный анализ и анализ чувствительности – для оценки влияния различных параметров (ставка дисконтирования, стоимость электроэнергии) на результат экономической эффективности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Промышленное развитие водородной энергетики характеризуются совокупностью факторов (высокая капиталоемкость, неординарная структура денежных потоков проектов, отсутствие сформированных рыночных цен на водород), что исключает возможность корректной экономической оценки создания таких производств на основе показателей, не учитывающих всю совокупность указанных факторов.

2. Экономическая оценка проектов по производству водорода должна осуществляться на основе показателя LCOH (приведенные удельные затраты на производство водорода) с применением бинарного дисконтирования, что обеспечивает устранение методических ограничений традиционного подхода.

3. Выбор экономически обоснованной технологии производства водорода целесообразно осуществлять на основе совместного учёта уровня удельных затрат и неопределённости при изменении технологических параметров и цен на электроэнергию.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается использованием корректных методов научного анализа, применением инвестиционного моделирования, а

также использованием достоверных исходных данных по проектам водородной энергетики, национальных официальных источников Китая и международных авторитетных отчётов.

Результаты исследования подтверждаются публикациями в рецензируемых научных изданиях, а также апробацией на российских и международных научно-практических мероприятиях.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных; за последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных: X Международная конференция «Менеджмент, экономика, этика, техника – МЕЕТ» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, 10–11 октября 2024 г.); XI Всероссийская (с международным участием) научная конференция «Менеджмент, экономика, этика, техника – МЕЕТ» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, 30–31 октября 2025 г.); IX Международная научно-практическая конференция: Современная экономика и право: опыт теоретического и эмпирического анализа (г. Петрозаводск, Международный центр научного партнерства: Новая Наука, 17 сентября 2025 г.); X Международной научно-практической конференции «инновации: от теории к практике» (г. Бресте, УО «Брестский государственный технический университет» и ЗАО «Брестский научно-технологический парк», 30–31 октября 2025 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке и реализации цели и задач диссертационного исследования, выявлении ограничений применения традиционных показателей экономической оценки в проектах производства водорода, разработке метода расчёта приведённых удельных затрат на производство водорода (LCOH) на основе бинарной модели дисконтирования, а также в разработке методического подхода

к экономическому обоснованию выбора технологических решений в проектах производства водорода.

Публикации. Результаты диссертационной работы освещены в 7 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее - Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, трёх глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 181 наименование, и 1 приложения. Диссертация изложена на 165 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков и 23 таблицы.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю — кандидату экономических наук, доценту С.Г. Галевскому, а также всему коллективу кафедры отраслевой экономики Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за помощь в подготовке диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цель, задачи и научная новизна, раскрыта теоретическая и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ современного состояния и тенденций развития водородной отрасли, рассмотрены технологические и экономические особенности проектов производства водорода, а также факторы, влияющие на их капиталоемкость и структуру затрат.

Во второй главе исследованы методические основы экономической оценки проектов производства водорода,

проанализирована взаимосвязь показателей NPV и LCOH и выявлены ограничения модели LCOH при использовании единой ставки дисконтирования.

В третьей главе разработан методический подход к расчёту модели LCOH на основе бинарного дисконтирования, выполнено моделирование для различных технологий производства водорода и предложен алгоритм выбора технологических решений на основе интервальной оценки затрат.

В заключении сформулированы основные выводы исследования и предложения по совершенствованию экономической оценки проектов производства водорода.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Промышленное развитие водородной энергетики характеризуются совокупностью факторов (высокая капиталоемкость, неординарная структура денежных потоков проектов, отсутствие сформированных рыночных цен на водород), что исключает возможность корректной экономической оценки создания таких производств на основе показателей, не учитывающих всю совокупность указанных факторов.

Водород как вторичный энергоноситель в значительной степени зависит от структуры источников энергии, что отличает его от традиционных первичных ископаемых ресурсов. В сфере водородной энергетики существует несколько технологических маршрутов производства водорода. В зависимости от уровня углеродных выбросов выделяют серый, голубой и зелёный водород. Серый и голубой водород основаны на использовании углеводородного сырья и могут быть интегрированы в существующую систему углеводородной энергетики. Зелёный водород производится на основе возобновляемых источников энергии с использованием

технологий электролиза и рассматривается как ключевое направление развития отрасли.

Проекты производства водорода характеризуются высокой капиталоемкостью, неординарной структурой денежных потоков и отсутствием сформированной системы рыночных цен. Производство зелёного водорода осуществляется преимущественно с применением технологий электролиза (ALK, PEM, SOEC и др.), требующих дорогостоящего оборудования. Доля капитальных затрат в структуре инвестиций обычно превышает 50 % (таблица 1), что обуславливает продолжительность жизненного цикла проектов в пределах 15–30 лет. Различия в сроке службы оборудования обуславливают необходимость повторных капитальных вложений в пределах проектного периода, что видно на рисунке 1.

На примере технологии SOEC, срок службы оборудования которой составляет около пяти лет, в течение более чем двадцатилетнего проектного цикла требуется многократная замена оборудования. Это формирует несколько периодов отрицательных денежных потоков и приводит к неординарной структуре денежных потоков. Такая структура денежных потоков может обуславливать появление нескольких решений показателя внутренней нормы доходности (IRR) и искажения расчётов срока дисконтированной окупаемости (DPP), что усложняет интерпретацию результатов. Кроме того, в структуре затрат значительную долю занимают затраты на электроэнергию. Это связано с высокой чувствительностью зелёных технологий к колебаниям тарифов на электроэнергию и их зависимостью от энергетических ресурсов. В связи с этим при расчёте приведённых удельных затрат на производство водорода затраты на электроэнергию учитываются отдельно.

Ключевой особенностью является отсутствие на мировом рынке единой и прозрачной системы ценообразования

на водород. Цена водорода формируется преимущественно под воздействием субсидий, долгосрочных контрактов или внутренних расчётов, а не исключительно рыночным механизмом спроса и предложения. Такая ценовая неопределённость затрудняет формирование устойчивых прогнозов будущих доходов. Теоретически показатель чистой приведённой стоимости может применяться и в этих условиях, однако отсутствие единого ценового ориентира делает оценки более субъективными и снижает их надёжность.

Тем самым высокая капиталоемкость, неординарная структура денежных потоков и отсутствие единой системы рыночных цен создают экономические условия, при которых предпосылки применения традиционных инвестиционных критериев оказываются нарушенными. В результате искажаются расчётные значения показателей IRR, PI и DPP, снижается достоверность оценки по показателю NPV и сужаются возможности использования классических методов инвестиционного анализа применительно к проектам водородной энергетики.

2. Экономическая оценка проектов по производству водорода должна осуществляться на основе показателя LCOH (приведенные удельные затраты на производство водорода) с применением бинарного дисконтирования, что обеспечивает устранение методических ограничений традиционного подхода.

В условиях отсутствия сформированной единой системы ценообразования на рынке водорода показатель чистой приведённой стоимости (NPV) может использоваться лишь при жёстких допущениях относительно цены на водород. Если в качестве целевой установки на протяжении жизненного цикла проекта принимается условие безубыточности, то есть $NPV = 0$, цена водорода, обеспечивающая равенство доходов и затрат,

соответствует его удельным затратам на производство — показателю LCOH, что в соответствии с преобразованием исходной формулы приводит к формуле (1):

$$LCOH = P_{H_2} = \frac{\sum_{t=0}^T (Capex_t + Opex_t + EnergyCost_t) / (1+r)^t}{\sum_{t=1}^T H_t / (1+r)^t} \quad (1)$$

где $Capex_t$ — капитальные затраты; $Opex_t$ — эксплуатационные затраты (за вычетом затрат на энергоресурсы); $EnergyCost_t$ — затраты на энергоресурсы (для электролиза — затраты на электроэнергию); H_t — объём производства (кг H_2 /год); r — ставка дисконтирования; t — расчётный период в пределах жизненного цикла проекта; T — продолжительность жизненного цикла проекта.

При этом затраты на энергоресурсы обычно выделяются отдельно из состава OPEX ввиду их существенной роли в формировании приведённых удельных затрат на производство водорода.

В отличие от традиционных методов экономической оценки, показатель LCOH переносит аналитический акцент с оценки прибыльности на анализ структуры затрат, что позволяет избежать субъективных предположений относительно будущей цены водорода.

Вместе с тем модель LCOH содержит ряд ограничений, связанных с применением единой ставки дисконтирования при приведении затрат и объёма производства.

Повышение ставки дисконтирования интерпретируется как отражение роста неопределённости и стоимости капитала. Однако в расчётной формуле (1) это приводит к снижению приведённых затрат, что формирует логическое несоответствие между экономическим смыслом изменения ставки и направлением изменения расчётного результата.

Для проектов производства водорода характерна концентрация капитальных вложений на начальном этапе при смещении основного объёма выпуска на более поздние периоды.

Использование единой ставки дисконтирования в таких условиях приводит к чрезмерному обесцениванию долгосрочного выпуска и усилению относительного веса первоначальных затрат. В результате показатель LCOH принимает завышенные значения.

Применение одинаковой ставки дисконтирования для затрат и объёма производства приводит к тому, что изменение ставки воздействует на обе части формулы в одном направлении. Это снижает чувствительность показателя LCOH к изменению условий расчёта и не отражает различия в характере неопределённости затрат и выпуска.

Указанные ограничения модели LCOH связаны с использованием единой ставки дисконтирования при различном характере проявления неопределённости. В связи с этим возникает необходимость отдельного учёта рисков, воздействующих на затраты и объём производства.

Концепция бинарного дисконтирования получила отражение в ряде научных исследований, посвящённых дифференцированному учёту рисков при оценке инвестиционных проектов. Наиболее системное изложение данного подхода представлено в работе С. Г. Галевского (2020), где предложена схема дисконтирования с разделением рисков первого и второго рода. Риск первого рода связан с недополучением ожидаемых притоков и отражается повышением ставки дисконтирования. Риск второго рода проявляется в превышении прогнозируемых затрат и предполагает, напротив, использование более низкой ставки дисконтирования.

Для проектов производства водорода неопределённость в части затрат и выпуска имеет различную направленность. В отношении затрат риск выражается преимущественно в их превышении по сравнению с плановыми значениями, что означает необходимость увеличения приведённой величины затрат при учёте неопределённости. В отношении объёма производства

риск проявляется в недостижении проектных показателей, что приводит к снижению приведённого объёма выпуска.

Применение единой ставки дисконтирования в модели LCOH приводит к тому, что повышение ставки уменьшает приведённую величину затрат, что противоречит экономическому смыслу оценки. В этой связи применение бинарного дисконтирования при расчёте показателя LCOH является необходимым для получения корректных результатов экономической оценки.

В рамках данного подхода предлагается использовать бинарную модель расчёта LCOH (BD-LCOH), которая имеет следующий вид (2):

$$LCOH = \frac{\sum_{t=0}^T (Capex_t + Opex_t + EnergyCost_t) / (1 + r_c)^t}{\sum_{t=1}^T H_t / (1 + r_s)^t} \quad (2)$$

где r_c — ставка дисконтирования затрат; r_s — ставка дисконтирования выпуска.

В расчёте вводится безрисковая ставка дисконтирования r_f как нейтральный ориентир. Для затрат используется относительно более низкая ставка дисконтирования, что позволяет учитывать возможное превышение бюджета. Для объёма производства применяется более высокая ставка, отражающая риск недостижения ожидаемого объёма выпуска.

Ставки бинарного дисконтирования r_s и r_c определяются из условия согласования общей требуемой доходности проекта (3):

$$\frac{I_0 + C}{I_0} r_s - \frac{C}{I_0} r_c = r \quad (3)$$

где I_0 — первоначальные инвестиции; C — приведённая стоимость будущих затрат; r — общая требуемая доходность проекта.

При заданных значениях r , r_f и структуры затрат данное соотношение позволяет определить взаимосвязанные значения r_s и r_c при соблюдении условия $r_c \leq r_f \leq r_s$. На этой основе

рассчитываются нижняя и верхняя границы интервала значений BD-LCOH.

Использование двух ставок дисконтирования в расчёте показателя LCOH приводит к тому, что результирующее значение определяется не в виде единственной точечной оценки, а в виде интервала.

Для проверки практической применимости предложенной модели были выполнены численные расчёты при идентичных исходных условиях, включая годовой объём производства, срок эксплуатации и фиксированную безрисковую ставку дисконтирования. В анализ были включены пять технологий производства водорода: ALK, PEM, SOEC, SMR и SMR + CCUS. На рисунке 2 представлены результаты расчётов для технологии ALK.

Полученные результаты показывают, что по сравнению с применением бинарного дисконтирования традиционная модель LCOH систематически приводит к завышению приведённых удельных затрат на производство водорода. Применение бинарного дисконтирования позволяет получить интервальную оценку значений LCOH вместо одного точечного значения.

Анализ полученных интервальных значений показывает, что ширина интервала LCOH различается для различных технологий производства водорода. Ширина интервала характеризует уровень неопределённости. Уровень этой неопределённости во многом определяется особенностями рассматриваемых технологий, включая различия в капиталоемкости, сроках службы оборудования и частоте необходимости его замены, что связано с различиями в уровне их технологической зрелости.

Сопоставление результатов расчётов с уровнем технологической зрелости технологий производства водорода позволяет выявить взаимосвязь между указанными показателями (таблица 2).

Таблица 2 - Связь уровня технологической зрелости (TRL) технологий производства водорода и ширины интервала значений LCOH

Технология производства водорода	Уровень технологической зрелости (TRL)	Ширина интервала LCOH при различных ставках дисконтирования, долл. США/кг		
		5%	10%	15%
ALK	9	0.004	0.028	0.070
PEM	6-8	0.009	0.061	0.153
SOEC	5	0.067	0.199	0.476

Как следует из таблицы 2, ранжирование технологий по ширине интервала значений LCOH в целом соответствует их технологической зрелости. Полученные результаты указывают на связь между технологической зрелостью и шириной интервала значений LCOH.

Для дальнейшей проверки модели BD-LCOH выбран реальный проект производства водорода. Расчёты выполнены с применением как традиционного показателя LCOH, так и модели BD-LCOH. В качестве примера рассмотрен действующий проект производства «зелёного» водорода, реализуемый в г. Куча (Синьцзян, КНР). В рамках исследования проанализированы два возможных варианта реализации проекта: (1) полностью сетевой вариант энергоснабжения; (2) вариант со строительством собственной фотоэлектрической станции и частичной закупкой электроэнергии из сети. Результаты расчёта LCOH представлены на рисунке 3.

При известном уровне стоимости капитала для проектов возобновляемой энергетики в Китае, равном 5,76%, данное значение превышает точку пересечения кривых LCOH двух вариантов, полученную в рамках традиционной модели (5,60%). На основании этого традиционный подход приводит к выводу о большей экономической целесообразности полностью сетевого варианта. Однако фактически в рамках проекта был реализован

вариант со строительством фотоэлектрической станции и частичной закупкой электроэнергии.

В связи с этим при тех же исходных параметрах выполнен расчёт с использованием модели BD-LCOH, результаты которого представлены на рисунке 4.

На основе пересечения верхних и нижних границ интервалов LCOH для двух вариантов сформирован диапазон значений 5,66–6,76%, в пределах которого экономическое преимущество одного варианта над другим не носит однозначного характера и требует учёта неопределённости.

Необходимо отметить, что для проектов производства водорода неопределённость в наибольшей степени определяется затратами, включая капитальные, эксплуатационные и энергетические расходы. В то же время объем выпуска в значительной мере определяется заданной установленной мощностью и проектным годовым объёмом производства и характеризуется существенно меньшей вариативностью. В этих условиях фактическое значение LCOH должно располагаться вблизи минимального значения интервала. Правая граница интервала (6,76%) соответствует точке пересечения минимальных значений LCOH для двух вариантов; превышение данного уровня означает утрату экономической целесообразности варианта со строительством фотоэлектрической станции.

Фактический уровень стоимости капитала (5,76%) существенно ниже указанной границы, что свидетельствует о более высокой экономической обоснованности варианта со строительством фотоэлектрической станции по сравнению с полностью сетевым вариантом. Полученный вывод полностью соответствует фактически реализованному проектному решению и подтверждает корректность предложенной модели BD-LCOH.

В целом результаты исследования показывают, что применение бинарного дисконтирования позволяет устранить ло-

гические ограничения традиционной формулы LCOH и обеспечивает более адекватную оценку экономической целесообразности проектов производства водорода, снижая риск завышения затрат и необоснованного исключения потенциально перспективных вариантов. Таким образом, применение бинарного дисконтирования при расчёте показателя LCOH является необходимым условием корректной экономической оценки проектов в сфере водородной энергетики.

3. Выбор экономически обоснованной технологии производства водорода целесообразно осуществлять на основе совместного учёта уровня удельных затрат и неопределённости при изменении технологических параметров и цен на электроэнергию.

С развитием технологий производства водорода повышение эффективности новых технологических решений может приводить к снижению значения LCOH. В этих условиях выбор технологий производства водорода исключительно на основе среднего значения LCOH может приводить к предпочтению более новых технологий. Вместе с тем технологии, находящиеся на ранних стадиях развития, как правило, характеризуются более высокой степенью неопределённости.

Расчёты, выполненные с использованием модели BD-LCOH, показывают, что значения LCOH для различных технологий формируются в виде интервалов. Ширина интервала отражает уровень неопределённости и в значительной степени связана с технологической зрелостью рассматриваемых технологий: для более зрелых технологий диапазон значений LCOH, как правило, оказывается более узким, тогда как для развивающихся технологий он шире.

Таким образом, при выборе технологий производства водорода целесообразно учитывать два показателя — уровень затрат и неопределённость.

Выполненные расчёты позволяют представить результаты оценки технологий производства водорода в интервальной форме (4):

$$[LCOH^{\min}(w), LCOH^{\max}(w)], \quad (4)$$

где $w = (w_1, \dots, w_n)$ — параметр сочетания технологий, а w_i обозначает долю инвестиций, направляемых в i -ю технологию.

Для сопоставления технологий вводятся два показателя (5):

$$\begin{aligned} x(w) &= LCOH^{\max}(w) - LCOH^{\min}(w), \\ y(w) &= \frac{LCOH^{\max}(w) + LCOH^{\min}(w)}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Показатель $x(w)$ характеризует степень неопределённости, тогда как показатель $y(w)$ отражает уровень затрат.

Для обеспечения сопоставимости показателей используется нормирование методом min–max (6):

$$\tilde{x}(w) = \frac{x(w) - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad \tilde{y}(w) = \frac{y(w) - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad (6)$$

После нормирования каждая технология или их сочетание представляются точкой $(x(w), y(w))$ в пространстве «уровень затрат — неопределённость».

В качестве целевой функции задачи выбора технологий принимается минимизация расстояния до начала координат в пространстве «уровень затрат — неопределённость». Начало координат соответствует идеальному состоянию, характеризующемуся минимальными затратами и нулевой неопределённостью. Соответственно, оптимальным считается вариант сочетания технологий, обеспечивающий минимальное расстояние до этой точки.

Минимизируемая целевая функция имеет вид евклидова расстояния до начала координат (7):

$$d(w) = \sqrt{\tilde{x}^2(w) + \tilde{y}^2(w)} \rightarrow \min \quad (7)$$

при ограничениях (8):

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0. \quad (8)$$

На этой основе разработан методический подход к выбору технологий производства водорода, основанный на следующих принципах:

- (1) допускается использование как одной технологии, так и их сочетаний;
- (2) результаты расчёта LCOH представляются в интервальной форме;
- (3) выбор технологий осуществляется на основе совместного учёта уровня затрат и неопределённости.

Общая схема реализации предложенного подхода представлена на рисунке 5.

Для проверки применимости предложенного подхода к выбору технологий производства водорода выполнен сценарный анализ отдельных технологий и их сочетаний при единых инвестиционных предпосылках. Путём варьирования технологических параметров и уровня цен на электроэнергию проанализированы изменения технологического выбора на различных этапах развития отрасли.

Как показано на рисунке 6, в условиях 2025 года технология ALK демонстрирует наилучшие значения одновременно по двум критериям — уровню затрат и неопределённости, вследствие чего определяется как доминирующая технология.

В прогнозных условиях 2030 года по мере повышения эффективности технологии SOEC её уровень затрат заметно снижается, что усиливает её конкурентные позиции по затратному критерию. Вместе с тем для данной технологии сохраняется более высокий уровень неопределённости, что связано с её меньшей технологической зрелостью. В отличие от этого тех-

нология ALK, характеризующаяся более высокой технологической зрелостью, сохраняет меньшую неопределённость, хотя по уровню затрат уже не обладает прежним преимуществом.

В этих условиях ни одна из технологий не обладает одновременным преимуществом по двум критериям, что приводит к переходу от однотехнологического доминирования к выбору сочетания технологий. Оптимальным вариантом в прогнозном сценарии является сочетание технологий ALK и SOEC с долевым соотношением инвестиций примерно 30% и 70% соответственно (рисунок 7).

Поскольку цены на электроэнергию являются одним из ключевых факторов, влияющих на LCOH, дополнительно проанализировано влияние различных уровней цен на электроэнергию на выбор технологий в условиях 2030 года (рисунок 8).

Результаты показывают, что в диапазоне цен 60–20 €/МВт·ч оптимальное решение устойчиво формируется в виде сочетания технологий ALK–SOEC, значения которого представлены в таблице 3. Доминирование технологии ALK наблюдается лишь при снижении цены электроэнергии примерно до 10 €/МВт·ч.

Таблица 3 – Влияние уровня цен на электроэнергию на оптимальное сочетание технологий производства водорода

Цена электроэнергии, €/MWh	Оптимальное сочетание технологий
60	29,85% ALK + 70,15 % SOEC
50	29,94 % ALK + 70,06 % SOEC
40	30,07 % ALK + 69,93 % SOEC
30	30,28% ALK + 69,72 % SOEC
20	30,62 % ALK + 69,38 % SOEC
10	100 % ALK

Полученные результаты свидетельствуют о том, что оптимальное сочетание технологий в пропорции 30% ALK и 70%

SOEC сохраняет свои экономические преимущества при изменении цены электроэнергии в пределах рассматриваемого диапазона.

Таким образом, предложенный методический подход позволяет формализовать задачу выбора технологий производства водорода на основе совместного учёта уровня затрат и неопределённости и определять как доминирующие технологии, так и оптимальные сочетания технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена совершенствованию методических основ экономической оценки и выбора технологий в проектах производства водорода в условиях высокой капиталоемкости и неопределённости. Для проектов такого типа характерны значительный объём первоначальных вложений, длительный жизненный цикл, отсутствие единой системы ценообразования и высокая чувствительность к технологическим и энергетическим параметрам, что заметно ограничивает возможности применения традиционных подходов к экономической оценке на отраслевом уровне. Вместе с тем широко используемый показатель LCOH, сохраняя практическую значимость, обладает внутренними методологическими ограничениями, которые ведут к систематическому завышению оценки приведённых удельных затрат на производство водорода.

В работе бинарное дисконтирование адаптировано к расчёту показателя LCOH. Использование различных ставок дисконтирования для отдельных элементов расчёта позволяет учитывать неодинаковый характер неопределённости в проектах производства водорода, прежде всего связанный с возможным превышением фактических затрат по сравнению с плановыми и со снижением фактического объёма производства относительно расчётного уровня. За счёт этого становится возможен переход от точечной оценки приведённых удельных затрат на

производство водорода к интервальному представлению результатов. Интервальная форма LCOH создаёт методическую основу для последующего сравнительного и сценарного анализа. Результаты теоретических расчётов и проверка на материале реального проекта подтверждают применимость предложенного подхода к оценке приведённых удельных затрат на производство водорода и его практическую реализуемость.

На основе разработанного инструмента BD-LCOH в работе сформирован методический подход к обоснованию выбора технологий в проектах производства водорода. Этот подход ориентирован не на установление универсального превосходства отдельных технологий, а на анализ экономической целесообразности их выбора и сочетания в условиях сосуществования альтернатив и изменения внешних параметров. Он учитывает как уровень удельных затрат, так и диапазон возможных результатов экономической оценки, что позволяет получать экономически интерпретируемые и практически применимые выводы о выборе технологий на различных этапах развития водородной энергетики.

В результате выполненного исследования получены следующие основные научные результаты и положения, обладающие элементами научной новизны:

1. Уточнены методологические границы применимости классического показателя LCOH в проектах производства водорода. Показано, что использование единой ставки дисконтирования в условиях высокой доли капитальных затрат и длительного жизненного цикла приводит к систематическим искажениям в оценке приведённых удельных затрат на производство водорода и снижает аналитическую ценность данного показателя для целей отраслевого анализа.

2. Разработан метод экономической оценки приведённых удельных затрат на производство водорода BD-LCOH на

основе бинарного дисконтирования. Предложенный метод сохраняет концептуальную основу показателя LCOH и одновременно расширяет её за счёт более корректного учёта различий в характере неопределённости затратной и производственной частей проекта, что повышает достоверность получаемой оценки.

3. Обоснована практическая применимость бинарного подхода к оценке проектов производства водорода. Выполненные расчёты и проверка на реальном проекте показали, что применение BD-LCOH позволяет устранить систематическое завышение затрат, характерное для классического подхода, и получить результаты, согласующиеся с фактической практикой реализации проектов.

4. На базе модели BD-LCOH разработан метод выбора технологий и допустимых сочетаний технологий в проектах производства водорода. Метод основан на совместном учёте уровня LCOH и интервала значений LCOH, что позволяет различать ситуации однотехнологического доминирования и технологического компромисса, формируя экономически обоснованные решения в зависимости от условий реализации проекта.

Перспективы дальнейших исследований связаны со следующими направлениями:

— интеграция модели с методами оптимизации конфигурации энергосистем «ВИЭ + электролиз»;

— оценка влияния различных режимов государственной поддержки и налоговых механизмов на интервал затрат на производство водорода;

— применение BD-подхода к анализу проектов по хранению водорода, производству аммиака и синтетических энергоносителей.

Развитие указанных направлений может усилить методическую базу оценки инвестиционных проектов в сфере водородной энергетики и расширить практическое применение разработанной модели.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Галевский, С.Г. Водородная энергетика в Китае: состояние, тенденции, перспективы / С.Г. Галевский, **Х. Цянь** // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2024. – Т. 14, № 9-1. – С. 264–277. – EDN VHZPH.

2. **Цянь, Х.** Структурные ограничения модели затрат на производство водорода (LCOH) в проектах водородной энергетики / **Х. Цянь**, С.Г. Галевский // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 7. – С. 455–459. -EDN: TRBDEE.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Galevskiy, S. Developing and Validating Comprehensive Indicators to Evaluate the Economic Efficiency of Hydrogen Energy Investments / S. Galevskiy, **H. Qian** // Operational Research in Engineering Sciences Theory and Applications. – 2024. - Vol. 7, Issue 3. – pp. 188–207. DOI: 10.5281/zenodo.15093154

4. Galevskiy, S. A Binary Discounting Method for Economic Evaluation of Hydrogen Projects: Applicability Study Based on Levelized Cost of Hydrogen (LCOH) / S. Galevskiy, **H. Qian** // Energies. – 2025. – Vol. 18, № 14. – Article 3839. – 15 p. DOI: 10.3390/en18143839

Публикации в прочих изданиях:

5. **Цянь, Х.** Производство водорода в Китае: тенденции и перспективы / **Х. Цянь** // Менеджмент, экономика, этика, технология - МЕЕТ 2024 : Сборник статей X Международной конфе-

рениции, Санкт-Петербург, 10–11 октября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2025. – С. 170-174. – EDN HIAVPY.

6. **Цянь, Х.** Сравнительный анализ LCOH в проектах зеленого и голубого водорода / **Х. Цянь** // Современная экономика и право: опыт теоретического и эмпирического анализа : Сборник статей IX Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 17 сентября 2025 года. – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2025. – С. 47-56. – EDN VFYTPB.

7. Галевский, С.Г. Инвестиционная оценка водородных проектов в условиях неопределённых цен / С.Г. Галевский, **Цянь Хайдун** // Инновации: от теории к практике : сборник тезисов докладов X Международной научно-практической конференции, Брест, 30–31 октября 2025 года. – Брест : Издательство Брестского государственного технического университета, 2025. – Ч. 1. – С. 214–220. ISBN 978-985-493-679-6.

Таблица 1 - Сравнение основных технологий получения водорода

Технология получения водорода	Энергоемкость (кВт·ч/кг H ₂)	Капитальные затраты(\$/кВт)	Доля CAPEX в структуре затрат (%)	Технологическая зрелость	Подходящий масштаб	Уровень выбросов CO ₂	Сложность эксплуатации	Основные характеристики
SMR (паровая конверсия метана)	35–45	500–1000	10-20%	Высокая	Крупный	Высокий	Средняя	Наименьшая стоимость, но высокий уровень выбросов
SMR + CCUS	38–50	900-1600	25-35%	Средне-высокая	Крупный	Средний (60–90% улавливания)	Высокая	Снижение выбросов, высокая стоимость и сложность
Щелочной электролиз (ALK)	50–60	500-1000	45-60%	Средняя	Средний	Нулевой	Средняя	Зрелая технология, умеренная стоимость
PEM-электролиз	55–65	750-1300	55-70%	Средняя	Малый-средний	Нулевой	Высокая	Высокая адаптивность к переменной генерации ВИЭ
SOEC-электролиз	40–55	800+	60-75%	Низкая	Малый	Нулевой	Высокая	Энергоэффективность

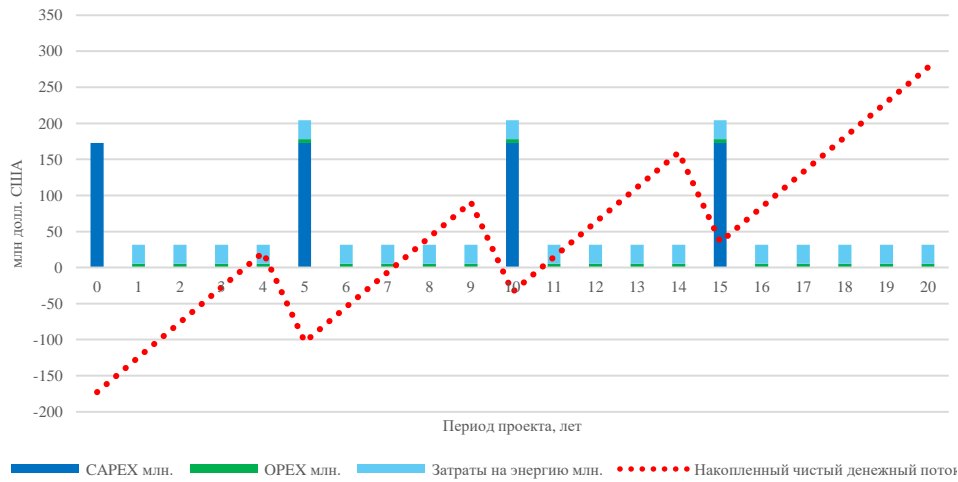


Рисунок 1 – Структура денежных потоков и затрат проекта по технологии SOEC при цене водорода 4 долл. США/кг

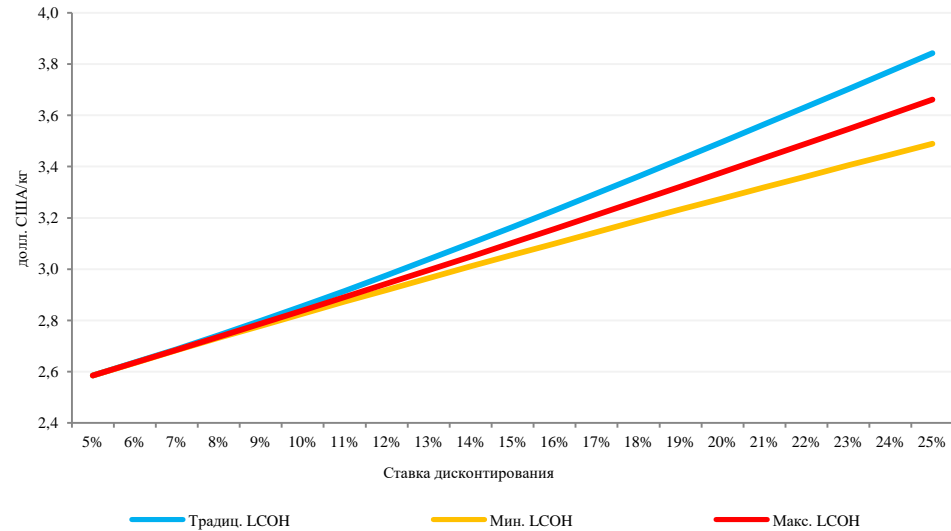


Рисунок 2 - Диапазон LCOH для технологии ALK в зависимости от ставки дисконтирования

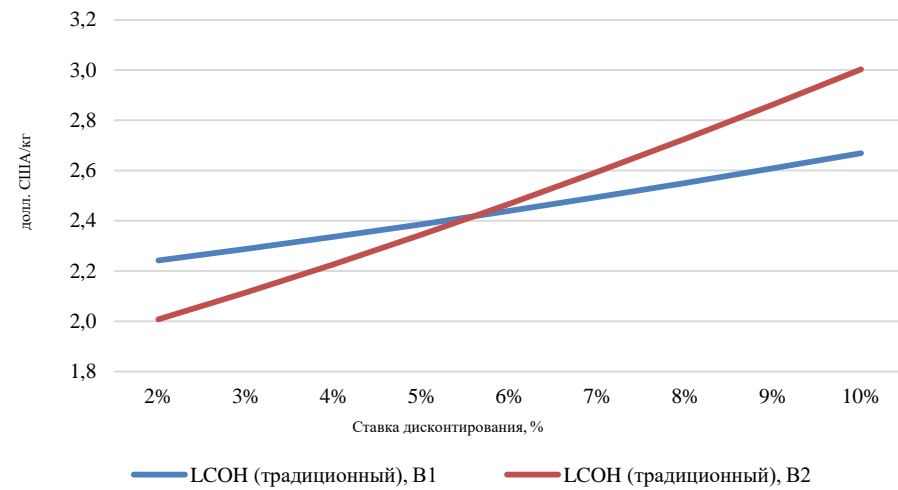


Рисунок 3 - Сравнение значений LCOH для варианта 1 и 2 при различных ставках дисконтирования (2–10%)

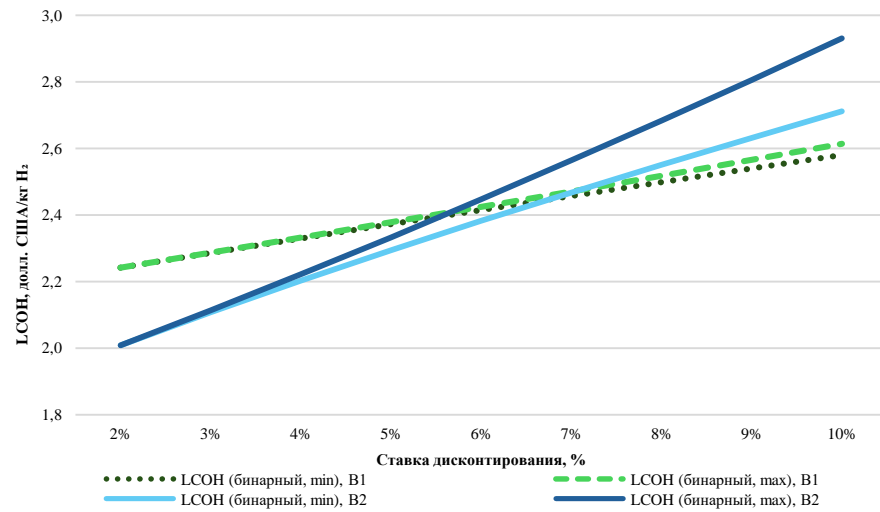


Рисунок 4 - Сравнение LCOH для варианта 1 и варианта 2 с учётом бинарного дисконтирования (2–10%)



Рисунок 5 - Методологическая схема выбора технологий в проектах производства водорода

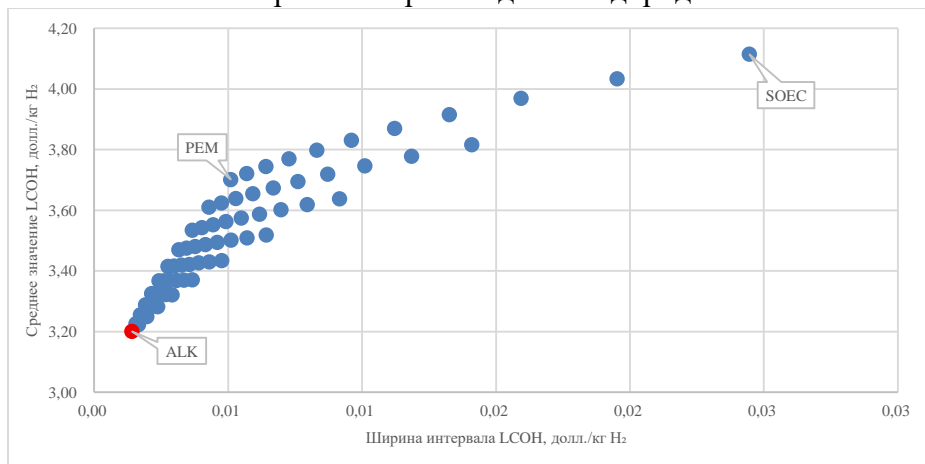


Рисунок 6 – Сравнение технологий производства водорода (2025 г.)

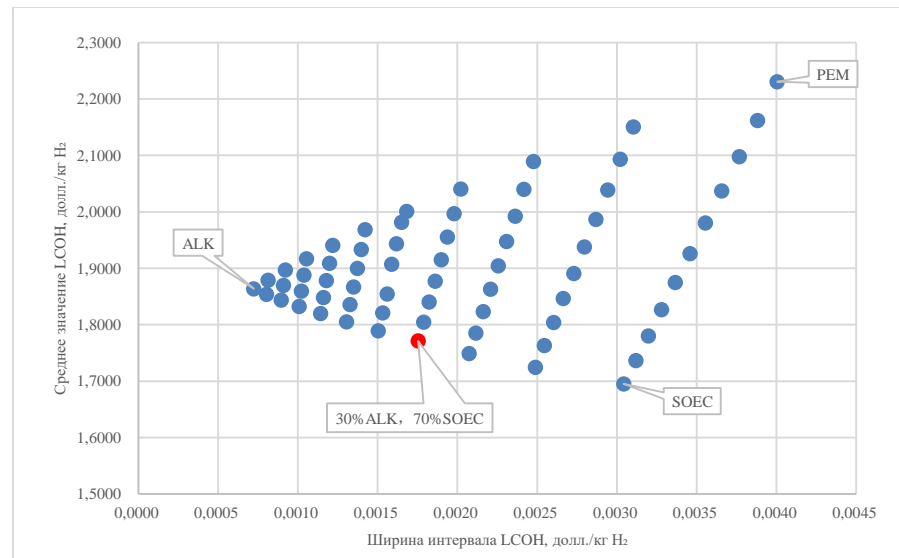


Рисунок 7 – Сравнение технологий производства водорода (прогнозные технические параметры 2030 г.)

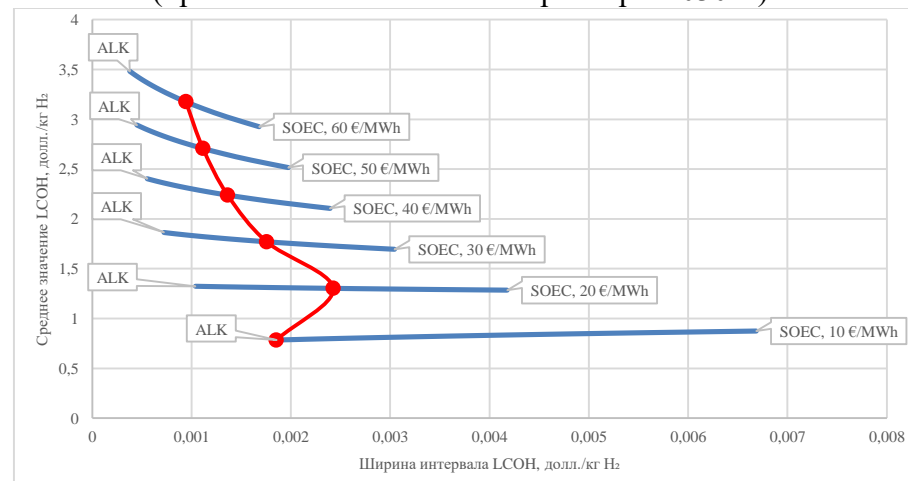


Рисунок 8 – Изменение оптимального сочетания технологий ALK–SOEC при различных уровнях цен на электроэнергию (прогнозные технические параметры 2030 г.)