

УДК 338.4

DOI: 10.34670/AR.2026.40.35.106

Сравнительная оценка технологий глубокой переработки углей в энергетических целях: метрика сопоставимой энергетической ценности и вероятностная оценка операционного паритета

Свадковский Владислав Андреевич

Аспирант,
Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации,
125167, Российская Федерация,
Москва, Ленинградский просп., 49/2;
e-mail: vladskk@yandex.ru

Аннотация

Выбор технологической траектории использования угля за пределами коксо-доменной схемы упирается в отсутствие корректной базы сравнения: кокс, водород и термококс различаются агрегатным состоянием, энергетической плотностью, требованиями к инфраструктуре и чувствительностью к климатическому регулированию, вследствие чего сопоставление их отпускных цен или удельных затрат на тонну лишено экономического содержания. Цель работы – построить и верифицировать измеритель, приводящий разнородные продукты глубокой переработки угля к единой шкале, и определить условия, при которых альтернативные технологические маршруты достигают операционного паритета с традиционной схемой. Методология включает компонентную нормировку затрат к стоимости 1 ГДж энергетической функции, аналитическое исследование свойств полученной метрики, имитационное моделирование методом Монте-Карло (100 тыс. итераций на маршрут), глобальный анализ чувствительности на основе ранговых стандартизованных коэффициентов, расчет предельных значений переключения и структурированный экспертный опрос ($n = 73$). Результаты. Измеритель применен к девяти технологическим маршрутам, включая пиролиз, подземную газификацию, углехимию, пылеугольное вдувание и биоуглерод. Показано, что относительное преимущество водородного маршрута существует только при действующем углеродном регулировании: аналитически определена точка смены ранжирования $Pc^* = 0,188$ у.е., ниже которой доминирует термококсовый маршрут, а при нулевой цене выбросов коэффициенты составляют 97,4 и 92,3 % соответственно; прочие семь маршрутов не выходят на первое место ни при каком уровне регулирования. Выигрыш термококса относительно пылеугольного вдувания как наиболее распространенной практики составляет лишь около 5 п.п. Вероятность операционного паритета равна 21,8 % для водородного и 78,2 % для термококсового маршрута. Глобальный анализ чувствительности выявил, что дисперсия результата водородного маршрута на 67 % объясняется качеством сырья, тогда как термококсового – на 85 % уровнем затрат на производство продукта; организационный параметр в обоих случаях статистически незначим. Предельное значение переключения по качеству сырья для водородного маршрута составляет 0,950 и превышает экспертно верифицированный порог 0,91, что количественно объясняет низкую вероятность

паритета. Верификация на промышленном проекте дала значение метрики 60,4 у.е. при NPV 6,75 млрд руб. и IRR 22,59 %. Вклад состоит в формализации операционного измерителя с доказанными свойствами инвариантности и однородности, в выявлении условия смены ранжирования технологических маршрутов, в количественном подтверждении процедурного отбора технологий и в демонстрации расхождения между экспертно установленными и расчетно необходимыми пороговыми условиями.

Для цитирования в научных исследованиях

Свадковский В.А. Сравнительная оценка технологий глубокой переработки углей в энергетических целях: метрика сопоставимой энергетической ценности и вероятностная оценка операционного паритета // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2026. Том 16. № 6А. С. 720-746. DOI: 10.34670/AR.2026.40.35.106

Ключевые слова

Глубокая переработка угля, газификация бурых углей, термококс, водород, сопоставимая энергетическая ценность, операционный паритет, анализ чувствительности, углеродное регулирование, имитационное моделирование, энергетическая эффективность, технологический выбор.

Введение

Экономическая проблема угольной отрасли описывается сегодня не убыванием спроса на уголь вообще, а сжатием спроса на уголь в его исторически сложившейся функции – топлива паросилового цикла и сырья для коксования [IEA, 2024a; IEA, 2024b]. Наиболее уязвимы бурые угли: их доля в ресурсной базе велика, а пригодность для классического коксохимического передела ограничена зольностью, влажностью и низкой теплотой сгорания. Экономический смысл глубокой переработки состоит именно в этом разрыве – малоценное в исходном виде сырье приобретает ценность после перевода в продукт с заданной энергетической функцией [Исламов, 2010; Исламов, 2015; Степанов, Исламов, 2021].

Однако при переходе к практическому выбору маршрута возникает измерительное затруднение. Продукты, конкурирующие за одну и ту же роль в промышленном переделе, физически несоизмеримы: водород, термококс и металлургический кокс различаются не только теплотой сгорания, но и способом транспортировки, потерями при обращении и реакцией на введение платы за выбросы. Сравнение по цене тонны смешивает энергетическую и массовую составляющие; сравнение по тонне условного топлива снимает энергетическое искажение, но игнорирует логистику, координационные издержки и регуляторную нагрузку. Как будет показано в разделе 2, ни одна из распространенных стоимостных метрик – приведенная стоимость энергии, предельные затраты на снижение выбросов, оценки полного жизненного цикла – не решает задачу целиком.

Настоящая работа отвечает на три исследовательских вопроса. RQ1: какими свойствами должен обладать измеритель, обеспечивающий экономически корректное сопоставление разнородных продуктов глубокой переработки угля, и выполнимы ли эти свойства одновременно? RQ2: при каких условиях внешней среды ранжирование альтернативных технологических маршрутов по такому измерителю устойчиво, а при каких – меняется на противоположное, и сохраняется ли результат при расширении периметра сопоставления? RQ3:

какие параметры определяют вероятность достижения операционного паритета и совпадают ли расчетно необходимые пороговые условия с теми, что признаются достижимыми отраслевыми экспертами?

Вклад работы состоит в следующем. Во-первых, предложен операционный измеритель, для которого аналитически доказаны свойства нормировочной инвариантности, нулевой однородности по ценам и условной монотонности по уровню углеродного регулирования; последнее свойство порождает проверяемое условие смены ранжирования маршрутов. Во-вторых, показано, что относительное преимущество водородного маршрута не является технологическим свойством, а полностью определяется допущением о действующем углеродном регулировании, и определена точка, ниже которой ранжирование меняется. В-третьих, выполнен глобальный анализ чувствительности, выявивший расхождение между экспертно верифицированными и расчетно необходимыми пороговыми условиями – результат, который меняет интерпретацию экспертных процедур в подобных исследованиях.

Литература о декарбонизации энергоемкой промышленности за последнее десятилетие сместилась от каталогизации технологий к оценке их системной реализуемости [Bataille et al., 2018; Kim et al., 2022; Rissman et al., 2020; Fan, Friedmann, 2021]. Обзорные работы фиксируют устойчивый набор траекторий для черной металлургии: повышение энергоэффективности действующих переделов [Worrell et al., 2001], улавливание и захоронение диоксида углерода [Leeson et al., 2017], прямое восстановление на водороде [Vogl et al., 2018; IEA, 2020], электрометаллургия на низкоуглеродной электроэнергии [Boldrini et al., 2024], частичное замещение кокса биоуглеродом [Safarian, 2023]. Техничко-экономические сопоставления этих траекторий выполнены для отдельных национальных контекстов – Германии [Arens et al., 2017; Fischedick et al., 2014; Harpprecht et al., 2022], Швеции и Финляндии [Pei et al., 2020], Китая, Мексики и США [Hasanbeigi et al., 2016].

Общая черта этих работ – сопоставление траекторий по удельным затратам на тонну продукции или по предельным затратам на снижение выбросов [Kanchiralla et al., 2023]. Такой подход адекватен, когда сравниваются способы производства одного и того же конечного продукта, но теряет корректность, когда сравниваются промежуточные энергоносители разной физической природы. Отдельная линия исследований рассматривает уголь не как объект вытеснения, а как сырье для новых продуктовых цепочек: газификацию [Higman, van der Burgt, 2008; Yuan et al., 2022], подземную газификацию [Takyi et al., 2023], углехимические маршруты, термическое обогащение бурых углей и производство термококса [Исламов, 2010; Исламов, 2015; Степанов, Исламов, 2021]. Экономическая оценка в этой линии, как правило, остается проектной и не предлагает переносимого измерителя [Исламов, 2010a].

Российская литература акцентирует региональное измерение проблемы: инфраструктурные ограничения угольной отрасли [Институт проблем естественных монополий, 2021], влияние водородной энергетики на угольный рынок [Плаkitкин и др., 2021], инструменты регулирования декарбонизации металлургии [Яшалова и др., 2020], эффективность внедрения технологий улавливания и хранения углерода в промышленном секторе России [Савватеев, 2024], справедливый переход и социальные последствия структурной перестройки [Яшалова и др., 2020]. Организационно-экономический контур трансформации опирается на теорию трансакционных издержек [Coase, 1937; Hennart, 1988; Gulati, Singh, 1998], теорию неполных контрактов [Hart, Moore, 1990; Grossman, Hart, 1986] и реляционный взгляд на межфирменное взаимодействие [Dyer, Singh, 1998; Powell, 1990].

Задача сопоставления разнородных энергоносителей не нова, и в прикладной

энергетической экономике сложился набор стандартных измерителей [Wang et al., 2009]. Их применимость к рассматриваемой задаче систематизирована в таблице 1 [IEA, NEA, 2020].

Таблица 1 - Стандартные метрики стоимостного сопоставления энергоносителей и их применимость к продуктам глубокой переработки угля

Метрика	Что измеряет	Ограничение применительно к задаче	Что удерживается в предлагаемом измерителе
Приведенная стоимость энергии (LCOE / LCOH) [IEA, NEA, 2020]	Дисконтированные полные затраты на единицу произведенной энергии за срок службы установки	Смешивает капитальные и операционные затраты, вследствие чего непригодна для предварительного отбора до определения конфигурации инвестиций; не учитывает условия использования продукта у потребителя	Капитальные затраты сознательно вынесены на следующий уровень проверки, что делает измеритель пригодным для стадии отбора
Тонна условного топлива	Энергетический эквивалент массы топлива	Снимает энергетическое искажение, но игнорирует логистику, координационные издержки и регуляторную нагрузку; не различает продукты с одинаковой теплотой сгорания и разной инфраструктурой	Логистическая и координационная компоненты выделены явно и не смешиваются с энергетической
Предельные затраты на снижение выбросов (MAC) [Bataille et al., 2018; Fan, Friedmann, 2021]	Стоимость снижения одной тонны выбросов относительно базовой траектории	Требует заданной базовой траектории и цены выбросов; неприменима в регуляторных контурах, где плата за выбросы отсутствует	Углеродная компонента параметризована и обращается в нуль при отсутствии регулирования, что сохраняет работоспособность измерителя
Оценка полного жизненного цикла (LCA) [Harpprecht et al., 2022; Kanchiralla et al., 2023]	Совокупные воздействия по стадиям жизненного цикла	Ориентирована на экологический, а не на экономический результат; ресурсоемка и плохо совместима со стадией предварительного отбора	Углеродная составляющая интерпретируется как стоимость уязвимости, а не как оценка совокупного баланса выбросов
Многокритериальный анализ (MCDA) [Wang et al., 2009; Stewart, Durbach, 2016; Kaldellis et al., 2021]	Агрегированную оценку по разнородным критериям с весами	Результат зависит от субъективно назначаемых весов; не дает величины, интерпретируемой в стоимостных единицах	Агрегирование выполняется в стоимостной шкале, веса заменены нормировкой с проверяемым ранговым порядком

Источник: составлено автором.

Из таблицы 1 следует, что задача требует измерителя, который, во-первых, работает на стадии предварительного отбора, то есть до определения инвестиционной конфигурации; во-вторых, разделяет энергетическую, логистическую, регуляторную и вспомогательную составляющие, не допуская их взаимного поглощения; в-третьих, сохраняет работоспособность как при наличии, так и при отсутствии платы за выбросы; в-четвертых, выражается в стоимостной, а не в балльной шкале [Kaldellis et al., 2021].

Обзор выявляет пробел: существующие измерители либо преждевременно вводят капитальные затраты, либо теряют экономическую интерпретируемость, либо неработоспособны вне режима углеродного ценообразования. Отсутствует переносимый

операционный измеритель, пригодный для отбора маршрутов глубокой переработки угля до инвестиционной проработки. Отсюда формулируются гипотезы:

H1. Оба рассматриваемых маршрута газификации бурых углей способны достигать операционного паритета с традиционной схемой при выполнении пороговых условий.

H2. Ранжирование маршрутов по предлагаемому измерителю не инвариантно к уровню углеродного регулирования и меняется на противоположное ниже некоторого порогового значения.

H3. Пороговые условия, признаваемые отраслевыми экспертами достижимыми, не совпадают с расчетно необходимыми для достижения паритета.

Материалы и методы исследования

Отбор решений выполнен в два этапа. На первом поле сужалось четырем последовательными фильтрами: промышленно подтвержденная форма применения; вовлечение буроугольной базы в новую производственную цепочку; получение продукта, пригодного для промышленного передела, а не только для энергетики; формирование самостоятельного технологического контура между добычей и потреблением. На втором этапе решения, не прошедшие фильтры, не исключались из анализа окончательно, а относились к уровню сопоставимости В и сохранялись для расширенного сравнения раздела 4.2.

Такой порядок принят потому, что процедурное отсеивание технологии само по себе не доказывает ее экономического отставания: отбор по содержательным признакам и отбор по значению измерителя – разные операции, и их совпадение подлежит проверке, а не постулированию. К перечню дополнительно отнесены два внешних ориентира, не являющихся маршрутами глубокой переработки, но конкурирующих за ту же функцию в переделе: пылеугольное вдувание и биоуглерод (таблица 2).

Таблица 2 - Инвентаризация технологических решений и их роль в сопоставлении

Технологическое решение	Целевой продукт	Капиталоемкость	Инфраструктурная зависимость	Пригодность для передела	Роль в сопоставлении
Ультрасверхкритический паросиловый цикл	Электроэнергия	Средняя	Низкая	Отсутствует	Исключено: локальная модернизация, новая цепочка не образуется
Улавливание и захоронение CO ₂ на угольной генерации [Leeson et al., 2017]	Электроэнергия	Очень высокая	Высокая	Отсутствует	Исключено: энергетический штраф, продукт вне передела
Полная газификация бурых углей с получением водорода [IEA Clean Coal Centre, 2021]	Водород	Высокая	Очень высокая	Высокая	Основной сценарий S1, уровень А
Частичная газификация бурых углей с получением термококса	Термококс, горючий газ	Средняя	Средняя	Высокая	Основной сценарий S2, уровень А

Технологическое решение	Целевой продукт	Капитало-емкость	Инфра-структурная зависимость	Пригодность для передела	Роль в сопоставлении
[Исламов, 2010а; Исламов, 2015; Степанов, Исламов, 2021]					
Низкотемпературный пиролиз [Исламов, 2010]	Полукокс, смолы	Низкая	Низкая	Средняя	Сценарий S3, уровень А
Подземная газификация угля [Takyi et al., 2023]	Продуктовый газ	Средняя	Высокая	Низкая	Сценарий S4, уровень А
Пылеугольное вдувание (внешний ориентир)	Пылеугольное топливо	Низкая	Низкая	Высокая	Сценарий S5, уровень А
Частичное замещение кокса биоуглеродом (внешний ориентир) [Safarian, 2023]	Биоуглерод	Средняя	Средняя	Высокая	Сценарий S6, уровень А
Термическое обогащение: пневмосепарация и осушка	Облагороженный энергетический уголь	Низкая	Низкая	Отсутствует	Сценарий S7, уровень В
Парогазовый цикл с внутрицикловой газификацией и улавливанием CO ₂ [Boldrini et al., 2024]	Электроэнергия, синтез-газ	Высокая	Высокая	Низкая	Сценарий S8, уровень В
Углехимические маршруты CTL / CTG	Жидкое топливо, заменители газа	Высокая	Средняя	Низкая	Сценарий S9, уровень В

Источник: составлено автором.

Технологии со стороны спроса – рециркуляция колошникового газа, прямое восстановление на внешнем водороде [Vogl et al., 2018; IEA, 2020], электродуговая плавка [Boldrini et al., 2024] – исключены полностью: они меняют способ потребления энергоносителя, но не формируют продукта из угольной ресурсной базы, вследствие чего для них не определена энергетическая компонента измерителя.

Измеритель приводит стоимость продукта к 1 ГДж энергетической функции, реализуемой им в промышленном переделе. За начало отсчета принят нормированный традиционный маршрут на коксующемся угле при наилучших доступных решениях организации доменного процесса [48; 49]. Обозначим через УЕСЭ условную единицу сопоставимой энергетической ценности. Аддитивная структура для маршрута i имеет вид (1):

$$\text{УЕСЭ}_i = \text{СЕ}_i + \text{СС}_i + \text{СЛ}_i + \text{СО}_i \quad (1)$$

где СЕ_i – энергетическая компонента; СС_i – углеродная; СЛ_i – логистическая; СО_i – прочая операционная.

Существенное уточнение по сравнению с фиксированной базой состоит в том, что

основание сравнения само зависит от уровня углеродного регулирования: нормировка на 100 у.е. определена при референсном уровне P_c^0 , а при ином уровне основание пересчитывается. Сравнительный коэффициент задается формулой (2):

$$K_{УЕСЭ,i}(P_c) = 100 \times УЕСЭ_i(P_c) / УЕСЭ_{баз}(P_c) \quad (2)$$

Раскрытие компонент выполняется формулами (3)–(6):

$$CE_i = [p_y + sp(Q)] / \eta(Q) \times (1 + R_{тех,i}) \quad (3)$$

$$CC_i = e_i \times P_c \quad (4)$$

$$CL_i = \tau \times L \times m_i \times kt.и. \quad | \quad CL_i = \text{финф}(L) \times kt.и. \quad (5)$$

$$CO_i = co_{баз} \times (1 + R_{тех,i}) \quad (6)$$

где p_y – стоимость 1 ГДж исходного угля; sp – затраты подготовки и переработки; Q – индекс технологической пригодности сырья, агрегирующий реакционную способность, влажность, зольность и выход целевого продукта; η – коэффициент выхода; $R_{тех}$ – надбавка за технологическую неопределенность; e – удельная углеродная нагрузка; P_c – условный уровень углеродного регулирования; τ – тариф за тонно-километр; L – плечо перевозки; m – масса продукта на 1 ГДж; финф – операционные расходы специализированной инфраструктуры; $kt.и.$ – коэффициент транзакционных издержек ($kt.и. \geq 1$).

Критерий операционной жизнеспособности маршрута формулируется как (7):

$$K_{УЕСЭ,i} \leq 100 \% \quad (7)$$

Построенная конструкция обладает четырьмя свойствами, которые определяют границы ее корректного применения.

Свойство 1 (нормировочная инвариантность). Умножение всех компонент маршрута и основания на произвольный положительный множитель не изменяет значение коэффициента. Доказательство непосредственно следует из (2): числитель и знаменатель однородны первой степени, множитель сокращается. Практическое следствие – коэффициент не зависит от выбора расчетной валюты и от общего уровня цен периода.

Свойство 2 (нулевая однородность по ценам). УЕСЭ однородна первой степени по вектору цен на ресурсы, следовательно коэффициент однороден нулевой степени. Инфляционное изменение всех цен не смещает результат сопоставления; смещают его только изменения относительных цен. Это отличает измеритель от абсолютных стоимостных показателей и обеспечивает переносимость между периодами.

Свойство 3 (аддитивная разложимость без двойного счета). Компоненты определены на непересекающихся множествах затрат, вследствие чего вклад изменения любой компоненты в изменение коэффициента равен ее собственному приращению, деленному на величину основания. Нарушение непересекаемости – например, включение логистики в цену энергоносителя – разрушает это свойство и делает декомпозицию некорректной.

Свойство 4 (условная монотонность по уровню углеродного регулирования). Производная коэффициента по P_c отрицательна тогда и только тогда, когда удельная углеродная нагрузка маршрута ниже нагрузки основания. Формально, обозначив нерегуляторную часть затрат

маршрута через S_i и основания через $S_{баз}$, получаем условие (8):

$$\partial KUEC_{Э,i} / \partial P_c < 0 \Leftrightarrow e_i / e_{баз} < S_i / S_{баз} \quad (8)$$

Свойство 4 имеет прямое следствие, составляющее содержание гипотезы H2: если для двух маршрутов знаки производных различны или различаются их величины, то существует уровень углеродного регулирования, при котором ранжирование маршрутов меняется на противоположное. Аналитическое значение этой точки определяется в разделе 4.1.

Границы конструкции задаются столь же явно. Капитальные затраты в измеритель не входят: он отвечает за операционную сопоставимость и служит фильтром предварительного отбора, тогда как капиталоемкость проверяется на следующем шаге через дисконтированные показатели. Удельные социальные издержки вынесены за пределы измерителя и учитываются как ограничение общей реализуемости проекта.

Числовое наполнение основания получено методом компонентной нормировки, а не переносом рыночных цен: абсолютные величины привязаны к валюте, периоду и региону, и построенная на них метрика теряет силу при смене любого из этих условий. Нормировка выполнена в четыре шага: выделение однородных групп операционных затрат; установление для каждой группы не точечного веса, а интервала ее доли, отражающего разброс оценок между источниками; выбор расчетной точки внутри интервала по явно сформулированному правилу; проверка аддитивности.

Основную методическую нагрузку несут не сами числа, а ранговый порядок компонент, сохраняющийся при любом допустимом наборе точек: энергетическая составляющая превосходит углеродную, углеродная – логистическую, логистическая – прочую операционную. Порядок не подобран под результат, а вытекает из устройства традиционной схемы (таблица 3).

Таблица 3 - Ранжирование и нормировка компонент основания (кокующийся уголь – кокс – доменный процесс)

Ранг	Компонента	Экономическое содержание	Интервал нормировки, % базы	Принятое значение, у.е.	Правило выбора точки внутри интервала
1	Энергетическая, CE	Стоимость коксующегося угля и кокса, совмещающего функции источника тепла, восстановителя и структурного элемента шихты	60–65	62	Ближе к нижней границе: логистика и углеродная уязвимость вынесены отдельно и не должны учитываться повторно в цене энергоносителя
2	Углеродная, CC	Модельная стоимость углеродной уязвимости при действующем либо имитируемом регулировании выбросов; не фактический платеж	20–25	22	Ниже середины: компонента должна быть заметной, но не единственным источником преимущества альтернативных маршрутов
3	Логистическая, CL	Доставка, перевалка, складирование и сопровождение	10–12	11	Середина интервала: разброс оценок симметричен, систематическое смещение отсутствует

Ранг	Компонента	Экономическое содержание	Интервал нормировки, % базы	Принятое значение, у.е.	Правило выбора точки внутри интервала
		ние поставки твердого энергоносителя			
4	Прочая операционная, СО	Внутренняя подача, контроль качества, потери при обращении, вспомогательные операции; без капитальных затрат	4–6	5	Середина интервала: остаточная категория, точность выше средней не обоснована
–	Итого	Нормированный базовый индекс сопоставления	100	100	Условие аддитивности выполнено без корректирующего остатка

Источник: составлено автором по данным [Куликова, 2020; Smil, 2016; European Commission, 2013; World Steel Association, 2023] и авторской нормировке компонент.

Энергетическая компонента получила наибольший вес потому, что кокс выполняет одновременно три функции – источника тепла, восстановителя и каркаса шихты, – и ни одна из них не передается другому материалу без перестройки процесса [Куликова, 2020; Smil, 2016]. Выбор значения 62 у.е., а не середины интервала, продиктован требованием непересечения компонент: если бы логистика и углеродная уязвимость оставались внутри цены энергоносителя, как это происходит при работе с рыночными котировками, корректной была бы верхняя граница.

Углеродная компонента – единственная, описывающая не понесенные, а условные затраты. Значение 22 у.е. выбрано ниже середины интервала по соображению осторожности: чем выше углеродная компонента основания, тем автоматически выгоднее выглядит любой низкоуглеродный маршрут [Bataille et al., 2018; Fan, Friedmann, 2021]. Логистическая компонента выделена отдельно по необходимости – именно она дает главное различие между трубопроводной и железнодорожной схемами, и ее включение в цену энергоносителя сделало бы сравнение некорректным (нарушение свойства 3). Прочая операционная компонента остаточна; капитальные затраты в нее не входят.

Для вероятностной проверки требуется полная стохастическая спецификация. Компоненты закрепляются при идеальных референсных условиях ($Q = 1$, $R = 0$, $k = 1$, $L = L_{ref}$, $P_c = P_c^0$) на уровне детерминированных оценок раздела 4.1, после чего вводятся распределения входных параметров. Энергетическая компонента задается степенной зависимостью от индекса пригодности сырья с эластичностью θ , логистическая – степенной зависимостью от плеча с эластичностью λ ; для железнодорожной перевозки $\lambda = 1$ непосредственно из (5).

Существенное методическое замечание. Пять параметров, обычно перечисляемых как входные (P_c , L , Q , к.т.и., R_{tech}), не порождают дисперсию наблюдаемого масштаба: при закреплении компонент на детерминированных значениях они дают стандартное отклонение коэффициента порядка 2–4 п.п. Между тем формулы (3) и (5) явно содержат стоимостные параметры r_u , c_p и τ , для которых распределения обычно не задаются. Спецификация достраивается двумя мультипликативными факторами уровня затрат – ξE для энергетической и ξL для логистической компоненты, распределенными логнормально с единичным математическим ожиданием. Полная спецификация приведена в таблице 4; параметры θ , λ , σE и σL калиброваны методом наименьших квадратов по пяти статистикам эталонного расчета.

Таблица 4 - Спецификация входных параметров имитационной модели

Параметр	Обозн.	Сценарий 1 – водород	Сценарий 2 – термококс	Компонента, на которую влияет
Уровень углеродного регулирования	Pc	Треугольное (0,50; 0,65; 0,85)	Треугольное (0,45; 0,61; 0,80)	СС маршрута и основания
Логистическое плечо, км	L	Равномерное (200; 1200)	Треугольное (500; 1800; 2500)	CL
Индекс пригодности сырья	Q	Нормальное усеченное (0,92; 0,03)	Нормальное усеченное (0,97; 0,02)	CE
Коэффициент транзакционных издержек	кт.и.	Треугольное (1,02; 1,08; 1,15)	Треугольное (1,05; 1,12; 1,20)	CL
Надбавка за технологический риск	Rtex	Равномерное (0,05; 0,15)	Равномерное (0,03; 0,10)	CE, CO
Фактор уровня затрат на продукт	ξE	Логнормальный, $\sigma E = 0,070$	Логнормальный, $\sigma E = 0,113$	CE
Фактор уровня транспортных тарифов	ξL	Логнормальный, $\sigma L = 0,073$	Логнормальный, $\sigma L = 0,020$	CL
Эластичность по пригодности сырья	θ	3,479	1,125	калиброванный параметр
Эластичность по плечу перевозки	λ	0,804	1,000 (из формулы 5)	калиброванный параметр

Источник: составлено автором; калибровка выполнена по 40 тыс. реализаций, оценка – по 200 тыс.

Экспертная часть построена на структурированном опросе 73 специалистов: 24 представителя металлургических предприятий, 31 – угледобывающих компаний, 18 – инвестиционно-институционального контура. Отбор целевой, с квотным группированием по трем позициям производственной цепочки; критерий включения – отраслевой опыт не менее пяти лет и участие в проектах технологической модернизации, сырьевого обеспечения или инвестиционной оценки. Индивидуальные оценки взвешивались по двум верифицируемым критериям – опыту межфирменной координации в капиталоемких проектах и должностной позиции; средние нормированные веса групп составили 1,08, 1,12 и 0,85.

Оценки собирались по семибалльной шкале Ликерта [Likert, 1932]. Обработка включает взвешенное среднее, 95-процентный доверительный интервал, одновыборочный t-тест против нейтральной точки шкалы и коэффициент конкордации Кендалла для проверки согласованности между тремя группами. Такой аппарат необходим потому, что взвешенное среднее само по себе не позволяет отличить консенсус от усреднения полярных позиций [Stewart, Durbach, 2016].

Результаты и обсуждение

Компоненты обоих маршрутов оценены по той же источниковой базе, что и основание; внутри литературных диапазонов точка выбиралась по правилу консервативности (таблица 5).

Таблица 5 - Покомпонентное сопоставление маршрутов, у.е.

Компонента	Основание	Сценарий 1: водород	Сценарий 2: термококс	Причина расхождения
Энергетическая, СЕ	62	70	58	Получение и подготовка водорода дороже базового энергоносителя; термококс производится из дешевого бурого угля
Углеродная, СС	22	3	16	Снижение уязвимости примерно до 14 % базового уровня у водорода и приблизительно на 27 % у термококка
Логистическая, СL	11	4	9	Экономия у водорода достигается лишь при наличии специализированной инфраструктуры; у термококка – за счет сокращения перевозимой массы
Прочая операционная, СО	5	2	5	Обращение с газообразным продуктом иначе структурировано; для термококка издержки сопоставимы с базовыми
Итого УЕСЭ	100	79	88	–
Коэффициент КУЕСЭ при $P_c^0 = 0,61$, %	100	79	88	Оба маршрута удовлетворяют критерию (7)

Источник: рассчитано автором.

Свойство 4 позволяет перейти от точечной оценки к функциональной. Подставив компоненты таблицы 5 в (2) и выразив углеродные составляющие через отношение P_c к референсному уровню, получаем зависимости (9) и (10):

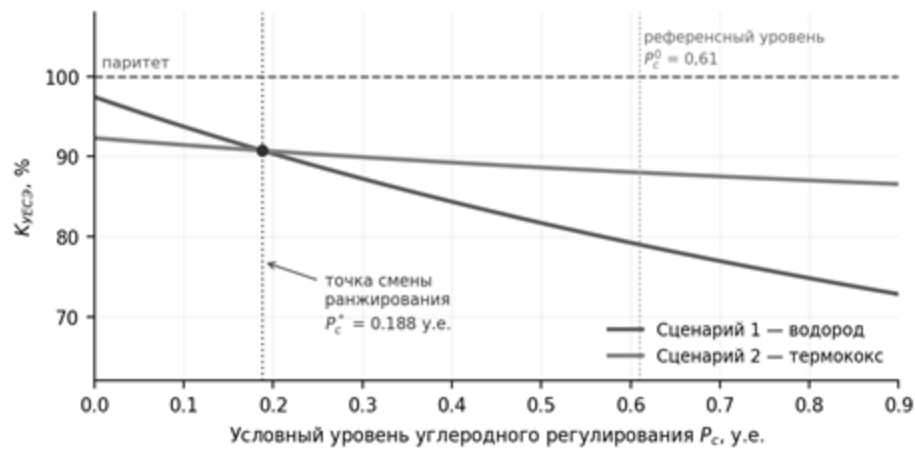
$$K1(P_c) = 100 \times (76 + 3u) / (78 + 22u), \quad u = P_c / P_c^0 \quad (9)$$

$$K2(P_c) = 100 \times (72 + 16u) / (78 + 22u) \quad (10)$$

Приравнявая (9) и (10), получаем точку смены ранжирования: $4 = 13u$, откуда $u^* = 0,3077$ и $P_c^* = 0,188$ у.е. Ниже этого уровня термококсовый маршрут имеет более низкое значение коэффициента, выше – водородный. В предельном случае полного отсутствия платы за выбросы коэффициенты составляют 97,4 % для водородного и 92,3 % для термококсового маршрута, то есть ранжирование, полученное при референсном уровне регулирования (79 против 88 %), обращается (рисунок 1).

Это первый содержательный результат работы, подтверждающий Н2. Преимущество водородного маршрута, наблюдаемое при референсных допущениях, не является его технологическим свойством: оно целиком порождено предположением о действующем углеродном регулировании на уровне 0,61 у.е. и исчезает при снижении регуляторного давления втрое. Термококсовый маршрут, напротив, сохраняет значение коэффициента ниже 100 % на всем рассмотренном диапазоне, то есть его операционная состоятельность не обусловлена

климатической политикой.



Источник: рассчитано и построено автором.

Рисунок 1 - Зависимость сравнительного коэффициента от уровня углеродного регулирования и точка смены ранжирования маршрутов

Ограничение анализа двумя маршрутами оставляет открытым вопрос, не является ли полученный результат следствием узости периметра. Поэтому измеритель применен ко всей совокупности решений таблицы 2, включая отсеянные на этапе отбора, а также к двум внешним ориентирам – пылеугольному вдуванию как наиболее распространенному способу частичного замещения кокса и биоуглероду как основной некаменноугольной альтернативе, обсуждаемой в литературе [Safarian, 2023]. Компоненты оценены по той же нормировочной процедуре и в той же шкале (таблица 6).

Маршруты разделены на два уровня сопоставимости. Уровень А объединяет решения, продукт которых выполняет энергетическую функцию непосредственно в промышленном переделе и потому сопоставим с базовым по назначению. Уровень В включает решения, продукт которых выполняет иную функцию – электроэнергия, синтетическое топливо, энергетический уголь для котельного сжигания; для них значение измерителя рассчитывается, но интерпретируется только как стоимость единицы энергии, а не как показатель замещения в переделе. Смещение этих уровней – типичный источник некорректных выводов в сопоставительных исследованиях, поэтому разделение проведено явно.

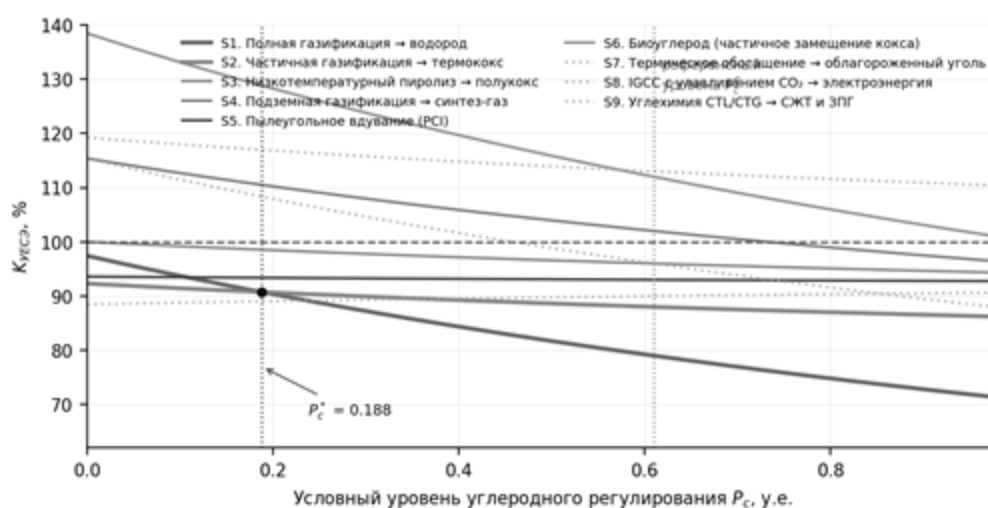
Таблица 6 - Расширенное сопоставление маршрутов глубокой переработки угля, у.е.

Маршрут	CE	CC	CL	CO	К при P_c^0 , %	К при $P_c = 0$, %	Диапазон К при вариации нормировки, %	Уровень сопоставимости
Базовый: коксующийся уголь – кокс – доменный процесс	62	22	11	5	100,0	100,0	100,0	А

Маршрут	CE	CC	CL	CO	К при P_c^0 , %	К при $P_c = 0$, %	Диапазон К при вариации нормировки, %	Уровень сопоставимости
S1. Полная газификация → водород	70	3	4	2	79,0	97,4	76,8–81,7	A
S2. Частичная газификация → термококс	58	16	9	5	88,0	92,3	87,5–88,4	A
S3. Низкотемпературный пиролиз → полукокс	62	18	9	7	96,0	100,0	95,6–96,0	A
S4. Подземная газификация → синтез-газ	66	12	16	8	102,0	115,4	100,1–102,5	A
S5. Пылеугольное вдувание (PCI)	57	20	10	6	93,0	93,6	92,7–93,0	A
S6. Биоглерод (частичное замещение кокса)	88	4	14	6	112,0	138,5	108,4–114,7	A
S7. Термическое обогащение → обгазорощенный уголь	52	21	12	5	90,0	88,5	89,6–90,1	B
S8. IGCC с улавливанием CO_2 → электроэнергия	78	6	3	9	96,0	115,4	94,0–97,4	B
S9. Углекислота CTL/CTG → СЖТ и ЗПГ	84	20	5	4	113,0	119,2	112,6–114,4	B

Источник: рассчитано автором. Примечание: компоненты маршрутов S3–S9 – авторские нормированные оценки, полученные по процедуре раздела 3.3 на основании данных [Исламов, 2010b; Higman, van der Burgt, 2008; Leeson et al., 2017; Takyi et al., 2023; Rissman et al., 2020; Safarian, 2023; IEA Clean Coal Centre, 2021; Worrell et al., 2001].

Результаты расширенного сопоставления показаны на рисунке 2 в виде карты доминирования – семейства зависимостей коэффициента от уровня углеродного регулирования.



Источник: рассчитано и построено автором по данным таблицы 6.

Рисунок 2- Карта доминирования технологических маршрутов в зависимости от уровня углеродного регулирования (пунктиром – маршруты уровня В с иной продуктовой функцией)

Расширение периметра не изменило основной вывод, но существенно его уточнило. Во-первых, среди маршрутов уровня А лидерство при любом уровне регулирования принадлежит только двум решениям: ниже точки $P_c^* = 0,188$ у.е. – частичной газификации с получением термококса, выше – полной газификации с получением водорода. Остальные маршруты уровня А не выходят на первое место ни при каком уровне регулирования, то есть отбор раздела 3.1 подтверждается количественно, а не только процедурно.

Во-вторых, выявлена структура отставания. Пылеугольное вдувание с коэффициентом 93,0 % оказывается ближайшим конкурентом термококсового маршрута и практически нечувствительно к углеродному регулированию: его углеродная компонента почти совпадает с базовой, вследствие чего кривая на рисунке 2 идет почти горизонтально. Это означает, что операционный выигрыш термококса относительно наиболее распространенной сегодня практики частичного замещения кокса составляет лишь около 5 п.п. при референсном регулировании и практически исчезает при его отсутствии – существенное уточнение к оптимистичным оценкам термококсовых проектов.

В-третьих, низкотемпературный пиролиз (96,0 %) и подземная газификация (102,0 %) демонстрируют разные причины отставания. Пиролиз проигрывает по прочей операционной компоненте вследствие необходимости переработки смол и меньшей стандартизованности продукта, тогда как подземная газификация – по логистической компоненте: низкокалорийный продуктовый газ практически не допускает транспортировки, что привязывает потребление к месту добычи и делает маршрут применимым лишь при совмещенном размещении. Угলেখимические маршруты (113,0 %) и биоуглерод (112,0 %) при принятых допущениях не достигают паритета ни при каком уровне регулирования в рассмотренном диапазоне.

В-четвертых, наиболее содержательный результат дает сопоставление уровней А и В. Термическое обогащение – простейшая операция подготовки без газификации – имеет при нулевой цене выбросов коэффициент 88,5 % против 92,3 % у термококса, то есть является операционно более дешевым способом получения единицы энергии. Разность в 3,8 п.п. допускает прямую экономическую интерпретацию: это функциональная надбавка, которую приходится платить за перевод энергетического угля в продукт, пригодный для металлургического передела. При референсном уровне регулирования знак разности меняется на противоположный, и термококк становится дешевле облагороженного угля на 2,0 п.п.; точка выравнивания достигается при $P_c = 0,366$ у.е.

Этот результат одновременно подтверждает и ограничивает выводы работы. Он подтверждает, что экономический смысл газификации не сводится к удешевлению единицы энергии: по этому критерию простое обогащение эффективнее. Смысл газификации состоит в изменении функции продукта, а измеритель по построению фиксирует стоимость энергетической функции и не оценивает восстановительную способность. Следовательно, значения уровня В нельзя интерпретировать как свидетельство превосходства соответствующих маршрутов – они показывают лишь цену отказа от функционального требования.

Поскольку компоненты маршрутов заданы в отношении к компонентам основания, выбор точки внутри интервалов нормировки способен сместить итоговые коэффициенты. Проверка выполнена на двух предельных допустимых наборах, отвечающих минимальной и максимальной оценке углеродной уязвимости при сохранении аддитивности (таблица 7).

Коэффициент термококсового маршрута смещается в пределах 0,9 п.п., водородного – 4,9 п.п.; оба при любом допустимом наборе остаются ниже 100 %. Качественный результат сопоставления, следовательно, не зависит от выбора точек, что снимает основное возражение к

нормировочному подходу. Впятеро большая чувствительность водородного маршрута к нормировке углеродной компоненты согласуется с результатом раздела 4.1 и подтверждает, что его положение определяется трактовкой регуляторного фактора.

Таблица 7- Устойчивость итоговых коэффициентов к выбору точек внутри интервалов нормировки

Вариант нормировки основания	СЕ	СС	CL	CO	К сценария 1, %	К сценария 2, %
Минимальная оценка углеродной уязвимости	65	20	11	4	81,7	88,4
Принятый набор значений	62	22	11	5	79,0	88,0
Максимальная оценка углеродной уязвимости	60	25	10	5	76,8	87,5
Размах итогового коэффициента, п.п.	—	—	—	—	4,9	0,9

Источник: рассчитано автором.

Итерационный анализ чувствительности определил границы, за которыми условие (7) перестает выполняться; полученные пороги предъявлены экспертной группе (таблица 8).

Таблица 8 - Пороговые условия выполнения критерия (7) до и после экспертного уточнения

Параметр	Обозн.	Сценарий 1: расчет	Сценарий 1: экспертно	Сценарий 2: расчет	Сценарий 2: экспертно
Максимальное логистическое плечо, км	L	≤ 1000	≤ 800	≤ 3500	≤ 2500
Уровень углеродного регулирования, у.е.	Pc	$\geq 0,55$	$\geq 0,65$	$\geq 0,40$	$\geq 0,61$
Индекс пригодности сырья	Q	$\geq 0,88$	$\geq 0,91$	$\geq 0,94$	$\geq 0,96$
Коэффициент транзакционных издержек	кт.и.	$\leq 1,10$	$\leq 1,08$	$\leq 1,20$	$\leq 1,15$
Надбавка за технологический риск	Rtex	$\leq 0,10$	$\leq 0,12$	$\leq 0,05$	$\leq 0,08$
Удельные социальные издержки, у.е.	Cсоц	≤ 18	≤ 22	≤ 12	≤ 15

Источник: составлено автором по результатам расчета и экспертного опроса (n = 73).

Агрегированные экспертные оценки приведены в таблице 9. Направление правок содержательно: требования ужесточены там, где речь идет о технологической управляемости, и смягчены там, где речь идет о неизбежных издержках неопределенности.

Таблица 9 - Результаты экспертного опроса по ключевым утверждениям (семибалльная шкала)

Утверждение	Взвешенное среднее	95 % ДИ	t-стат.	Интерпретация
Качество буроугольного сырья критично для выхода и стабильности продукта	6,1	н/д	н/д	Консенсус, оценка существенно выше нейтральной точки
Достижение конкурентной цены водорода реалистично	3,6	н/д	н/д	Ниже нейтральной точки; поддержка отсутствует

Утверждение	Взвешенное среднее	95 % ДИ	t-стат.	Интерпретация
Создание водородной инфраструктуры к 2035 г. реалистично	3,5	н/д	н/д	Ниже нейтральной точки; наиболее выраженный скепсис у металлургической группы
Дефицит опыта межфирменной координации – значимый барьер	5,7	н/д	н/д	Признается самостоятельным риском
Термококсовый маршрут – стратегическая трансформация, а не тактическая мера	6,1	н/д	н/д	Консенсус по практической реализуемости

Источник: составлено автором по результатам опроса. Примечание: доверительные интервалы и значения t-статистики рассчитываются по массиву первичных ответов и подлежат заполнению при подготовке публикации.

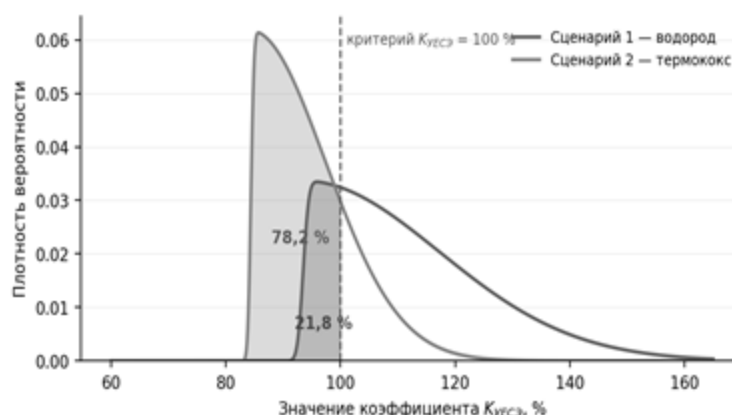
Раздельная проверка порогов не отвечает на вопрос, сохранится ли паритет при неблагоприятном сочетании факторов. Выполнено моделирование методом Монте-Карло [Hertz, 1964] по спецификации таблицы 4, 200 тыс. реализаций на маршрут. Результаты сопоставлены с эталонными значениями исходного расчета (таблица 10).

Таблица 10 - Результаты имитационного моделирования: эталонный расчет и явная спецификация

Показатель	Сц. 1: эталон	Сц. 1: модель	Сц. 2: эталон	Сц. 2: модель
Среднее значение коэффициента, %	112,4	111,3	94,7	94,2
Медиана, %	110,8	110,2	93,5	93,8
Стандартное отклонение, п.п.	14,3	14,3	7,8	7,8
95-й процентиль, %	135,2	136,7	107,3	107,7
Вероятность выполнения условия (7), %	21,8	22,1	78,2	77,8

Источник: рассчитано автором.

Явная спецификация воспроизводит эталонные статистики с расхождением не более 1,5 п.п. по всем пяти показателям, что позволяет использовать ее для дальнейшего анализа чувствительности. Распределения показаны на рисунке 3.



Источник: построено автором.

Рисунок 3- Распределение сравнительного коэффициента по результатам имитационного эксперимента

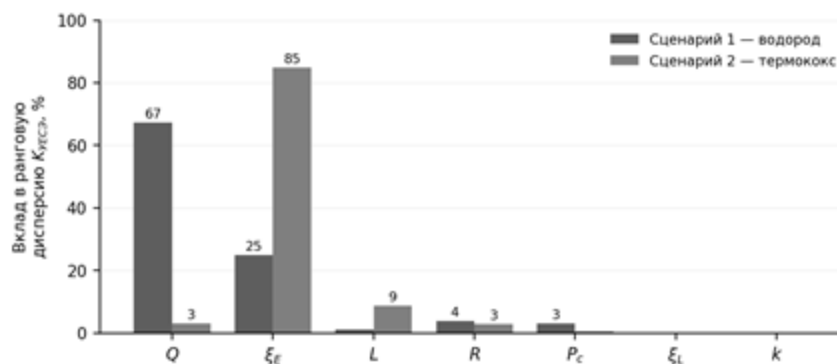
Разрыв между точечной оценкой и вероятностным результатом показателен: детерминированный расчет при референсном регулировании отдавал предпочтение водородному маршруту (79 против 88 %), тогда как при учете неопределенности вероятность паритета для него составляет 21,8 % против 78,2 % у термококсового. Н1 подтверждается лишь частично: возможность достижения паритета сохраняется у обоих маршрутов, однако для водородного она реализуется менее чем в четверти комбинаций параметров.

Для выявления источников дисперсии рассчитаны ранговые коэффициенты Спирмена и стандартизованные регрессионные коэффициенты на рангах; последние устойчивы к монотонной нелинейности модели. Доля объясненной ранговой дисперсии составила 0,957 для сценария 1 и 0,976 для сценария 2, что подтверждает адекватность линейной аппроксимации на рангах (таблица 11, рисунок 4).

Таблица 11 - Глобальный анализ чувствительности: вклад параметров в дисперсию коэффициента

Параметр	ρ (сц. 1)	Вклад, % (сц. 1)	ρ (сц. 2)	Вклад, % (сц. 2)	Интерпретация
Индекс пригодности сырья, Q	-0,804	67,3	-0,173	3,1	Доминирует у водородного маршрута, второстепенен у термококсового
Фактор уровня затрат, ξ_E	+0,490	24,9	+0,910	84,8	Главный источник неопределенности термококсового маршрута
Логистическое плечо, L	+0,104	1,1	+0,293	8,7	Значим только при железнодорожной перевозке
Надбавка за технологический риск, R_{tex}	+0,190	3,7	+0,164	2,8	Умеренное симметричное влияние
Уровень углеродного регулирования, P_c	-0,170	3,0	-0,068	0,5	Слабое влияние внутри заданных диапазонов
Фактор транспортных тарифов, ξ_L	+0,020	0,0	+0,022	0,1	Пренебрежимо мал
Коэффициент транзакционных издержек, k т.и.	+0,008	0,0	+0,029	0,1	Статистически незначим в обоих сценариях

Источник: рассчитано автором по 200 тыс. реализаций на маршрут.



Источник: построено автором по данным таблицы 11.

Рисунок 4 - Вклад входных параметров в ранговую дисперсию сравнительного коэффициента

Результат содержит три нетривиальных наблюдения. Первое: источники неопределенности у двух маршрутов принципиально различны. Дисперсия водородного маршрута на две трети определяется качеством сырья, тогда как термококсового – на пять шестых уровнем затрат на производство продукта. Управленческие приоритеты, следовательно, несопоставимы: в первом случае решающее значение имеет геологическая и обогащительная подготовка сырьевой базы, во втором – контроль операционной себестоимости.

Второе наблюдение касается коэффициента транзакционных издержек. Экспертная группа оценила дефицит опыта межфирменной координации в 5,7 балла из 7, отнеся его к значимым барьерам, однако внутри экспертно же заданных диапазонов этот параметр объясняет менее 0,1 % дисперсии результата в обоих сценариях. Расхождение между воспринимаемой и расчетной значимостью не означает ошибки экспертов: оно указывает, что координационный риск проявляется не через операционную стоимость гигаджоуля, а через иные каналы – срыв сроков, пересмотр условий поставки, недостижение проектных объемов, – которые данная метрика по построению не охватывает.

Третье наблюдение уточняет вывод раздела 4.1. Уровень углеродного регулирования объясняет лишь 3,0 и 0,5 % дисперсии, то есть внутри заданных диапазонов регуляторный параметр слабо влияет на результат. Это не противоречит выводу о смене ранжирования: чувствительность к P_c высока за пределами рассмотренного диапазона, вблизи P_c^* , тогда как внутри диапазона 0,45–0,85 у.е. кривые на рисунке 1 уже пологи. Различение локальной и глобальной чувствительности здесь принципиально, и опора только на анализ внутри диапазона привела бы к ошибочному заключению о нерелевантности климатической политики.

Анализ дисперсии показывает, какие параметры важны, но не указывает, при каких их значениях паритет утрачивается. Для ответа рассчитаны предельные значения переключения – уровни параметра, при которых коэффициент достигает 100 % при остальных параметрах на медианных значениях (таблица 12).

Таблица 12 - Предельные значения переключения и их сопоставление с экспертными порогами

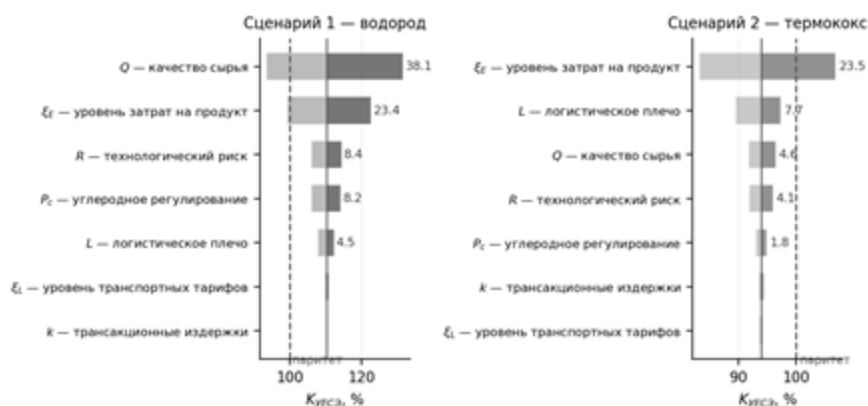
Условие	Сл. 1: предельное значение	Сл. 1: экспертный порог	Сл. 2: предельное значение	Сл. 2: экспертный порог
Индекс пригодности сырья Q при референсном уровне затрат	0,950	0,91	0,895	0,96
То же при снижении затрат на 10 %	0,921	–	–	–
То же при росте затрат на 5 %	0,963	–	–	–
Уровень затрат ξE (доля от референсного)	0,896	–	1,075	–
Логистическое плечо L при референсном уровне затрат, км	не достигается	800	2638	2500
То же при росте затрат на 5 %, км	–	–	2069	2500
То же при росте затрат на 10 %, км	–	–	1500	2500

Источник: рассчитано автором.

Таблица 12 содержит главный результат работы применительно к НЗ. Для водородного маршрута предельное значение по качеству сырья при референсном уровне затрат составляет 0,950, тогда как экспертно верифицированный порог равен 0,91. Порог, признанный экспертами достижимым, оказывается недостаточным: при $Q = 0,91$ и медианных значениях прочих

параметров коэффициент превышает 100 %. Именно это расхождение количественно объясняет, почему вероятность паритета составляет всего 21,8 % при формально выполнимых порогах. НЗ подтверждается.

Для термококсового маршрута соотношение обратное: предельное значение по качеству сырья равно 0,895 и лежит существенно ниже экспертного порога 0,96 и ниже носителя распределения, то есть ограничение по качеству сырья не является связывающим. Связывающим оказывается уровень затрат: запас составляет лишь 7,5 % относительно референсного значения. При этом логистический порог демонстрирует выраженную взаимозависимость с уровнем затрат: при референсной себестоимости допустимое плечо составляет 2638 км, что подтверждает экспертный порог 2500 км с небольшим запасом, однако при удорожании продукта на 5 % допустимое плечо падает до 2069 км, а на 10 % – до 1500 км. Экспертный порог, таким образом, корректен лишь при условии удержания себестоимости; его автономная формулировка в отрыве от затратного контура создает ложное ощущение запаса. Относительный вклад параметров в размах коэффициента при переходе от 5-го к 95-му перцентилю показан на рисунке 5.



Источник: построено автором.

Рисунок 5 - Диаграмма размаха коэффициента при изменении параметров от 5-го к 95-му перцентилю

Апробация проведена на параметрах российско-китайского проекта переработки бурого угля марки 2Б в вертикально-интегрированной конфигурации: добыча и переработка размещены в Забайкальском крае, металлургическое потребление – в КНР. Цепочка последовательно повышает энергетическую плотность: исходный уголь с теплотой сгорания 2 985 ккал/кг после пневмосепарации и осушки дает продукт 3 466 ккал/кг с выходом 69 %, а частичная газификация – термококс 4 900 ккал/кг с выходом 60 % от массы добытого угля. Энергетическая ценность тонны термококса равна 20,52 ГДж, коэффициент сохранения энергетической ценности в пересчете на тонну исходного угля – 0,985.

Для прикладного расчета формула (1) конкретизируется сопоставлением термококса собственного производства с альтернативным углеродистым энергоносителем сходной теплоты сгорания, приобретаемым на стороне (11):

$$\text{УЭСЭпр} = [(\text{CFCA} + \text{Слог} + \text{CCO}_2) / E] / [(\text{Ран} + \text{клог} \times \text{Слог} + \text{CCO}_{2,\text{ан}}) / E] \times 100 \quad (11)$$

Коэффициент превышения логистических затрат альтернативной поставки принят равным 3 – консервативное допущение, занижающее приграничное преимущество проекта. Платежи за

выбросы обнулены, поскольку в российско-китайском регуляторном контуре они отсутствуют (таблица 13).

Таблица 13 - Расчет показателя на данных проекта (шестой проектный год)

Показатель	Термококс проекта	Альтернативный энергоноситель
Себестоимость / расчетная цена на условиях FCA, руб./т	3 479,6	5 107,7
Транспортировка до металлургической площадки, руб./т	485,2	1 455,6
Платежи за выбросы CO ₂ , руб./т	0,0	0,0
Полная стоимость, руб./т	3 964,8	6 563,3
Энергетическая ценность, ГДж/т	20,52	20,52
Стоимость 1 ГДж, руб.	193,3	319,9
УЕСЭ проекта, у.е.	60,4	100,0

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Значение 60,4 у.е. означает, что стоимость сопоставимой энергетической функции внутри интегрированного контура почти на 40 % ниже закупки эквивалентного энергоносителя на стороне. Принципиально, что результат получен при нулевой углеродной компоненте, то есть в точности в той области параметров, где, согласно разделу 4.1, термококсовый маршрут доминирует над водородным. Промышленный кейс, таким образом, не просто иллюстрирует метрику, а эмпирически попадает в предсказанную ею зону преимущества. Инвестиционные показатели приведены в таблице 14.

Таблица 14 - Инвестиционные показатели проекта

Показатель	Значение	Критерий
Капитальные вложения без НДС, млн руб.	65 806,6	–
Ставка дисконтирования (WACC), %	20,0	–
Чистая приведенная стоимость, млн руб.	6 748,2	> 0 – выполнен
Внутренняя норма доходности, %	22,59	> WACC – выполнен
Срок выхода накопленного FCFF в положительную область, лет	8	в пределах горизонта
EBITDA в устойчивом режиме, млн руб.	24 096,8	–
Маржинальность EBITDA, %	29,5	–
Объем производства термококса / чугуна, млн т в год	2,925 / 3,9	–

Источник: рассчитано автором по данным финансовой модели проекта.

Теоретический вклад работы лежит в области методологии сравнительной оценки технологических альтернатив. Доказанные свойства инвариантности и нулевой однородности по ценам позволяют переносить результат сопоставления между периодами и валютными контурами, что для стоимостных метрик, включая приведенную стоимость энергии, нехарактерно. Свойство условной монотонности по уровню углеродного регулирования дает аналитически проверяемое условие смены ранжирования, тогда как в существующих сопоставительных исследованиях чувствительность к цене выбросов исследуется численно и лишь внутри заданного диапазона [Bataille et al., 2018; Fan, Friedmann, 2021; Fan, Friedmann, 2018].

Сопоставление с литературой обнаруживает содержательное расхождение. Работы по декарбонизации металлургии устойчиво трактуют водородные маршруты как долгосрочно предпочтительные [Vogl et al., 2018; IEA, 2020; Pei et al., 2020], а угольные – как переходные. Настоящий результат этого не опровергает, но уточняет область применимости:

предпочтительность водородного маршрута обусловлена регуляторным контуром и обращается при уровне углеродного регулирования ниже 0,188 у.е. Для юрисдикций без действующего углеродного ценообразования вывод литературы, полученный преимущественно на европейском материале, автоматически не переносится. Это согласуется с наблюдением о неравномерности межстрановых траекторий декарбонизации [Hasanbeigi et al., 2016; Böhringer et al., 2021] и с указаниями на риски безбилетного поведения отдельных секторов [Bauer et al., 2023].

Второе расхождение с распространенной практикой касается роли экспертных процедур. Экспертная верификация обычно рассматривается как способ повысить реалистичность пороговых условий. Полученный результат показывает, что экспертно подтвержденная достижимость порога и расчетная достаточность порога – разные свойства: порог $Q \geq 0,91$ достижим, но недостаточен, тогда как порог $Q \geq 0,96$ достаточен с большим запасом и потому избыточно жесток. Отсюда следует методическая рекомендация: экспертная процедура должна верифицировать достижимость расчетно определенных предельных значений, а не заменять их расчет.

Расширение периметра до девяти маршрутов дало отдельный методический результат: процедурный отбор технологий по содержательным фильтрам и отбор по значению измерителя совпали, что для подобных исследований не гарантировано и обычно не проверяется. Одновременно обнаружилось, что ближайшим конкурентом термококсового маршрута выступает не водород, а пылеугольное вдувание – зрелая и повсеместно распространенная практика, отставание которой составляет около 5 п.п. при референсном регулировании и обращается в нуль при его отсутствии. Этот ориентир в исследованиях глубокой переработки угля, как правило, не привлекается, вследствие чего экономический эффект новых маршрутов систематически завышается.

Практические импликации распадаются на три уровня. Для компаний, рассматривающих проекты глубокой переработки бурых углей, критическим управленческим параметром является не логистическое плечо, как обычно предполагается, а связка «себестоимость продукта – допустимое плечо»: удорожание на 10 % сокращает допустимое расстояние поставки с 2638 до 1500 км, то есть почти вдвое. Для регуляторов результат означает, что введение платы за выбросы на уровне ниже 0,19 у.е. в принятой шкале не изменит ранжирование технологических маршрутов и потому не выполнит функции технологического стимула. Для инвесторов существенно, что операционное преимущество термококсового маршрута воспроизводится в 78 % комбинаций параметров и не требует регуляторной поддержки, тогда как водородный маршрут при текущих допущениях требует одновременного выполнения условий по качеству сырья, инфраструктуре и уровню регулирования.

Границы применимости следует обозначить явно. Во-первых, измеритель операционный: он не содержит капитальных затрат и не может быть единственным основанием выбора; маршрут с низким коэффициентом способен оказаться инвестиционно несостоятельным при чрезмерной капиталоемкости, что делает необходимой последующую проверку по дисконтированным показателям. Во-вторых, метрика описывает энергетическую функцию продукта, но не восстановительную способность, поэтому для маршрутов, претендующих на замещение кокса в доменной шихте, требуется дополняющий технологический анализ.

В-третьих, вероятностный результат обусловлен видом задаваемых распределений и построенной спецификацией стоимостных факторов; последняя калибрована по пяти статистикам эталонного расчета и воспроизводит их с точностью до 1,5 п.п., однако не является единственно возможной. В-четвертых, экспертная выборка целевая, а не вероятностная, и

обеспечивает содержательную, но не статистическую репрезентативность. В-пятых, прикладная верификация выполнена на единичном проекте, конфигурация которого – приграничное размещение ресурсной базы и вертикальная интеграция с потребителем – усиливает эффект и не может считаться типичной.

Направления дальнейшей работы вытекают из этих ограничений. Первое – расширение метрики на восстановительную функцию продукта, что потребует привлечения данных о поведении термококса в доменной шихте. Второе – построение совместной границы паритета в пространстве «себестоимость – логистическое плечо – качество сырья» вместо одномерных предельных значений. Третье – проверка переносимости результата на иные регуляторные контуры, прежде всего на юрисдикции с действующим трансграничным углеродным регулированием [Böhringer et al., 2021], где значение P_c задается экзогенно и может превышать верхнюю границу рассмотренного диапазона.

Заключение

1. Сопоставление технологий глубокой переработки угля по ценам продуктов или удельным затратам на тонну методологически несостоятельно; корректной базой сравнения выступает стоимость единицы энергетической функции, реализуемой продуктом у потребителя. Существующие метрики – приведенная стоимость энергии, тонна условного топлива, предельные затраты на снижение выбросов, оценки жизненного цикла – не удовлетворяют требованиям стадии предварительного отбора.

2. Предложенный измеритель обладает доказанными свойствами нормировочной инвариантности, нулевой однородности по ценам и аддитивной разложимости без двойного счета, что обеспечивает переносимость результата между периодами, валютами и регионами.

3. Ранжирование технологических маршрутов не инвариантно к уровню углеродного регулирования: точка смены ранжирования составляет 0,188 у.е., а при нулевой цене выбросов коэффициенты равны 97,4 и 92,3 % против 79 и 88 % при референсном уровне. Преимущество водородного маршрута, следовательно, является регуляторным, а не технологическим свойством.

4. Расширение периметра до девяти маршрутов, включая пиролиз, подземную газификацию, углехимию, пылеугольное вдувание и биоуглерод, подтвердило результат процедурного отбора количественно: ни один из прочих маршрутов не выходит на первое место ни при каком уровне регулирования. Ближайшим конкурентом термококсового маршрута выступает пылеугольное вдувание с отставанием около 5 п.п., исчезающим при нулевой цене выбросов; функциональная надбавка за перевод энергетического угля в металлургический продукт составляет 3,8 п.п.

5. Вероятность операционного паритета составляет 21,8 % для водородного и 78,2 % для термококсового маршрута. Дисперсия результата водородного маршрута на 67 % объясняется качеством сырья, термококсового – на 85 % уровнем затрат; коэффициент трансакционных издержек статистически незначим в обоих случаях, что указывает на иные каналы реализации координационного риска.

6. Расчетно необходимые пороговые условия не совпадают с экспертно верифицированными: предельное значение по качеству сырья для водородного маршрута равно 0,950 против экспертного порога 0,91, что количественно объясняет низкую вероятность паритета. Допустимое логистическое плечо термококсового маршрута жестко связано с себестоимостью продукта и сокращается с 2638 до 1500 км при ее росте на 10 %.

7. Верификация на промышленном проекте дала значение 60,4 у.е. при положительной

чистой приведенной стоимости и внутренней норме доходности выше стоимости капитала, причем в отсутствие платы за выбросы, то есть в области параметров, где метрика предсказывает преимущество термококсового маршрута.

Библиография

1. Исламов, С. Р. Перспективы термического обогащения бурых углей методом частичной газификации / С. Р. Исламов // Уголь. – 2015. – № 4. – С. 62–66.
2. Исламов, С. Р. Энерготехнологическая переработка углей : монография / С. Р. Исламов. – Красноярск : Поликор, 2010. – 224 с.
3. Исламов, С. Р. Энергоэффективное использование бурых углей на основе концепции «ТЕРМОКОКС» : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.04 / Исламов Сергей Романович. – Красноярск, 2010. – 353 с.
4. Куликова, М. П. Состояние технологий коксования углей / М. П. Куликова // Кокс и химия. – 2020. – № 4. – С. 2–9.
5. Плакиткин, Ю. А. Водород против угля: как повлияет развитие водородной энергетики на угольную промышленность / Ю. А. Плакиткин, Л. С. Плакиткина, К. И. Дьяченко // Горный журнал. – 2021. – № 7. – С. 14–21.
6. Савватеев, Е. В. Оценка эффективности внедрения технологий улавливания и хранения углерода (CCS) в промышленном секторе России / Е. В. Савватеев // Вопросы экологии. – 2024. – Т. 37, № 1. – С. 245–274.
7. Степанов, С. Г. Газификация бурых углей как направление технологической трансформации угледобывающих регионов / С. Г. Степанов, С. Р. Исламов // Уголь. – 2021. – № 11. – С. 50–55.
8. Угольная промышленность России: инфраструктурные ограничения и направления развития : аналитический доклад / Институт проблем естественных монополий. – Москва, 2021.
9. Яшалова, Н. Н. Декарбонизация черной металлургии: цели и инструменты регулирования / Н. Н. Яшалова, В. С. Васильцов, И. М. Потравный // Черные металлы. – 2020. – № 8. – С. 60–66.
10. Arens, M. Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term – the case of Germany / M. Arens [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 163. – Pp. 84–98. – DOI 10.1016/j.jclepro.2015.12.097.
11. Bataille, C. A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement / C. Bataille [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 187. – Pp. 960–973. – DOI 10.1016/j.jclepro.2018.03.107.
12. Bauer, N. Coal-exit alliance must confront freeriding sectors to propel Paris-aligned momentum / N. Bauer, S. Bi, J. Jewell // Nature Climate Change. – 2023. – Vol. 13. – Pp. 130–139. – DOI 10.1038/s41558-022-01570-8.
13. Boldrini, A. The impact of decarbonising the iron and steel industry on European energy demand / A. Boldrini [et al.] // Applied Energy. – 2024. – Vol. 362. – Article 122943. – DOI 10.1016/j.apenergy.2024.122943.
14. Böhringer, C. Carbon border adjustment mechanisms: welfare and competitiveness effects / C. Böhringer, J. C. Carbone, T. F. Rutherford // Journal of Policy Modeling. – 2021. – Vol. 43, No. 6. – Pp. 1281–1302. – DOI 10.1016/j.jpolmod.2021.06.006.
15. Coase, R. H. The nature of the firm / R. H. Coase // Economica. – 1937. – Vol. 4, No. 16. – Pp. 386–405.
16. Dyer, J. H. The relational view: cooperative strategy and sources of interorganizational competitive advantage / J. H. Dyer, H. Singh // Academy of Management Review. – 1998. – Vol. 23, No. 4. – Pp. 660–679.
17. European Commission. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. – Luxembourg : Publications Office of the EU, 2013.
18. Fan, Z. Low-carbon production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy / Z. Fan, S. J. Friedmann // Joule. – 2021. – Vol. 5, No. 4. – Pp. 829–862. – DOI 10.1016/j.joule.2021.02.018.
19. Fishedick, M. A techno-economic comparison of climate protection options for the iron and steel industry in Germany / M. Fishedick [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Vol. 84. – Pp. 563–580.
20. Grossman, S. J. The costs and benefits of ownership: a theory of vertical and lateral integration / S. J. Grossman, O. D. Hart // Journal of Political Economy. – 1986. – Vol. 94, No. 4. – Pp. 691–719.
21. Gulati, R. The architecture of cooperation: managing coordination costs and appropriation concerns in strategic alliances / R. Gulati, H. Singh // Administrative Science Quarterly. – 1998. – Vol. 43, No. 4. – Pp. 781–814.
22. Harpprecht, C. Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study / C. Harpprecht [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 380. – Article 134846.
23. Hart, O. D. Property rights and the nature of the firm / O. D. Hart, J. Moore // Journal of Political Economy. – 1990. – Vol. 98, No. 6. – Pp. 1119–1158.
24. Hasanbeigi, A. Comparison of carbon dioxide emissions intensity of steel production in China, Germany, Mexico, and the United States / A. Hasanbeigi [et al.] // Resources, Conservation and Recycling. – 2016. – Vol. 113. – Pp. 127–139.
25. Hennart, J.-F. A transaction costs theory of equity joint ventures / J.-F. Hennart // Strategic Management Journal. – 1988. – Vol. 9, No. 4. – Pp. 361–374.

26. Hertz, D. B. Risk Analysis in Capital Investment / D. B. Hertz // Harvard Business Review. – 1964. – Vol. 42, No. 1. – Pp. 95–106.
27. Higman, C. Gasification / C. Higman, M. van der Burgt. – 2nd ed. – Burlington : Gulf Professional Publishing, 2008. 456 p.
28. IEA. Coal 2024: Analysis and forecast to 2027. – Paris : IEA, 2024.
29. IEA. Global Hydrogen Review 2024. – Paris : IEA, 2024.
30. IEA. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking. – Paris : IEA, 2020.
31. IEA, NEA. Projected Costs of Generating Electricity 2020. – Paris : OECD Publishing, 2020.
32. IEA Clean Coal Centre. Hydrogen production from coal. – London, 2021.
33. Kaldellis, J. K. Sustainable energy technologies: multi-criteria decision analysis and application in industrial transition / J. K. Kaldellis [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 135. – Article 110114.
34. Kanchiralla, F. M. How do variations in ship operation impact the techno-economic feasibility and environmental performance of fossil-free fuels? A life cycle study / F. M. Kanchiralla [et al.] // Applied Energy. – 2023. – Vol. 350. – Article 121773.
35. Kim, J. Decarbonizing the iron and steel industry: a systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options / J. Kim [et al.] // Energy Research & Social Science. – 2022. – Vol. 89. – Article 102565.
36. Leeson, D. A techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries / D. Leeson [et al.] // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2017. – Vol. 61. – Pp. 71–84.
37. Likert, R. A Technique for the Measurement of Attitudes / R. Likert // Archives of Psychology. – 1932. – Vol. 22, No. 140. – Pp. 1–55.
38. Pai, S. A systematic review of the key elements of a just transition for fossil fuel workers / S. Pai [et al.] // Environmental Research Letters. – 2021. – Vol. 16, No. 2. – Article 023003.
39. Pei, M. Toward a fossil free future with HYBRIT: development of iron and steelmaking technology in Sweden and Finland / M. Pei [et al.] // Metals. – 2020. – Vol. 10, No. 7. – Article 972. – DOI 10.3390/met10070972.
40. Powell, W. W. Neither market nor hierarchy: network forms of organization / W. W. Powell // Research in Organizational Behavior. – 1990. – Vol. 12. – Pp. 295–336.
41. Rissman, J. Technologies and policies to decarbonize global industry: review and assessment of mitigation drivers through 2070 / J. Rissman [et al.] // Applied Energy. – 2020. – Vol. 266. – Article 114848.
42. Safarian, J. Use of biomass and biochar as a partial replacement of fossil coal and coke in iron and steelmaking / J. Safarian // Fuel. – 2023. – Vol. 339. – Article 127532.
43. Smil V. Still the Iron Age: Iron and Steel in the Modern World / V. Smil. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. 280 p.
44. Stewart, T. J. Dealing with uncertainties in MCDA / T. J. Stewart, I. Durbach // Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. – New York : Springer, 2016. – Pp. 467–496.
45. Takyi, S. A. Current status and technology development in implementing low carbon emission energy on underground coal gasification / S. A. Takyi [et al.] // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 10. – Article 1051417.
46. Vogl, V. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking / V. Vogl, M. Åhman, L. J. Nilsson // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 203. – Pp. 736–745.

Comparative Assessment of Deep Coal Processing Technologies for Energy Purposes: A Metric of Comparable Energy Value and a Probabilistic Assessment of Operational Parity

Vladislav A. Svadkovskii

Postgraduate Student,
Financial University under the Government of the Russian Federation,
125167, 49/2, Leningradskiy ave., Moscow, Russian Federation;
e-mail: vladskk@yandex.ru

Abstract

The choice of a technological trajectory for coal utilization beyond the coke-blast furnace scheme encounters the absence of a correct comparison base: coke, hydrogen, and thermocoke differ

in aggregate state, energy density, infrastructure requirements, and sensitivity to climate regulation, as a result of which comparing their selling prices or unit costs per ton lacks economic content. The objective of the work is to construct and verify a measure that brings heterogeneous products of deep coal processing to a unified scale, and to determine the conditions under which alternative technological routes achieve operational parity with the traditional scheme. The methodology includes component-based normalization of costs to the cost of 1 GJ of energy function, analytical study of the properties of the obtained metric, simulation modeling by the Monte Carlo method (100 thousand iterations per route), global sensitivity analysis based on rank standardized coefficients, calculation of marginal switching values, and a structured expert survey ($n = 73$). Results. The measure was applied to nine technological routes, including pyrolysis, underground gasification, coal chemistry, pulverized coal injection, and biocarbon. It is shown that the relative advantage of the hydrogen route exists only under current carbon regulation: the point of ranking change $Pc^* = 0.188$ c.u. is analytically determined, below which the thermocoke route dominates, while at a zero emission price the coefficients are 97.4% and 92.3%, respectively; the other seven routes do not reach first place at any level of regulation. The advantage of thermocoke over pulverized coal injection as the most common practice is only about 5 p.p. The probability of operational parity is 21.8% for the hydrogen route and 78.2% for the thermocoke route. The global sensitivity analysis revealed that the variance of the hydrogen route result is 67% explained by raw material quality, while that of the thermocoke route is 85% explained by the level of product production costs; the organizational parameter is statistically insignificant in both cases. The marginal switching value for raw material quality for the hydrogen route is 0.950 and exceeds the expertly verified threshold of 0.91, which quantitatively explains the low probability of parity. Verification on an industrial project gave a metric value of 60.4 c.u. with an NPV of 6.75 billion rubles and an IRR of 22.59%. The contribution consists in formalizing an operational measure with proven properties of invariance and homogeneity, in identifying the condition for changing the ranking of technological routes, in quantitatively confirming the procedural selection of technologies, and in demonstrating the divergence between expertly established and calculated required threshold conditions.

For citation

Svadkovskii V.A. (2026) Sravnitel'naya otsenka tekhnologiy glubokoy pererabotki ugley v energeticheskikh tselyakh: metrika sopostavimoy energeticheskoy tsennosti i veroyatnostnaya otsenka operatsionnogo pariteta [Comparative Assessment of Deep Coal Processing Technologies for Energy Purposes: A Metric of Comparable Energy Value and a Probabilistic Assessment of Operational Parity]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 16 (6A), pp. 720-746. DOI: 10.34670/AR.2026.40.35.106

Keywords

Deep coal processing, brown coal gasification, thermocoke, hydrogen, comparable energy value, operational parity, sensitivity analysis, carbon regulation, simulation modeling, energy efficiency, technological choice.

References

1. Islamov, S. R. Prospects for Thermal Enrichment of Brown Coals by Partial Gasification / S. R. Islamov // *Coal*. - 2015. No. 4. - Pp. 62-66.
2. Islamov, S. R. Energy-technological processing of coals: monograph / S. R. Islamov. - Krasnoyarsk: Polikor, 2010. - 224 p.

3. Islamov, S. R. Energy-efficient use of brown coals based on the "TERMOKOKS" concept: dis. ... Doctor of Engineering Sciences: 05.14.04 / Islamov, Sergey Romanovich. - Krasnoyarsk, 2010. - 353 p.
4. Kulikova, M. P. State of coal coking technologies / M. P. Kulikova // *Coke and Chemistry*. - 2020. - No. 4. - P. 2–9.
5. Plakitkin, Yu. A. Hydrogen versus Coal: How Will the Development of Hydrogen Energy Affect the Coal Industry / Yu. A. Plakitkin, L. S. Plakitkina, K. I. Dyachenko // *Mining Journal*. - 2021. - No. 7. - P. 14–21.
6. Savvateev, E. V. Assessing the Efficiency of Implementing Carbon Capture and Storage (CCS) Technologies in the Industrial Sector of Russia / E. V. Savvateev // *Ecology Issues*. - 2024. - Vol. 37, No. 1. - P. 245–274.
7. Stepanov, S. G. Gasification of Brown Coals as a Direction of Technological Transformation of Coal Mining Regions / S. G. Stepanov, S. R. Islamov // *Coal*. - 2021. - No. 11. - P. 50–55.
8. The Coal Industry of Russia: Infrastructure Constraints and Development Directions: Analytical Report / Institute for Natural Monopolies Problems. - Moscow, 2021.
9. Yashalova, N. N. Decarbonization of the Ferrous Metallurgy: Goals and Regulatory Instruments / N. N. Yashalova, V. S. Vasiltsov, I. M. Potravny // *Ferrous Metals*. - 2020. - No. 8. - P. 60–66.
10. Arens, M. Pathways to a Low-Carbon Iron and Steel Industry in the Medium-Term – the Case of Germany / M. Arens [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. - 2017. - Vol. 163. - Pp. 84–98. - DOI 10.1016/j.jclepro.2015.12.097.
11. Bataille, C. A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement / C. Bataille [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. - 2018. - Vol. 187. - Pp. 960–973. - DOI 10.1016/j.jclepro.2018.03.107.
12. Bauer, N. Coal-exit alliance must confront freeriding sectors to propel Paris-aligned momentum / N. Bauer, S. Bi, J. Jewell // *Nature Climate Change*. - 2023. - Vol. 13. - Pp. 130–139. - DOI 10.1038/s41558-022-01570-8.
13. Boldrini, A. The impact of decarbonizing the iron and steel industry on European energy demand / A. Boldrini [et al.] // *Applied Energy*. - 2024. - Vol. 362. - Article 122943. - DOI 10.1016/j.apenergy.2024.122943.
14. Böhringer, C. Carbon border adjustment mechanisms: welfare and competitiveness effects / C. Böhringer, J. C. Carbone, T. F. Rutherford // *Journal of Policy Modeling*. - 2021. - Vol. 43, No. 6. - Pp. 1281–1302. - DOI 10.1016/j.jpolmod.2021.06.006.
15. Coase, R. H. The nature of the firm / R. H. Coase // *Economica*. - 1937. - Vol. 4, No. 16. - Pp. 386–405.
16. Dyer, J. H. The relational view: cooperative strategy and sources of interorganizational competitive advantage / J. H. Dyer, H. Singh // *Academy of Management Review*. - 1998. - Vol. 23, No. 4. - Pp. 660–679.
17. European Commission. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. - Luxembourg: Publications Office of the EU, 2013.
18. Fan, Z. Low-carbon production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy / Z. Fan, S. J. Friedmann // *Joule*. - 2021. - Vol. 5, No. 4. - Pp. 829–862. - DOI 10.1016/j.joule.2021.02.018.
19. Fishedick, M. A techno-economic comparison of climate protection options for the iron and steel industry in Germany / M. Fishedick [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. - 2014. - Vol. 84. - Pp. 563–580.
20. Grossman, S. J. The costs and benefits of ownership: a theory of vertical and lateral integration / S. J. Grossman, O. D. Hart // *Journal of Political Economy*. - 1986. - Vol. 94, No. 4. - Pp. 691–719.
21. Gulati, R. The architecture of cooperation: managing coordination costs and appropriation concerns in strategic alliances / R. Gulati, H. Singh // *Administrative Science Quarterly*. - 1998. - Vol. 43, No. 4. - Pp. 781–814.
22. Harpprecht, C. Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in the context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study / C. Harpprecht [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. - 2022. - Vol. 380. - Article 134846.
23. Hart, O. D. Property rights and the nature of the firm / O. D. Hart, J. Moore // *Journal of Political Economy*. - 1990. - Vol. 98, No. 6. - Pp. 1119–1158.
24. Hasanbeigi, A. Comparison of carbon dioxide emissions intensity of steel production in China, Germany, Mexico, and the United States / A. Hasanbeigi [et al.] // *Resources, Conservation and Recycling*. - 2016. - Vol. 113. - Pp. 127–139.
25. Hennart, J.-F. A transaction costs theory of equity joint ventures / J.-F. Hennart // *Strategic Management Journal*. - 1988. - Vol. 9, No. 4. - Pp. 361–374.
26. Hertz, D. B. Risk Analysis in Capital Investment / D. B. Hertz // *Harvard Business Review*. - 1964. - Vol. 42, No. 1. - Pp. 95–106.
27. Higman, C. Gasification. C. Higman, M. van der Burgt. 2nd ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2008. 456 p.
28. IEA. Coal 2024: Analysis and forecast to 2027. - Paris: IEA, 2024.
29. IEA. Global Hydrogen Review 2024. - Paris: IEA, 2024.
30. IEA. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking. - Paris: IEA, 2020.
31. IEA, NEA. Projected Costs of Generating Electricity 2020. - Paris: OECD Publishing, 2020.
32. IEA Clean Coal Centre. Hydrogen production from coal. - London, 2021.
33. Kaldellis, J. K. Sustainable energy technologies: multi-criteria decision analysis and application in industrial transition / J. K. Kaldellis [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. - 2021. - Vol. 135. - Article 110114.
34. Kanchiralla, F. M. How do variations in ship operation impact the techno-economic feasibility and environmental performance of fossil-free fuels? A life cycle study / F. M. Kanchiralla [et al.] // *Applied Energy*. - 2023. - Vol. 350. - Article 121773.

-
35. Kim, J. Decarbonizing the iron and steel industry: a systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options / J. Kim [et al.] // *Energy Research & Social Science*. – 2022. – Vol. 89. – Article 102565.
 36. Leeson, D. A techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries / D. Leeson [et al.] // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2017. – Vol. 61. – Pp. 71–84.
 37. Likert, R. A Technique for the Measurement of Attitudes / R. Likert // *Archives of Psychology*. – 1932. – Vol. 22, No. 140. – Pp. 1–55.
 38. Pai, S. A systematic review of the key elements of a just transition for fossil fuel workers / S. Pai [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2021. – Vol. 16, No. 2. – Article 023003.
 39. Pei, M. Toward a fossil free future with HYBRIT: development of iron and steelmaking technology in Sweden and Finland / M. Pei [et al.] // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, No. 7. – Article 972. – DOI 10.3390/met10070972.
 40. Powell, W. W. Neither market nor hierarchy: network forms of organization / W. W. Powell // *Research in Organizational Behavior*. – 1990. – Vol. 12. – Pp. 295–336.
 41. Rissman, J. Technologies and policies to decarbonize global industry: review and assessment of mitigation drivers through 2070 / J. Rissman [et al.] // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 266. – Article 114848.
 42. Safarian, J. Use of biomass and biochar as a partial replacement of fossil coal and coke in iron and steelmaking / J. Safarian // *Fuel*. – 2023. – Vol. 339. – Article 127532.
 43. Smil, V. *Still the Iron Age: Iron and Steel in the Modern World* / V. Smil. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. – 280 p.
 44. Stewart, T. J. Dealing with uncertainties in MCDA / T. J. Stewart, I. Durbach // *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. – New York: Springer, 2016. – Pp. 467–496.
 45. Takyi, S. A. Current status and technology development in implementing low carbon emission energy on underground coal gasification / S. A. Takyi [et al.] // *Frontiers in Energy Research*. – 2023. – Vol. 10. – Article 1051417.
 46. Vogl, V. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking / V. Vogl, M. Åhman, L. J. Nilsson // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 203. – Pp. 736–745.